

Sensitometrie der Doppelbelichtung in Anwendung auf die Filmüberblendung¹

Dipl.-Ing. KLAUS KRÖBER und EWALD GERTH · Potsdam-Babelsberg

Ein Vorgang, den jeder Kinobesucher als etwas Selbstverständliches hinnimmt und den er daher kaum noch beachtet, ist der Übergang von einer Filmszene zur nächsten, der meist in Form einer Überblendung erfolgt. So nebensächlich dieser Vorgang auch erscheint, so ist er doch technisch gesehen außerordentlich interessant und fotografisch nicht ganz einfach zu meistern. In den verhältnismäßig wenigen Veröffentlichungen ist dieses Problem noch nicht umfassend erörtert worden. Es ist daher zu begrüßen, wenn von fachmännischer Seite her das gesamte Problem einmal von Grund auf aufgerollt und in allen Einzelheiten, die hierbei eine Rolle spielen, erschöpfend behandelt wird. Leider geht es hierbei nicht ganz ohne Theorie und sogar mathematische Formeln ab. Für den mathematisch nicht Vorbelasteten ist dies aber kein Hindernis, denn der nachfolgende Aufsatz dürfte auch unter Außerachtlassung der mathematischen Formeln durchaus verständlich sein.

*Die Redaktion*²

1 Einleitung

Das Studium der Wirkung von Doppelbelichtungen wurde bisher fast ausschließlich mit dem Ziel betrieben, Schlüsse auf die Natur des latenten Bildes zu ziehen [6]. Aus der Literatur sind in erster Linie nur zwei technische Anwendungsmöglichkeiten der Doppelbelichtung bekannt. FRIESER und EGGERS [7, 9] untersuchten die Gesetzmäßigkeiten der Doppelbelichtung, um vor allem für die Empfindlichkeitssteigerung der photographischen Schicht durch Vor- oder Nachbelichtung geeignete Darstellungsmethoden zu finden und weiteres empirisches Material zu beschaffen. Zum anderen wird die Doppelbelichtung zur Beeinflussung der Gradation von Photomaterialien bei gleichbleibenden Entwicklungsbedingungen ausgenutzt, so daß in Entwicklungsautomaten zu jedem Negativ die passende Steilheit der Schwärzungskurve gewählt werden kann [4, 8].

Die vorliegende Arbeit ist ein Ergebnis der von den Verfassern durchgeführten Untersuchungen über den Mechanismus von Filmüberblendungen. Unter einer Filmüberblendung versteht man normalerweise den stetigen, subjektiv möglichst ausgeglichen wirkenden Übergang von einer Filmszene zur anderen. Die Filmbilder der ersten Szene verschwinden allmählich in demselben Maße, wie die Filmbilder der zweiten Szene auftauchen. Die Mischung der Szenen erfolgt durch eine Doppelbelichtung. Für weitere Zwecke von Filmtricks sind mitunter auch Mehrfachbelichtungen erforderlich.

¹ Abstract: www.ewald-gerth.de/10abs.pdf – attached at the end of this article (page 28)

² Der vorliegende Beitrag wurde im Jahre 2012 von dem Koautor E. Gerth wortgetreu digitalisiert und in das Internet eingestellt unter der Adresse www.ewald-gerth.de/10.pdf.

Bei der Herstellung von Spielfilmen werden Überblendungen nicht an Originalaufnahmen durchgeführt, sondern erst in einem Kopierprozeß, wobei zur Anfertigung einer einwandfreien Überblendung der Reziprozitätsfehler des verwendeten Photomaterials nicht zu vernachlässigen ist. Deshalb genügt es in diesem Falle auch nicht, zur Erfassung der Eigenschaften des Photomaterials nur die Schwärzungskurve aufzunehmen, sondern es ist darüber hinaus noch erforderlich, unter bestimmten gegebenen Belichtungsbedingungen den SCHWARZSCHILD-Exponenten p zu ermitteln, welcher für feinkörnige Photoschichten steiler Gradation etwa $0,7 < p < 0,9$ betragen kann.

Um eine größere Übersicht über die SCHWARZSCHILD-Eigenschaften des Photomaterials in dem gesamten in Frage kommenden Belichtungsbereich zu erhalten, empfiehlt es sich, die Schwärzungsfläche nach ARENS [1, 2] aufzunehmen. Wegen des damit verbundenen großen Zeitaufwandes kommt jedoch hierfür ein diskontinuierliches Verfahren, das auf punktwise Auswertung beruht, kaum in Betracht. Es wurde darum nach Wegen zur schnelleren, auch von Hilfskräften leicht durchführbaren (photographischen) Aufnahme der Schwärzungsflächen und -kurven gesucht, die in dieser Arbeit zur besseren Übersicht neu klassifiziert werden.

Ein eleganter Weg zur Analyse von Schwärzungsflächen ist durch die von LAU und KRUG [15] beschriebene Methode der Äquidensitometrie gegeben.

In der vorliegenden Arbeit werden Verfahren zur äquidensitometrischen Bestimmung von Eigenschaften des Photomaterials angegeben. Mit Hilfe des Begriffes der Schwärzungsfläche werden die Gesetze der Doppel- und Mehrfachbelichtung hergeleitet und auf die Technik der Filmüberblendung angewendet.

2 Ein photographisches Verfahren zur Gewinnung von Schwärzungsflächen und Schwärzungskurven

Ein photographisches Verfahren zur Aufnahme von Schwärzungskurven wurde bereits 1911 von GOLDBERG, LUTHER und WEIGERT [20] angegeben. Es hat sich wohl deshalb nicht in der photographischen Praxis eingebürgert, weil man mit den üblichen Photomaterialien als Kurventräger die Schwärzungskurve nur in Form einer verwaschenen Schattengrenze erhält, die für eine exakte Auswertung nicht sehr geeignet ist.

Bevor auf die Methode zur photographischen Gewinnung scharfer Schwärzungskurven eingegangen wird, soll gezeigt werden, wie die Abbildung der Schwärzungskurve zustande kommt (siehe auch [15]).

2.1 Die Graukeilmethode

Belichtet man das zu untersuchende Photomaterial durch einen kontinuierlichen Graukeil mit konstantem, in bezug zum Koordinatensystem negativen Schwärzungsgradienten

$$S_k = D_E(l - x) \quad (1)$$

mit D_E = Keilkonstante (Intensitätsvariation), l = Keillänge und S_k = Keilchwärzung, so hängt die Beleuchtungsstärke exponentiell von der jeweiligen Keillänge ab,

$$E = E_0 10^{D_E(x-l)}. \quad (2)$$

Man erhält nach dem Entwickeln des zu untersuchenden Photomaterials eine $\lg E$ -Schwärzungsfläche, bei der die Schwärzung in positiver Abszissenrichtung entsprechend der Schwärzungskurve

$$S_x = f(\lg E) = f[\lg E_0 + D_E(x - l)] \quad (3)$$

zunimmt.

Überdeckt man die erhaltene $\lg E$ -Schwärzungsfläche mit dem gleichen Graukeil, der schon zu ihrer Erzeugung diente, in diesem Falle aber mit negativem Schwärzungsgradienten in Ordinateurichtung, so sind die Kurven gleicher Schwärzung (Äquidensiten, in der älteren Literatur mit Bezug auf die Opazität Isoopaken genannt) in der durch Überlagerung entstandenen Doppelschicht von Schwärzungsfläche und Graukeil das getreue Abbild der Schwärzungskurve.

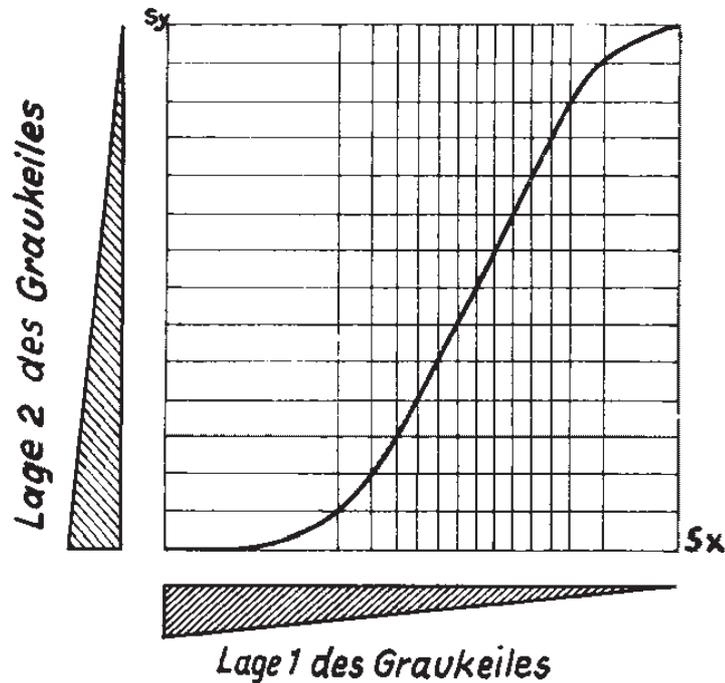


Abb. 1 Die Entstehung der Schwärzungskurve nach der Graukeilmethode (schematisch). In Lage 1 wird der Graukeil auf das zu untersuchende Photomaterial kopiert und so die $\lg E$ -Schwärzungsfläche erzeugt, die gemeinsam mit dem Graukeil in Lage 2 auf extrahartes Photomaterial kopiert wird. Die Schwärzungskurve zeichnet sich als Schattengrenze zwischen hell und dunkel ab.

Für die Äquidensiten gilt:

$$S_x + S_y = S_0 = \text{const} \quad (4)$$

bzw. mit (1) (bezogen auf die Ordinate) und (3)

$$f[\lg E_0 + D_E(x - l)] + D_E(l - y) - S_0 = 0. \quad (5)$$

Durch Auflösen dieser Gleichung nach y erhält man:

$$y = \frac{1}{D_E} f\left\{D_E\left[x - \left(l - \frac{\lg E_0}{D_E}\right)\right]\right\} + \left(l - \frac{S_0}{D_E}\right). \quad (6)$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß eine Vergrößerung von E_0 eine Parallelverschiebung der Kurve in dem vorgegebenen Koordinatensystem (Abb. 1) nach links und eine Vergrößerung der Intensität des Kopierlichtes und damit von S_0 eine Parallelverschiebung nach unten bewirkt. Der Maßstab der Kurvenabbildung wird allein durch die Keilkonstante D_E bestimmt.

Den γ_E -Wert ermittelt man durch Anlegen der Tangente:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{D_E} \frac{df}{d \lg E} \frac{d \lg E}{dx} = \frac{df}{d \lg E} = \gamma_E. \quad (7)$$

Das als Kurventräger verwendete Photomaterial soll so hart wie nur irgend möglich arbeiten, damit die Schattengrenze scharf wird. Reicht die Härte nicht aus, so kann man mit Verstärkern bzw. durch Umkopieren auf extrahartes Photomaterial nachhelfen.

Abb. 2a zeigt eine $\lg E$ -Schwärzungsfläche und Abb. 2b die dazugehörige $\lg E$ -Schwärzungskurve.

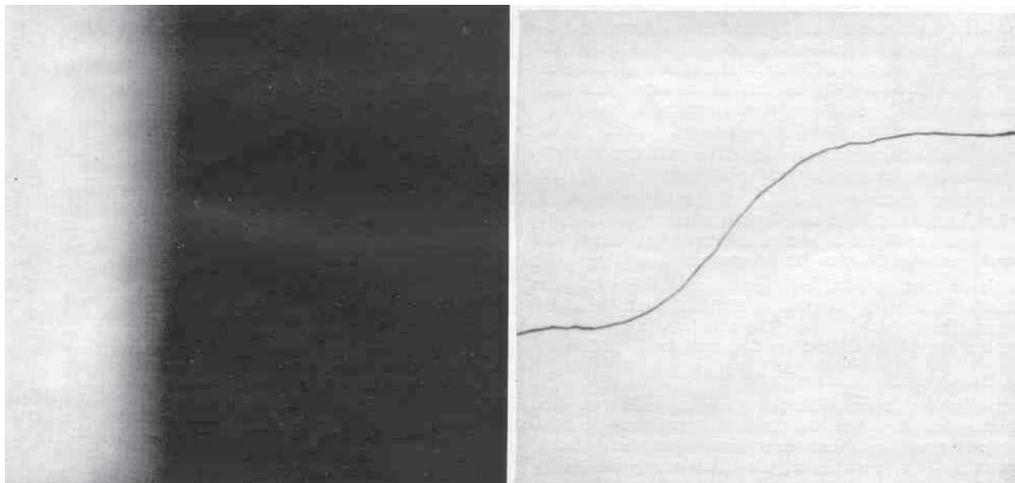


Abb. 2a, b $\lg E$ -Schwärzungsfläche (2a) (Graukeilkopie) und $\lg E$ -Schwärzungskurve (2b) von Photopapier (Mimosa normal).

Keilkonstante $D_E = 0,602 \text{ cm}^{-1}$, Belichtungszeit $t = 30 \text{ s}$.

Mit der Graukeilmethode ist es auch möglich, andere Schwärzungsflächen, bei denen nur ein Parameter variabel ist, in Schwärzungskurven umzuwandeln. Als Beispiel hierzu sei die Äquidensitendarstellung einer Spektralaufnahme erwähnt [15].

Das Verfahren kann auch zur Gewinnung der $\lg t$ -Schwärzungskurve verwendet werden. Allerdings werden hierbei wegen der schwierig zu verwirklichenden exponentiellen Zeitvariation einige technische Probleme aufgeworfen. Von den Verfassern wurden mehrere Verfahren zur exponentiellen Zeitvariation erprobt, über die später berichtet werden soll.

Einfacher ist es, nach einer von den Verfassern vorgeschlagenen Methode nur die $\lg E$ -Schwärzungskurve aufzunehmen und den SCHWARZSCHILD-Exponenten p , der nach

$$\frac{\gamma_t}{\gamma_E} = p \quad (7a)$$

das Bindeglied zwischen den beiden Schwärzungskurven ist, durch eine Doppelbelichtung zu bestimmen. Nimmt man nämlich eine $\lg E$ -Schwärzungsfläche mit einfacher Belichtungszeit und eine zweite mit doppelter Belichtungszeit auf, so würde sich die zweite Kurve gegenüber der ersten bei Gültigkeit des Reziprozitätsgesetzes um den Betrag $\lg E = -\lg 2$ in negativer Abszissenrichtung verschieben. Bei Gültigkeit der SCHWARZSCHILD-Beziehung ist dieser Betrag um den Faktor p kleiner, da aus

$$Et^p = \text{const} \quad (7b)$$

$$\lg E = -p \lg t + c \quad (8)$$

und hieraus wiederum die Differenzendarstellung

$$\Delta \lg E = -p \Delta \lg t \quad (8a)$$

folgt. Bei einer Doppelbelichtung mit $t_2 = 2t_1$ ist $\Delta \lg t = \lg 2$, und $\Delta \lg E$ läßt sich aus dem Abstand a der $\lg E$ -Schwärzungskurven und der Keilkonstanten D_E zu $\Delta \lg E = aD_E$ errechnen. Damit ist

$$p = \frac{aD_E}{\lg 2}. \quad (8b)$$

Auf diese Weise wird die Bestimmung des SCHWARZSCHILD-Exponenten p auf eine Längenmessung zurückgeführt. Für einen Graukeil mit $D_E = 0,3010 \text{ cm}^{-1}$ kann man p unmittelbar an einer Zentimeterskala ablesen. Die beiden Schwärzungskurven können mit den in der Praxis üblichen Photometriereinrichtungen aufgenommen werden (Abb. 3).

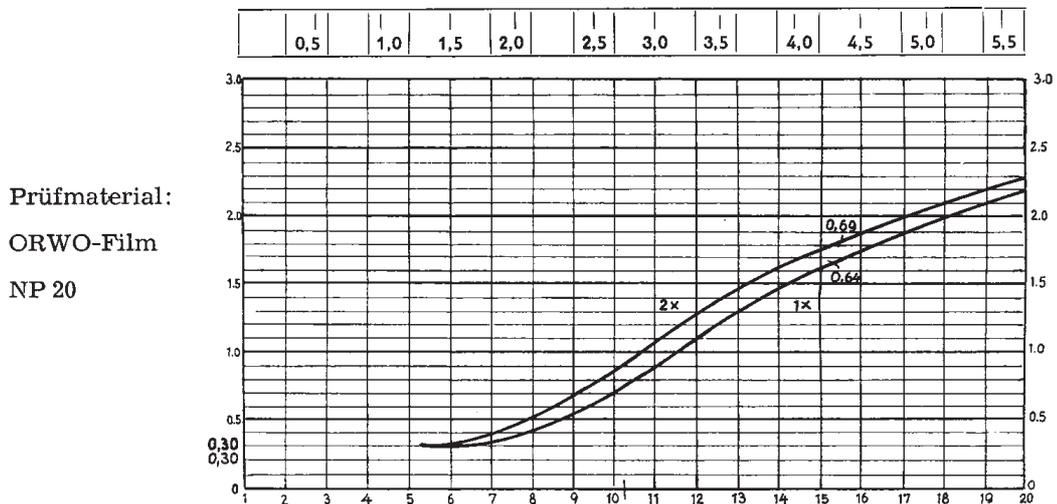


Abb. 3 Schwärzungskurvenschar mit dem Parameter der Zeit auf Koordinatenpapier, wie es im *DEFA-Kopierwerk Babelsberg* zur Prüfung des Photomaterials verwendet wird.

Die Belichtungszeiten für beide Kurven unterscheiden sich um den Faktor 2. Da auf der Intensitätsachse $\lg 2$ der Länge 1 cm entspricht (Abbildungsmaßstab 1:2), kann man den SCHWARZSCHILD-Exponenten p unmittelbar als horizontalen Kurvenabstand an einer Zentimeterskala ablesen.

Zur äquidensitometrischen Ermittlung von p empfiehlt es sich, das Photomaterial zur Hälfte der Schwärzungskurve im Bereich geringer Schwärzungen mit schwarzem Papier abzudecken, zu belichten, das schwarze Papier herauszuziehen und noch einmal mit der gleichen Zeit und Intensität zu belichten. Der Abstand der Schwärzungskurven läßt sich dann leicht an der Sprungstelle der Kurve ermitteln (Abb. 4a, b).

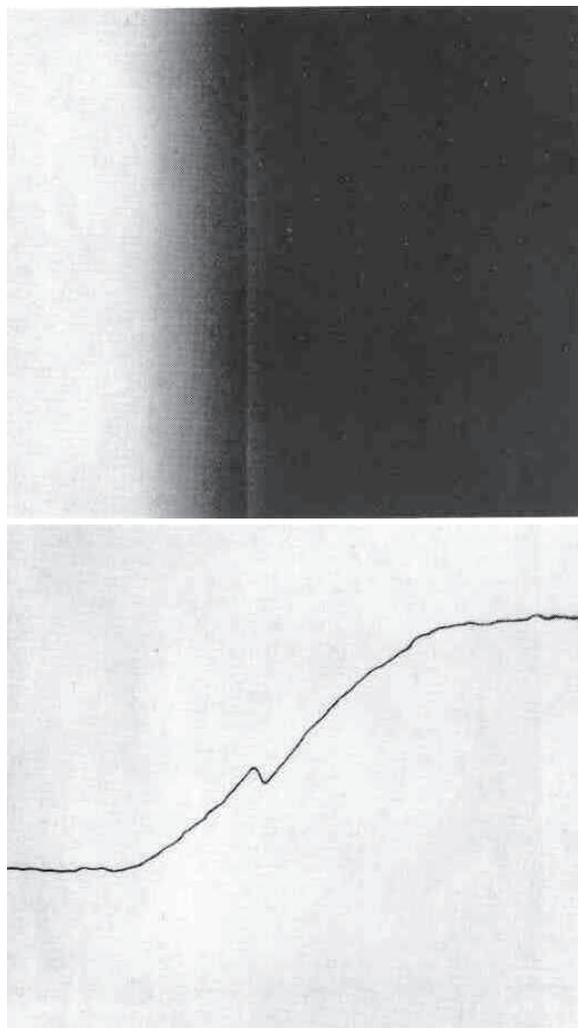


Abb. 4a, b $\lg E$ -Schwärzungsfläche (4a) und $\lg E$ -Schwärzungskurve (4b) mit Doppelbelichtungssprung. Material: Vephota normal; Belichtungszeiten: $t_1 = 30$ s, $t_2 = 60$ s. Aus dem Abstand der Kurven an der Sprungstelle $a = 0,40$ cm und der Größe der Keilkonstante $D_E = 0,602 \text{ cm}^{-1}$ ergibt sich $p = 0,8$. Positiv einer SABATTIER-Kopie (s. 2.2)

2.2 Die Transformation der Äquidensiten

Zur Umwandlung einer Äquidensite des Photogramms in eine dunkle Kurve auf hellem Grunde oder umgekehrt eignen sich alle photographischen Extremwerteffekte. Praktische Bedeutung hat für die Transformation der Äquidensiten vor allem der SABATTIER-Effekt erlangt, der von ARENS [3] in einer Reihe von Arbeiten sowie von KLÖTZER [12] untersucht und gedeutet und von LAU und KRUG [15] zur Gewinnung photographisch transformierter Äquidensiten angewandt wurde.

Abb. 5a und 5b zeigen die Schwärzungsfläche und die Schwärzungskurve des SABATTIER-Effektes.

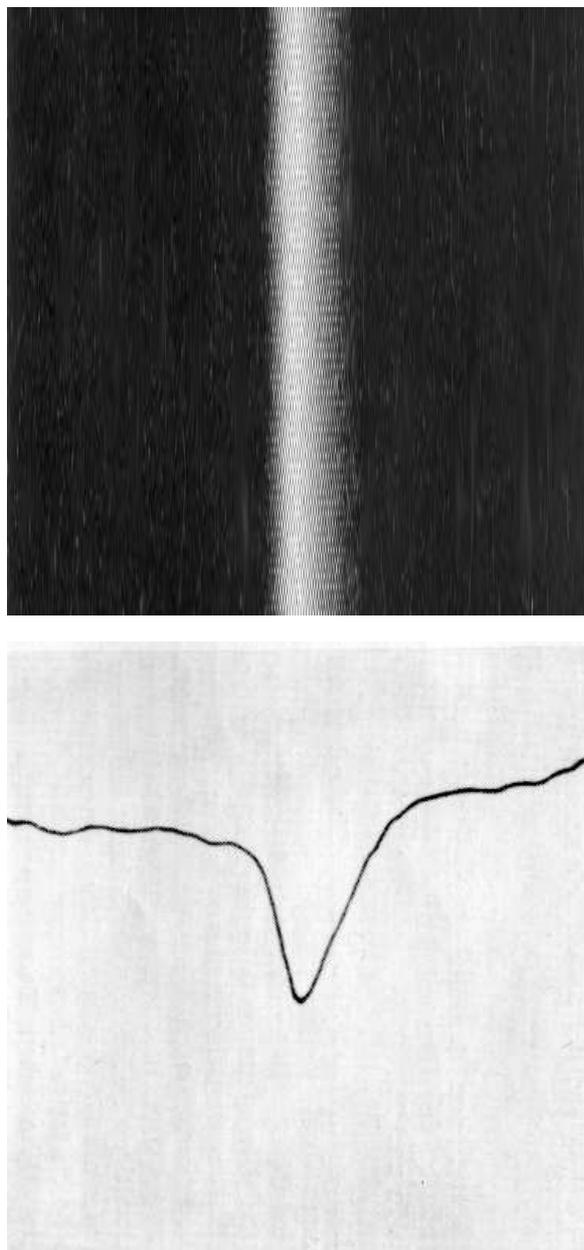


Abb. 5a, b Schwärzungsfläche (5a) und Schwärzungskurve (5b) des SABATTIER-Effektes auf extrahartem Photopapier (Vephota). Positiv einer SABATTIER-Kopie (s. 2.2)

Neuerdings wurde von WERNER [21] vorgeschlagen, auch den Solarisationseffekt zur Äquidensitentransformation auszunutzen. Weiterhin eignet sich nach Versuchen von GERTH auch der CLAYDEN-Effekt hierzu.

In der Literatur wird die transformierte Äquidensite allgemein kurz als „Äquidensite“ bezeichnet. Die Verfasser schließen sich dieser Terminologie an und verwenden nur in Zweifelsfällen den exakten Begriff.

2.3 Die $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche

Zur besseren Kennzeichnung der Eigenschaften der Photomaterialien bei definierten Entwicklungsbedingungen gegenüber Schwärzungskurven wurde 1930 von ARENS [1, 2] vorgeschlagen, die Schwärzung als Funktion der beiden unabhängigen Variablen Zeit und Intensität in einem räumlichen Koordinatensystem darzustellen (Schwärzungsrelief).

Die Äquidensitendarstellung (Äquidensitogramm) der Funktion $S = f(\lg t, \lg E)$ wurde *Schwärzungsfläche* genannt. Von dieser Bezeichnung soll hier abgegangen werden, da sie eher dem in Abb. 6a gezeigten Photogramm der Schwärzungsfläche zukommt.

Zur photographischen Aufnahme der Schwärzungsfläche nach ARENS müssen Zeit- und Intensitätsvariation gleichzeitig durchgeführt werden.

Die Intensitätsvariation wird mit einem kontinuierlichen Graukeil vorgenommen und bietet keine Schwierigkeiten – im Gegensatz zu der Zeitvariation, bei der eine Blende logarithmisch über das zu belichtende Photomaterial zu bewegen ist. Hierzu ist eine präzise arbeitende Belichtungsapparatur erforderlich.

Abb. 6a zeigt eine $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche und Abb. 6b die dazugehörige photographische Zerlegung der Schwärzungsfläche in Äquidensiten, die durch mehrfache Anwendung des SABATTIER-Effektes erhalten wurde.

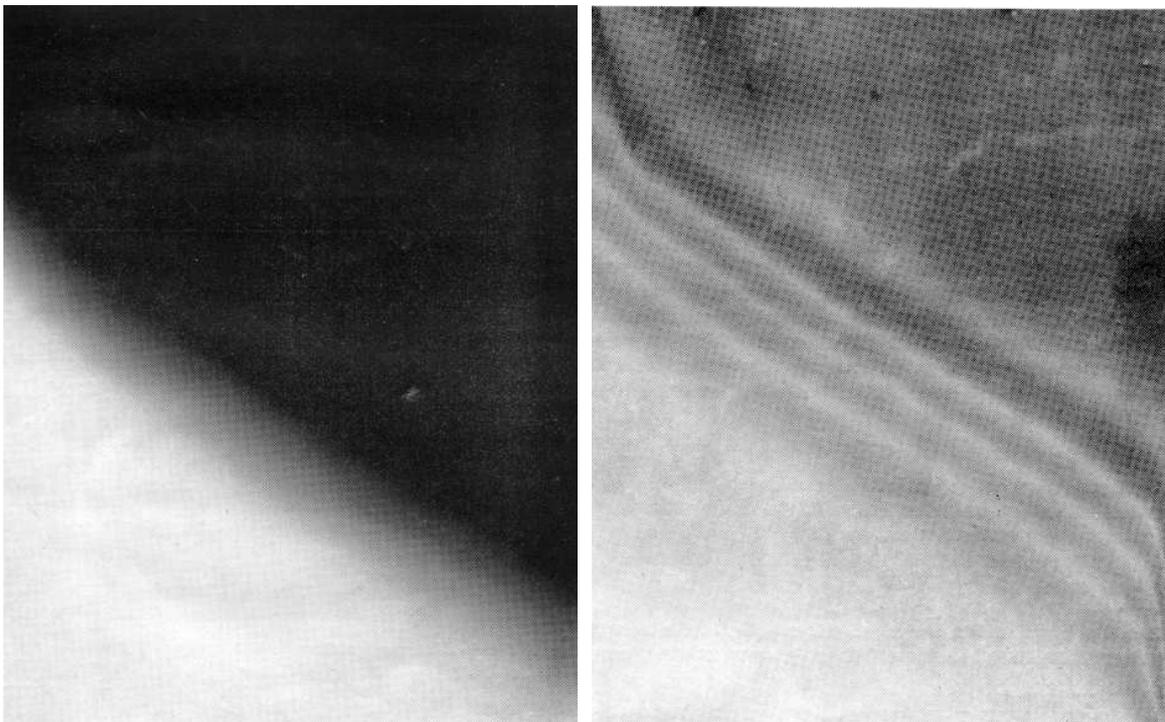


Abb. 6a, b $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche (6a) und Äquidensitendarstellung dieser Schwärzungsfläche (6b), die durch mehrfache Anwendung des SABATTIER-Effektes gewonnen wurde

Die Neigung der Äquidensiten, die bei Gültigkeit der SCHWARZSCHILD-Beziehung in einem kleinen Bereich (hier als „SCHWARZSCHILD-Bereich“ bezeichnet, siehe 4.1) durch die lineare Gleichung

$$\lg E = \text{const} - p \lg t \quad (8c)$$

gegeben ist, liefert an jeder Stelle der Schwärzungsfläche den SCHWARZSCHILD-Exponenten p bzw. $q = 1/p$.

2.4 Die $\lg E_1 t_1$ - $\lg E_2 t_2$ -Schwärzungsfläche

FRIESER und EGGERS [7, 9] suchten die Abweichung des Photomaterials vom Reziprozitätsgesetz bei der Doppelbelichtung durch eine besondere Schwärzungsfläche zu erfassen, bei der die Schwärzung eine Funktion der beiden Belichtungen ist.

Diese Schwärzungsfläche läßt sich sehr leicht photographisch aufnehmen. Man braucht nur vor der Zweitbelichtung den kontinuierlichen linearen Graukeil gegenüber der Erstbelichtung um 90° zu drehen (Abb. 7a und 7b).

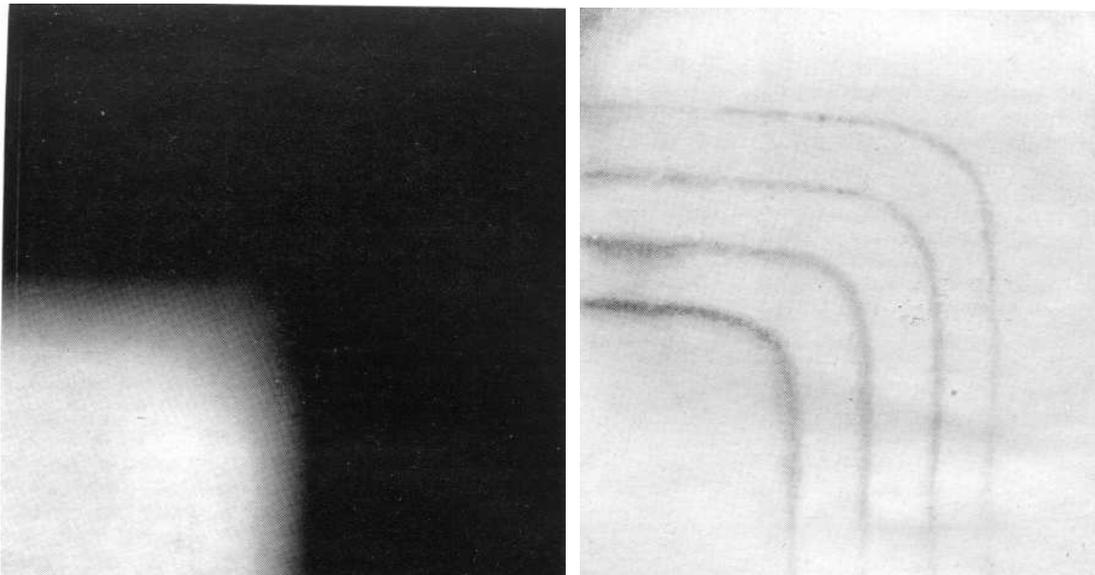


Abb. 7a, b $\lg E_1 t_1$ - $\lg E_2 t_2$ -Schwärzungsfläche (7a) und Äquidensitendarstellung dieser Schwärzungsfläche (7b), die durch mehrfache Anwendung des SABATTIER-Effektes erhalten wurde (Positiv)

Nachteilig an dieser Schwärzungsfläche ist, daß die erhaltenen Äquidensiten verglichen werden müssen mit den bei Gültigkeit des Reziprozitätsgesetzes errechneten Kurven. Diese können allerdings auch aus einer $\lg t_1$ - $\lg t_2$ -Schwärzungsfläche photographisch gewonnen werden, da hierbei nach Gl. (17) der SCHWARZSCHILD-Effekt umgangen wird. Eine weitere Möglichkeit besteht in der gleichzeitigen Belichtung der Schicht durch zwei gegeneinander um 90° verdrehte Graukeile von beiden Seiten. Eine quantitative Auswertung ist aber dennoch wegen des logarithmischen Koordinatensystems umständlich. Diese Nachteile werden bei der $E_1 t_1$ - $E_2 t_2$ -Schwärzungsfläche vermieden.

2.5 Die E_1t_1 - E_2t_2 -Schwärzungsfläche

Hierbei muß die Intensität hinter dem kontinuierlichen Graukeil linear zunehmen, d. h., die Schwärzung des Keils muß nach der Beziehung

$$S = \text{const} - a \lg x \quad (9)$$

logarithmisch abnehmen.

Zur Herstellung solcher logarithmischer Graukeile kann man über ein Photomaterial mit annähernd linearer Schwärzungskurve bei der Belichtung eine Blende wie in 2.3 zeitlich linear hinwegbewegen. Kopiert man das erhaltene Photogramm der Schwärzungsfläche auf ein Photomaterial mit ebenfalls linearer Schwärzungskurve, so ergibt sich ein Graukeil mit dem Schwärzungsverlauf

$$S = \text{const} - \gamma_E \gamma_t \lg t. \quad (9a)$$

Damit das durch den Keil hindurchtretende Licht eine lineare Abhängigkeit der Intensität von der Keillänge besitzt, ist es notwendig, daß

$$\gamma_E \gamma_t = 1 \quad (9b)$$

wird.

Man kann sich aber auch mit einem Keil von kammartiger Struktur behelfen (Abb. 8), der mittels einer Milchglasscheibe oder (und) eines optischen Systems unscharf auf das Photomaterial abgebildet wird.

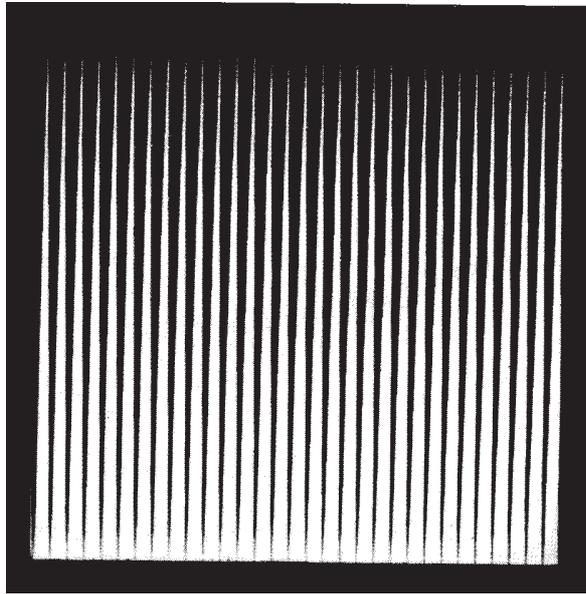


Abb. 8 Intensitätslinearer Graukeil

Bei Gültigkeit des Reziprozitätsgesetzes ergäben sich als Äquidensiten um -45° geneigte Geraden. Nach Abb. 9b ist aus der Krümmung der Äquidensiten ein SCHWARZSCHILD-Exponent $q > 1$ bzw. $p < 1$ zu entnehmen. Den genauen Wert kann man mit dem unter 5.3 beschriebenen Rechenschieber bestimmen.

Die Lichtmengen der beiden Einzelbelichtungen müssen etwa von der gleichen Größenordnung sein.

Aus dieser Schwärzungsfläche ergibt sich sofort die Zusatzintensität bei der Zweitbelichtung, die nötig ist, um die gleiche Schwärzung zu erzielen wie bei einer einmaligen Belichtung mit der Gesamtintensität E_0 .

Die E_1 - E_2 -Schwärzungsfläche ($t_1 = t_2$) ist für die Herstellung einwandfreier Filmüberblendungen von besonderer Bedeutung.

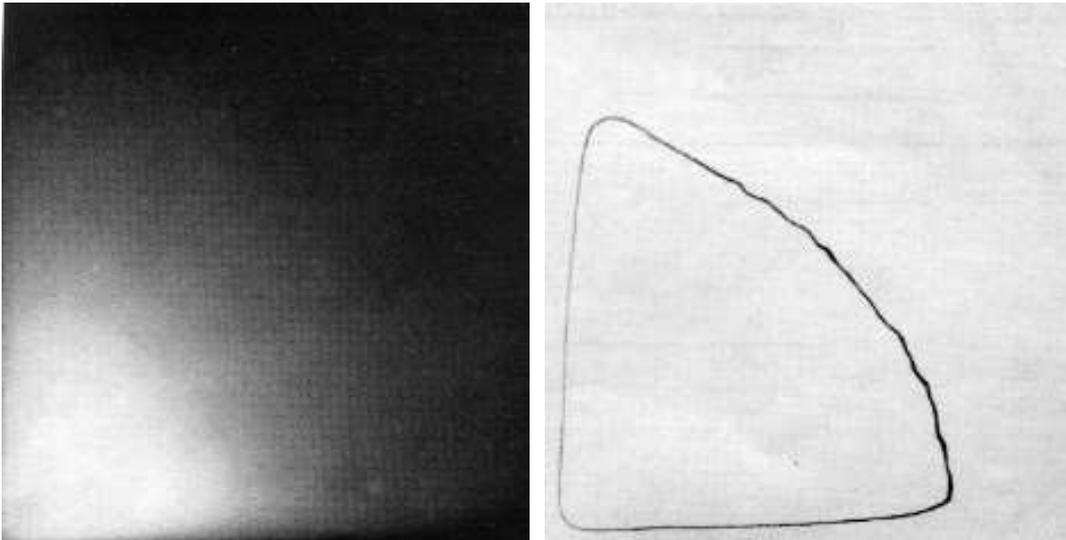


Abb. 9a, b $E_1 t_1$ - $E_2 t_2$ -Schwärzungsfläche (9a) und eine dazugehörige Äquidensite (9b) (Positiv einer SABATTIER-Kopie, s. 2.2). Aus der Wölbung der Äquidensite entnimmt man die für eine konstante Schwärzung notwendige Überhöhung der Teilbelichtungen.

3 Das Summengesetz der Doppelbelichtung nach Eggers und Frieser [7,9]

Geht man von der Annahme aus, daß die Zweitbelichtung eine Fortsetzung der Erstbelichtung sei, gleichgültig, wie diese erfolgte, so kann man die Doppelbelichtung leicht anhand der $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche konstruieren [9]. Diese Annahme darf aber nur für nicht zu große Unterschiede der Zeit und Intensität gemacht werden (WEINLAND-Effekt, CLAYDEN-Effekt), da sonst wegen der verschiedenen Keimarten, die bei sehr unterschiedlichen Intensitäten gebildet werden, das latente Bild der Zweitbelichtung nicht progressiv an das der Erstbelichtung anknüpft, sondern mitunter sogar auf dessen Kosten entsteht.

Die Konstruktion der Doppelbelichtung anhand der Schwärzungsfläche kann gleichzeitig als Grundlage zur Herleitung des Summengesetzes der Doppelbelichtung dienen. Man rechnet (bzw. zeichnet) die Lichtmenge der Erstbelichtung $E_1 t_1$ auf die Intensität der Zweitbelichtung E_2 um und addiert die sich dabei ergebende Zeit t'_2 zu der Zeit der Zweitbelichtung t_2 , wobei die Summe $t'_2 + t_2$ mit E_2 die resultierende Gesamtschwärzung $S_{1,2}$ der Doppelbelichtung ergibt.

Es ist leicht zu zeigen, daß bei Umkehrung der Reihenfolge der Belichtungen im allgemeinen die resultierenden Schwärzungen verschieden sind, daß also $S_{1,2} \neq S_{2,1}$ ist.³

Man erhält bei der Vertauschung der Belichtungen nur gleiche Ergebnisse, wenn die Äquidensiten der Schwärzungsfläche in Richtung der $\lg t$ -Achse parallel verlaufen, wenn also die Äquidensiten bei beliebigen Intensitäten stets das gleiche Verhältnis der Zeiten haben. Diese Bedingung ist für einen „SCHWARZSCHILD-Bereich“ (s. 4.1) erfüllt, wie die einfache Rechnung nach [9] zeigt:

$$S_1 = f(E_1, t_1) = f(E_2, t'_2) \quad (10)$$

Für einen SCHWARZSCHILD-Bereich wird

$$S_1 = f(E_1^q, t_1) = f(E_2^q, t'_2). \quad (10a)$$

Die Schwärzung für eine Doppelbelichtung ist allgemein

$$S_{1,2} = f(E_2, [t'_2 + t_2]). \quad (11)$$

Nach (10) ist t'_2 eine Funktion von E_1 , E_2 und t_1 ,

$$t'_2 = \varphi(E_1, E_2, t_1), \quad (12)$$

und für den SCHWARZSCHILD-Bereich

$$t'_2 = \frac{E_1^q}{E_2^q} t_1. \quad (12a)$$

Durch Einsetzen von Gl. (12) in (11) erhält man

$$S_{1,2} = f(E_2, [\varphi(E_1, E_2, t_1) + t_2]), \quad (13)$$

und für einen SCHWARZSCHILD-Bereich wird mit Gl. (12a)

$$S_{1,2} = f\left(E_2^q \left[\frac{E_1^q}{E_2^q} t_1 + t_2 \right]\right)$$

$$S_{1,2} = f(E_1^q t_1 + E_2^q t_2). \quad (13a)$$

³Anmerkung des Koautors E. Gerth im Jahre 2012:

Die Tatsache, daß eine Doppelbelichtung unterschiedlicher Art – also z.B. Blitzlicht und Lampenlicht – aber etwa gleicher Lichtmenge des Produktes *Lichtintensität* × *Belichtungszeit* – bei Vertauschung der Reihenfolge der Belichtungen zu unterschiedlichen Schwärzungen führt, war den Verfassern schon zur Zeit der Arbeit an dem vorliegenden Aufsatz (1963) bekannt, konnte aber seinerzeit noch nicht erklärt werden.

Die Nichtkommutativität der Wirkung von Doppelbelichtungen wurde erst in der Habilitationsschrift von E. Gerth (1972): www.ewald-gerth.de/habilitation.pdf nachgewiesen.

An der symmetrischen Gestalt von Gl. (13a) erkennt man, daß für einen SCHWARZSCHILD-Bereich $S_{1,2} = S_{2,1}$ ist. Die aus (13a) erhaltene Schwärzung kann entsprechend der dazugehörigen Äquidensite nach

$$\boxed{E_1^q t_1 + E_2^q t_2 = E_0^q t_0 = \text{const}} \quad (14)$$

umgerechnet werden. In dem Produkt $E_0^q t_0$ ist einer der Faktoren frei wählbar. Nach Gl. (17) ist es sinnvoll, t_0 als „Gesamtzeit“ zu bezeichnen. Analog dazu sei nach Gl. (18) E_0 die „Gesamtintensität“.

Das Summengesetz nach Gl. (14) gilt in der Verallgemeinerung (16) stets, wenn in dem Funktionsansatz der Schwärzung

$$S = f[v(E) \cdot w(t)] \quad (15)$$

das Argument ein Produkt der Funktionen von E und t , $w(t)$ aber eine einfache Potenzfunktion der Form t^n ist,

$$\bar{v}(E_1) \cdot t_1 + \bar{v}(E_2) \cdot t_2 = \bar{v}(E_0) \cdot t_0. \quad (16)$$

Der Querstrich über v kennzeichnet den erweiterten funktionalen Zusammenhang. Für $w = t^n$ ist

$$\bar{v}(E) = \sqrt[n]{\bar{v}(E)} \cdot t_0. \quad (16a)$$

Aus Gl. (16) bzw. (14) ergeben sich folgende Spezialfälle:

1. $E_1 = E_2 = E_0 = \text{const}$

$$t_1 + t_2 = t_0 \quad (17)$$

2. $t_1 = t_2 = t_0 = \text{const}$

$$\bar{v}(E_1) + \bar{v}(E_2) = \bar{v}(E_0) \quad (18)$$

bzw. nach Gl. (14) für einen SCHWARZSCHILD-Bereich:

$$\boxed{E_1^q + E_2^q = E_0^q = \text{const}} \quad (18a)$$

Gl. (18a) ist die grundlegende Beziehung für die Doppelbelichtung bei der Filmüberblendung nach dem Verfahren der Intensitätsvariation.

4 Die Ableitung des Summengesetzes unter vereinfachenden Annahmen

4.1 Der Schwarzschild-Bereich

Beim Betrachten einer realen $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche (Abb. 10) sieht man, daß auch der SCHWARZSCHILD-Exponent

$$p = \frac{d \lg E}{d \lg t} \quad \text{bzw.} \quad q = \frac{d \lg t}{d \lg E}$$

eine Funktion von E und t ist.

Die SCHWARZSCHILDsche Beziehung wird um so genauer erfüllt, je kleiner der betrachtete Bereich der Schwärzungsfläche ist.

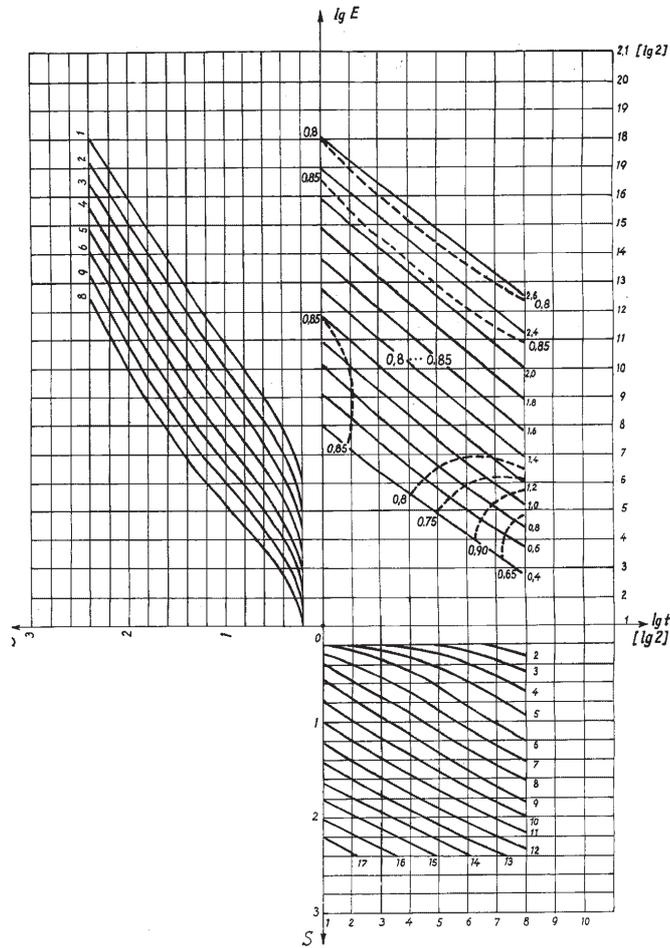
Ein Bereich, der durch die vorgegebenen Toleranzen mit a und b begrenzt sei, soll hier als „SCHWARZSCHILD-Bereich“ bezeichnet werden.

Für ihn gilt:

$$a < \frac{d \lg t}{d \lg E} < b \quad (19)$$

In der Praxis läßt sich der SCHWARZSCHILD-Bereich leicht ermitteln, indem man in die $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche die Isoklinen einträgt (Abb. 10).

Man ersieht daraus, daß durch Schwärzungsflächen viele Eigenschaften des Photomaterials gekennzeichnet sind, die man einer einzelnen Schwärzungskurve nicht entnehmen kann.



4.2 Die Ableitung des Summengesetzes der Mehrfachbelichtung für einen Schwarzschild-Bereich

Während die Ableitung von EGGERS und FRIESER im Abschnitt 3 zunächst nur das Summengesetz der Doppelbelichtung erbrachte, wird im folgenden angegeben, wie man in wenigen Zeilen das Summengesetz der Mehrfachbelichtung erhalten kann. Es soll aber nicht unerwähnt bleiben, daß man auch nach dem Ansatz von EGGERS und FRIESER und Anwendung des Induktionsschlusses auf Gl. (23) kommt.

Summiert man die Lichteinwirkungen von n Einzelbelichtungen unterschiedlicher Zeit und Intensität, die nach der SCHWARZSCHILD-Formel

$$E_k^q t_k = E_0^q (x_k t_0) \quad (20)$$

($k = 1, 2, 3, \dots, n$; $t_0 =$ Gesamtzeit; $E_0 =$ Gesamtintensität) auf den Zeitbruchteil x_k der Gesamtbelichtung $E_0^q t_0$ umgerechnet werden,

$$x_k = \frac{E_k^q t_k}{E_0^q t_0}, \quad (21)$$

so ergibt sich wegen

$$\sum_{k=1}^n x_k = 1 \quad (22)$$

die allgemeine Darstellung der Mehrfachbelichtung für einen SCHWARZSCHILD-Bereich

$$\boxed{\sum_{k=1}^n E_k^q t_k = E_0^q t_0} \quad (23)$$

Der Ansatz mit $S = f(Et^p)$ liefert das gleiche Ergebnis. Für $n = 2$ erhält man aus Gl. (23) Gl. (14).

Selbstverständlich kann man der Ableitung auch die allgemeinere Gl. (15) zugrunde legen und erhält dann mit $w = t^n$ analog Gl. (16)

$$\sum_{k=1}^n \bar{v}(E_k) t_k = \bar{v}(E_0) t_0 \quad (24)$$

Durch Gl. (23) wird in zwangloser Weise von vornherein die Mehrfachbelichtung erfaßt, die beispielsweise für Filmtrickaufnahmen von großer Bedeutung ist.

4.3 Die Ableitung des Summengesetzes von *van Kreveld* für einen *Schwarzschild*-Bereich

Eine Doppelbelichtung besonderer Art wurde 1934 von VAN KREVELD [13] untersucht. Danach gilt für die Intensitäten zweier Farben E_r und E_v und die Intensität der Mischfarbe E_{r+v} , die alle die gleiche Schwärzung hervorrufen sollen, die Beziehung

$$\frac{1}{E_{r+v}} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{E_v} \quad (25)$$

Nach VAN KREVELD soll es gleichgültig sein, ob die Einzelfarben gleichzeitig oder hintereinander aufbelichtet werden. Man kann so aus den Schwärzungskurven der beiden Einzelfarben die Schwärzungskurve der Mischfarbe konstruieren.

Zwei verschiedene Schwärzungskurven erhält man aber auch, wenn man durch den gleichen Graukeil mit festliegenden Intensitätswerten der einzelnen Stufen mit unterschiedlichen Zeiten oder Intensitäten (z.B. durch Vorschalten eines Filters vor den Graukeil) belichtet.

Eine Probe zeigt, daß auch hierfür – sofern man von dem bei Hintereinanderbelichtung auftretenden SCHWARZSCHILD-Effekt absieht – die Formel von VAN KREVELD gilt.

Mit Hilfe von Gl. (23) ist eine Erklärung der empirischen Beziehung (25) möglich. Zur Ableitung geht man von Gl. (8) aus. Danach bewirkt in dem Diagramm $S = f(\lg E)$ die Vergrößerung der Belichtungsintensität (Intensitätswerte des Graukeils beibehalten!) eine Verschiebung der Schwärzungskurve um den Betrag $\lg E$ und eine Vergrößerung der Belichtungszeit eine Verschiebung der Kurve um $p \lg t$ nach links. Zu einer bestimmten Schwärzung werde z.B. aus dem Diagramm für die k -te Schwärzungskurve die Intensität E_k^* abgelesen. Für diesen Punkt gilt dann

oder

$$\lg E_k^* = \lg c - p \lg t_k - \lg E_k$$

bzw.

$$E_k^* = \frac{c}{E_k t_k^p} \quad \text{bzw.} \quad E_k t_k^p = \frac{c}{E_k^*}. \quad (26)$$

Setzt man (26) nach Umformung zu

$$E_k^q t_k = \frac{c}{E_k^{*q}}$$

in (23) ein, so erhält man

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{E_k^{*q}} = \frac{1}{E_0^{*q}}, \quad (27)$$

womit die oben erwähnten Feststellungen von VAN KREVELD für den Fall $p = q = 1$ bestätigt werden. Dieser Fall liegt aber im allgemeinen nur bei simultanen Doppelbelichtungen (beide Belichtungen gleichzeitig, nicht nacheinander) vor. Bei sukzessiver Doppelbelichtung gilt Gl. (27) nur für den vorausgesetzten SCHWARZSCHILD-Bereich. Hierin scheint auf den ersten Blick ein Widerspruch zu liegen, da Gl. (27) keine Zeitabhängigkeit enthält. Man bedenke aber, daß die E_k^* in dem $\lg E$ -Diagramm für bestimmte Schwärzungen abgelesen werden, die nur von dem Produkt $E_k t_k^p$ abhängen.

Aus Gl. (27) ergibt sich sofort die bei einer sukzessiven Doppelbelichtung auftretende horizontale Verschiebung der Schwärzungskurve, die nach Gl. (8b) zur Bestimmung des SCHWARZSCHILD-Exponenten verwendet wurde. Für die beiden gleichartigen Schwärzungskurven der Einzelbelichtungen gilt $E_1^* = E_2^* = E^*$. Die Verschiebung beträgt somit

$$\lg E_0^* - \lg E^* = \Delta \lg E^* = p \lg 2.$$

Für einen Graukeil mit der Keilkonstante D_E ist bei einem Kurvenabstand (siehe Ableitung von 8b)

$$a \Delta \lg E^* = a D_E.$$

Bei den Versuchen von VAN KREVELD sind die Farben vergleichbar mit Filtern, die den Wirkungsgrad des Lichtes entsprechend der spektralen Empfindlichkeit der Photoschicht herabsetzen. Die VAN KREVELDsche Formel ist für die photographische Praxis von Bedeutung, wenn aus zwei Belichtungen mit verschieden stark auf die Photoschicht wirkendem Licht der Intensitäten E_r und E_v , die zu gleichen Schwärzungen führen, die zu derselben Schwärzung notwendige Intensität des Mischlichtes E_{r+v} (auch bei Nacheinanderbelichtung) bestimmt werden soll (Abb. 11).

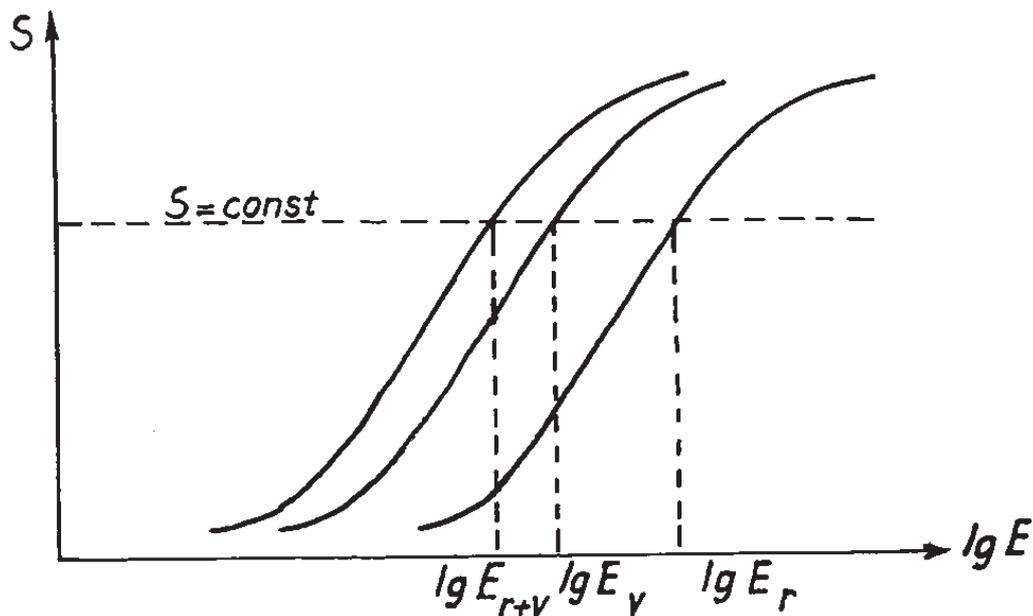


Abb. 11 Schwärzungskurven der Einzelbelichtungen und Schwärzungskurve der Gesamtblendung gemäß der Beziehung von VAN KREVELD.

5 Die Anwendung der Theorie der Doppelbelichtung bei der Filmüberblendung

5.1 Die Problematik der Filmüberblendung

Die Herstellung einer Überblendung zweier Filmszenen stützt sich bislang auf praktische Erfahrungen, wobei es wegen der Unkenntnis der verwickelten photographischen Zusammenhänge sehr oft vorkommt, daß Überblendungen wiederholt werden müssen.

Von HAGEMANN [10] wurde ein erster Versuch unternommen, die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Filmüberblendung zu formulieren. Es wurde von ihm erkannt, daß die Überblendung keine einfache Kombination einer Ab- und einer Aufblende sein kann. Die Aufnahmen für die Ab- oder Aufblende einer Szene allein bieten keine besonderen Schwierigkeiten. Unter Berücksichtigung des WEBER-FECHNERSchen Gesetzes muß hierbei die zeitliche Änderung der Intensität nach einer Exponentialfunktion erfolgen [14].

Würde man für die Ab- und die Aufblende die entsprechenden Exponentialfunktionen zusammenfügen, so ergäbe sich bei gleichhellen Szenen eine cosh-Funktion, d. h., die Gesamthelligkeit bzw. die Gesamtschwärzung des resultierenden Überblendungsfilms (kurz „Blende“ genannt) würde ein sogenanntes „Loch“ enthalten.

Für die Überblendung gleichheller Szenen muß aber gefordert werden, daß die Gesamthelligkeit des Überblendungsfilms konstant bleibt. Zu diesem Zweck fügte HAGEMANN einer einfachen exponentiellen Abblende als Aufblende die Differenz zu einer konstanten Lichtmenge hinzu (Abb. 12a). z wird als Zählvariable der Bildfolge eingeführt.

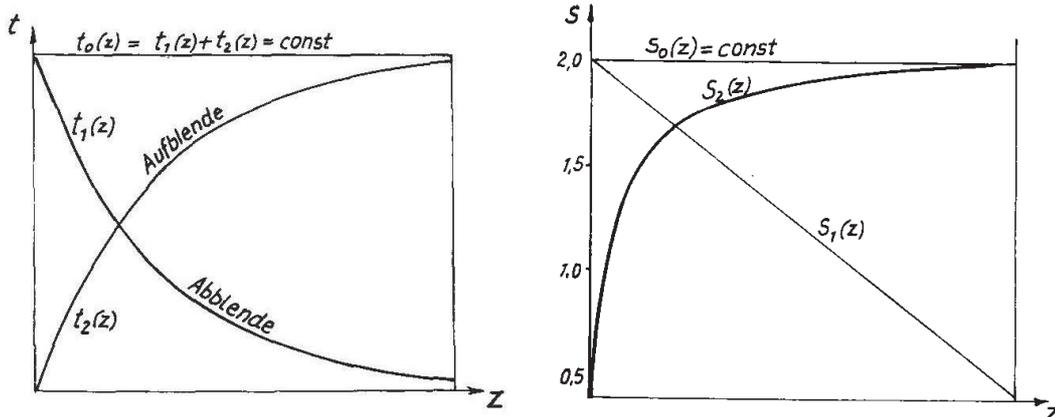


Abb. 12a Überblendungsverlauf der Intensität des Lichtes in Abhängigkeit von der Zeit nach HAGEMANN [10]. (z – Zählvariable der Bildfolge)

Abb. 12b Aus Abb. 12a resultierender Schwärzungsverlauf unter Zugrundelegung einer linearisierten Schwärzungskurve

Einer exponentiellen Abblende wird als Aufblende die Differenz zu einer konstanten Lichtmenge hinzugefügt.

HAGEMANN arbeitete mit Zeitvariation der Belichtungsintensität (Sektorenblende) und berücksichtigte nicht die Abweichungen vom Reziprozitätsgesetz. Die Zeitvariation erfordert für eine zuverlässige Arbeitsweise einen größeren mechanischen Aufwand als die Intensitätsvariation. Man findet in der Praxis vorwiegend die Intensitätsvariation durch Irisblendenverstellung. Es hatte sich aber herausgestellt, daß die empirischen Überblendungen mit Intensitätsvariation im allgemeinen besser gelangen als solche mit Zeitvariation.

Benutzt man für die Intensitätsvariation die Kurven nach Abb. 12a, so ergibt sich trotz konstanter Summe der Lichtmengen der Einzelbelichtungen im Verlauf der Überblendung das gefürchtete „Loch“, das in der Praxis durch feinfühlig empirische Überhöhungen der Kurven ausgeglichen wurde.

Die Überblendung nach Abb. 12a hat aber noch einen Mangel, der besonders deutlich hervortritt, wenn man die Einzelschwärzungen betrachtet, die ja bei jeder Szene wegen der inhomogenen Bildstruktur neben der Durchschnittsschwärzung in Erscheinung treten. Für lineare Schwärzungskurven ist $S \sim \lg(Et)$. Durch logarithmische Auftragung der Funktionswerte des Intensitätsverlaufes gemäß Abb. 12a erhält man die Kurven des Schwärzungsverlaufes in Abb. 12b.

Die Kurven der Einzelschwärzungen $S_1(z)$ und $S_2(z)$ verlaufen nach Abb. 12b völlig unsymmetrisch zueinander. Für die Überblendung gleichheller Szenen ist aber die Möglichkeit einer Zeitspiegelung eine Forderung der Praxis.

Eine Überhöhung der Abblende $S_2(z)$ zur Korrektur des Schwärzungsverlustes infolge der Doppelbelichtung würde die Unsymmetrie der Kurven zueinander noch weiter vergrößern. Bei einer Überhöhung der Intensität der Abblende $S_1(z)$ ginge auch für diese die in Abb. 12b noch erfüllte WEBER-FECHNERSche Beziehung verloren.

Daraus ergab sich als Kompromiß für die Praxis, nur mit linearen Kurven des Intensitätsverlaufes zu überblenden und nach Erfordernis beide an dem Schnittpunkt (Simultanpunkt) bis zu dem experimentell bestimmten „fotearen Punkt“ fP_2 [14] (Abb. 13) in gleichmäßig gerundetem Bogen zu überhöhen.

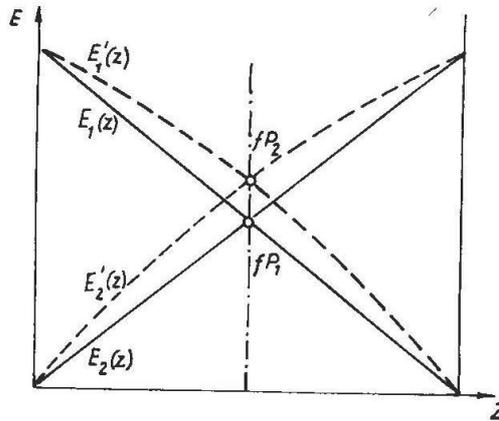


Abb. 13 Überhöhung linearer Überblendungskurven bis zum „fotearen Punkt“ fP_2 zur Ausgleichung der Helligkeitsschwankung in der Mitte der Überblendung

Zur Vermeidung von Belichtungsfehlern infolge der Nichterfüllung des Reziprozitätsgesetzes könnte man auch beide Szenen z.B. mit zwei Projektoren und einem Prismensystem simultan ineinander überblenden. Entsprechende Versuche sind gemacht worden. Bei der Kleinheit der Bilder werden hierbei hohe Anforderungen an die Güte der Prismen gestellt. Man ist aber wieder auf das Doppelbelichtungsverfahren zurückgekommen, weil der technische Aufwand und die Störanfälligkeit bei diesem kleiner sind als bei dem Simultanbelichtungsverfahren.

5.2 Das kritische Helligkeitsverhältnis der zur Überblendung bestimmten Szenen

Es hat sich in der Praxis herausgestellt, daß die Überblendung gleichheller Szenen am kritischsten ist, während der Übergang von einer Tag- zu einer Nachtszene oder umgekehrt weniger Schwierigkeiten bereitet. In diesem Falle läßt man sogar die Intensität der Nachtszene während der ganzen Überblendung unverändert.

Bei der linearen Überblendung zweier gleichheller Szenen (s. Gln. 28, 29) ergibt sich im allgemeinen mit $q > 1$ in der Mitte eine Senke in der resultierenden Schwärzung (Abb. 14a), wie man aus der E_1 - E_2 -Schwärzungsfläche (s. 2.5) entnehmen kann, indem man gleiche Werte von E_1 und E_2 durch eine Gerade verbindet (vergleiche Abb. 9a)

und auf derselben die entsprechenden Schwärzungen mit den dazugehörigen Werten von E_0 abliest.

Es wird bei der Intensitätsüberblendung entsprechend Gl. 18a $t_k = t_0 = \text{const}$ vorausgesetzt.

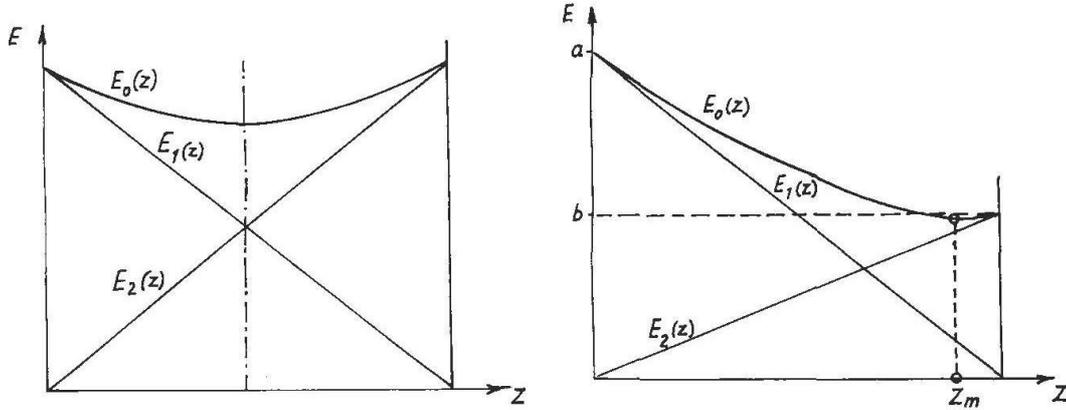


Abb. 14a, b Helligkeitssenke der Gesamthelligkeit bei einer linearen Überblendung gleichheller Szenen (14a) und unterschiedlich heller Szenen (14b)

Die Gesamtintensität E_0 kann auch sehr bequem bei bekanntem SCHWARZSCHILD-Exponenten mit dem unter 5.3 beschriebenen Doppelbelichtungsrechenchieber ermittelt werden.

Zur genaueren Erfassung des Helligkeitsminimums des Überblendungsfilms geht man zweckmäßigerweise von linearen Überblendungskurven aus.

$$E_1 = a(1 - z) \quad (\text{Abblende}) \quad (28)$$

$$E_2 = bz \quad (\text{Aufblende}) \quad (29)$$

a und b sind ein Maß für die Helligkeit der beiden Szenen. Für z wird zur Vereinfachung $0 \leq z \leq 1$ festgelegt.

Nach (18a) ist die Gesamtintensität mit (28) und (29) gegeben durch

$$E_0 = \sqrt[q]{a^q(1 - z)^q + b^q z^q}. \quad (30)$$

Die Lage des Extremums von $E_0(z)$ ergibt sich mit

$$\begin{aligned} & \frac{dE_0}{dz} = 0 \\ \text{zu} & \quad z_m = \frac{1}{1 - \sqrt[p]{\frac{b}{a}} + 1} = \frac{1}{\sqrt[p]{\frac{a}{b}} + 1}. \end{aligned} \quad (31)$$

worin a/b das Helligkeitsverhältnis beider Szenen ist.

Für den Fall gleicher Helligkeiten ist $a/b = 1$ und damit $z_m = 1/2$, liegt also in der Mitte der linearen Überblendung (s. Abb. 14a).

Mit $q = 3/2$, einem bereits relativ großen SCHWARZSCHILD-Exponenten, wird (31) zu

$$z_m = \frac{1}{\left(\frac{b}{a}\right)^3 + 1}. \quad (32)$$

Mit $a/b = 2$ ergibt sich $z_m = 0,889$.

Die dazugehörige Gesamtintensität E_{0m} ist nach (30) $E_{0m} = 0,979b$.

Man sieht, daß der Extremwert schon bei dem nicht großen Helligkeitsverhältnis 2 an den Rand der Überblendungsstrecke rückt und daß E_{0m} nur um etwa 2% unter b , der Helligkeit der dunkleren Szene, liegt (Abb. 14b).

Hier tritt die „Senke“ in der Helligkeit kaum noch in Erscheinung, zumal die Reizschwelle des menschlichen Auges für Helligkeitsunterschiede bei 2% liegt.

Soll die Abweichung von E_{0m} von der Helligkeit der dunkleren Szene 2% nicht überschreiten, so könnte man das kritische Intensitätsverhältnis mit

$$\frac{1}{2} < \frac{a}{b} < 2 \quad (33)$$

begrenzen.

Die Bildstruktur von Filmaufnahmen ist normalerweise aus Flächenelementen unterschiedlicher Schwärzung zusammengesetzt. Die oben erwähnte „Senke“ in der Gesamtintensität E_0 bei dem Beispiel $a/b = 2$ würde beim Überblendungsablauf eines Filmstreifens bei hinreichend großer Bilderzahl kaum wahrgenommen werden, jedoch verlangen Überblendungen von Szenen geringerer Helligkeitsunterschiede unbedingt eine Korrektur. Das gleiche muß selbstverständlich auch für einzelne Bildteile gelten. Die obigen Betrachtungen beziehen sich in erster Linie auf Überblendungen jeweils zweier unterschiedlich, aber gleichmäßig geschwärzter Felder.

Es können mitunter sogar bei Nachtszenen helle Partien, wie Lampenlicht, Feuer, hellerleuchtete Fensterscheiben, auftreten, die mit gleichhellen Partien einer Tagszene zusammentreffen. So wird auch für diesen Fall der Überblendung von Szenen ungleicher Durchschnittshelligkeit eine exakte Überblendungscharakteristik notwendig.

Wegen der Auflösung des Bildes in Flächenelemente, die alle ohne Beeinflussung der Nachbarflächenelemente für sich überblendet werden, erübrigt es sich, mit den Durchschnittsintensitäten zu rechnen.

Der SCHWARZSCHILD-Exponent ist nur für das kritische Helligkeitsverhältnis exakt zu bestimmen, d.h. für aus beiden Szenen zusammentreffende Flächenelemente gleicher Helligkeit. Da aber ein Bild meistens Flächenelemente sehr unterschiedlicher Helligkeit aufweist, die Belichtungen außerhalb des vorgegebenen SCHWARZSCHILD-Bereiches ergeben können (vgl. Abb. 13), stören diese wegen ihres unkritischen Helligkeitsverhältnisses nicht den Gesamteindruck einer Überblendung, was einer effektiven Aufweitung des SCHWARZSCHILD-Bereiches gleichkommt.

5.3 Der Doppelbelichtungsrechenchieber

Da die Berechnung von E_0 nach (18a) umständlich ist und die Aufzeichnung einer E_1 - E_2 -Schwärzungsfläche eines Photomaterials besonders im Hinblick auf eine Auto-

matisierung der Überblendung wenig Eignung besitzt, wurde ein Instrument zur Bestimmung der Gesamtintensität entwickelt, das in seiner Handhabung einem Rechenschieber ähnelt.

Berechnet man nämlich nach (18a)

$$E_2 = \sqrt[q]{E_0^q - E_1^q}$$

bei konstantem E_0 alle Werte für E_2 in Abhängigkeit von E_1 für ein bestimmtes q (z.B. 1,5) und schlägt mit den E_1 -Werten um den einen Endpunkt der Strecke E_0 und mit den E_2 -Werten um den anderen Endpunkt Kreise, so ist der geometrische Ort aller Schnittpunkte in erster Näherung ein Kreisbogen (Abb. 15a). Da alle Peripheriewinkel eines Kreissegments gleich groß sind, ergibt sich die Summenbeziehung der Doppelbelichtung nach (18a) als eine geometrische Addition (Abb. 15a), wobei der Winkel zwischen den Vektoren der Einzelbelichtungen durch den SCHWARZSCHILD-Exponenten mit

$$\varphi = 2 \arcsin 2^{p-1} \quad (34)$$

gegeben ist.

Abb. 15b zeigt, wie sich nach diesem Verfahren ohne weiteres Mehrfachbelichtungen intensitätsmäßig bestimmen lassen.

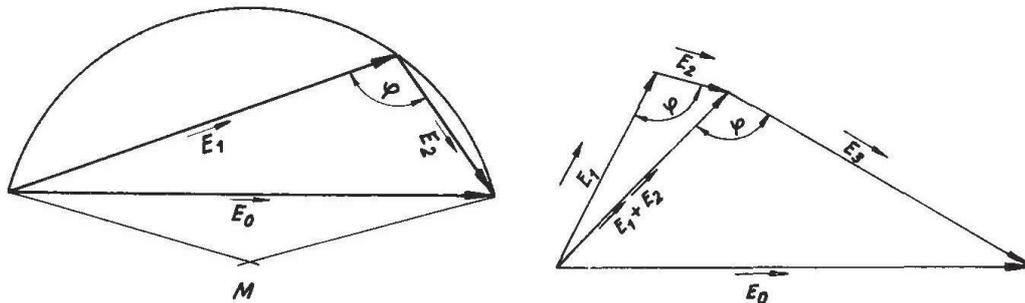


Abb. 15a Die Darstellung der Summenbeziehung der Doppelbelichtung als geometrische Addition

Abb. 15b Die Erfassung einer Mehrfachbelichtung durch eine geometrische Addition (3-fach-Belichtung)

Der hier vorzuschlagende Doppelbelichtungsrechenschieber (Abb. 16) besteht aus zwei im Punkt 0 auf einen bestimmten Winkel φ entsprechend q bzw. p einstellbaren Schenkeln.

Die auf den Punkt 0 bezogene Winkelskala ist nach dem SCHWARZSCHILD-Exponenten q geeicht. Beide Schenkel tragen je eine lineare Skala für E_1 und E_2 . Eine bewegliche Schiene als Sehne, die ebenfalls linear geteilt ist, dient zur Ermittlung der Größe von E_0 . Durch zweckentsprechendes Zurückstellen von E_0 auf E_1 (vgl. Abb. 15b) ist der Rechenschieber auch für Mehrfachbelichtungen zu benutzen.

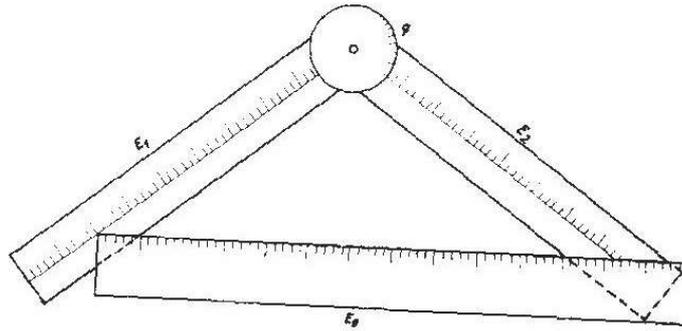


Abb. 16 Der von den Verfassern entwickelte „Doppelbelichtungsrechenschieber“

Der Rechenschieber kann nur für den in der Praxis am häufigsten auftretenden Fall $q \geq 1$ verwendet werden. Umgekehrt kann man, wenn aus der E_1 - E_2 -Schwärzungsfläche ein Wertetripel E_1, E_2, E_0 bekannt ist, mit Hilfe des Rechenschiebers sehr leicht den SCHWARZSCHILD-Exponenten bestimmen.

Für eine festliegende Belichtung im SCHWARZSCHILD-Bereich (wie bei der Tricküberblendung mit vorgegebener Belichtungszeit) ist es allerdings wohl am einfachsten, den SCHWARZSCHILD-Exponenten nach der Methode des Schwärzungskurvenpaares (s. 2.1) zu bestimmen. Für alle vorkommenden Bedingungen der Doppelbelichtung geben aber auch die entsprechenden E_1 - E_2 -Schwärzungsflächen Auskunft über die zu einer gewünschten Schwärzung erforderliche Komplementärbelichtung. Der Materialverbrauch für eine derartige Schwärzungsfläche ist minimal; es wird eine Filmfläche etwa von der Größe eines Filmbildes benötigt (Abb. 9b).

5.4 Der Verlauf der Überblendungskurven

Eine einwandfreie Überblendung muß (s. 5.1) folgende drei Forderungen erfüllen:

1. Der Verlauf der Gesamtschwärzung muß stetig sein und darf keine „Senke“ bzw. kein „Loch“ haben. Für den kritischen Fall zweier gleichheller Szenen muß die Gesamtschwärzung konstant bleiben.
2. Das WEBER-FECHNERSche Gesetz muß bei den Einzelbelichtungen so weit als möglich erfüllt werden, d.h., die absoluten Schwärzungsgeschwindigkeiten

$$v_s = \left| \frac{dS}{dt} \right|$$

für beide Einzelbelichtungen, auch bei Szenen ungleicher Helligkeit, sollen nach Möglichkeit konstant und gleich groß sein.

3. Den ästhetischen Gesichtspunkten gemäß der Forderung 2 wird dadurch Rechnung getragen, daß eine zeitliche Umkehrbarkeit der Überblendung möglich ist, d.h., es darf beim Vorwärts- oder Rückwärtslauf einer Blende nicht zu erkennen sein, welche Szene zuerst belichtet wurde.

Bei gleichhellen Szenen befindet sich der Simultanpunkt in der Mitte der Bilderzahl der Überblendung. Beim Simultanpunkt haben beide Szenen die gleiche Einzelschwärzung.

Es ist nicht möglich, alle genannten Forderungen kompromißlos zu erfüllen. Im folgenden wird ein optimaler Weg zur Erfüllung derselben dargelegt.

Forderung 1 muß als Hauptforderung angesehen werden, da ein Extremum ($dS_0/dz = 0$) im Verlauf der Gesamtschwärzung am meisten bei einer Überblendung stört. Mit Hilfe des Gesetzes der Doppelbelichtung ist Forderung 1 zu erfüllen.

Nach dem WEBER-FECHNERSchen Gesetz muß

$$\frac{dS}{dt} = \text{const} \quad (35)$$

sein.

Forderung 2 ist nur für einen wesentlichen Teil der Einzelschwärzungen zu erfüllen.

Zur Erfüllung von Forderung 3 legt man aus Symmetriegründen bei einer Überblendung gleichheller Szenen den Simultanpunkt in der Mitte der Bilderzahl fest. Zur teilweisen Erfüllung von Forderung 2 gilt Gl. (33) exakt für die Abblende nach dem Simultanpunkt und mit umgekehrten Vorzeichen für die Aufblende vor dem Simultanpunkt. Der Rest des Kurvenverlaufs der Intensitäten ergibt sich nach Forderung 1 zwangsläufig als Komplementärbelichtung.

Hierdurch erhält der gesamte Kurvenverlauf des Überganges von einer Szene zur anderen eine sigmoide Form in der Gestalt des GAUßschen Fehlerintegrals, welches aber im ansteigenden Teil nur annähernd die Forderung 2 erfüllt. Es ist daher besser – wie hier vorgeschlagen – die Übergangskurve nach der dem WEBER-FECHNERSchen Gesetz entsprechenden Exponentialfunktion zu konstruieren. Zur graphischen Darstellung des Kurvenverlaufes empfiehlt es sich, die Zeit t als ein Vielfaches der der Belichtungszeit Δt eines Einzelbildes mit dem Zähler z auszudrücken: $t = z \cdot \Delta t$.

Bei Szenen gleicher Helligkeit mit $q = 1$ oder bei Zeitvariation mit beliebigem q ergeben sich die in Abb. 17a ausgezogenen Kurven für den Intensitätsverlauf.

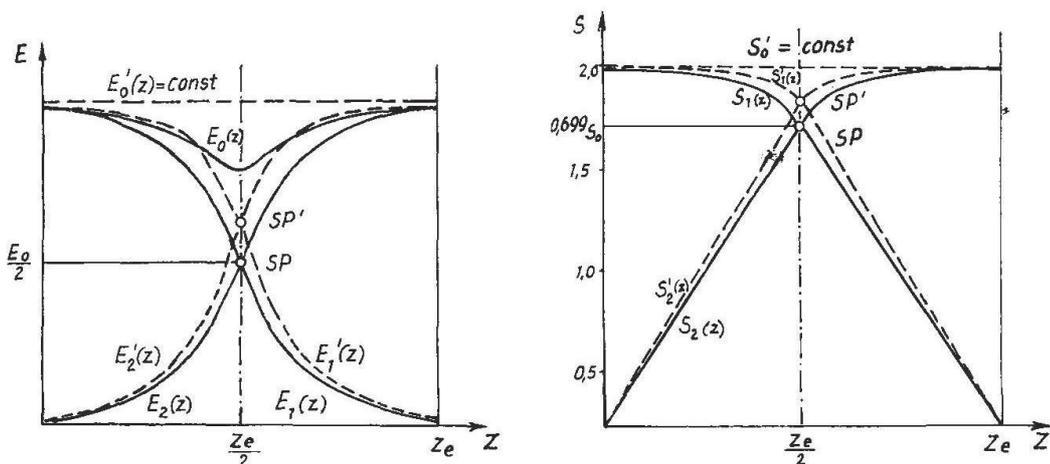


Abb. 17a,b Prinzipieller Verlauf der Überblendungskurven unter Berücksichtigung der an eine Überblendung zu stellenden Forderungen (ausgezogene Kurven).

Infolge des SCHWARZSCHILD-Effektes ergibt sich die „Senke“ von $E_0(z)$.

Die gestrichelten Kurven berücksichtigen die bei Intensitätsüberblendung auf Grund des SCHWARZSCHILD-Effektes notwendige Intensitätsüberhöhung.

- a) Intensität in Abhängigkeit von der Zeit
- b) Aus Abb. 17a resultierender Schwärzungsverlauf unter Zugrundelegung einer linearen Schwärzungskurve

Unterhalb des Simultanpunktes SP verlaufen beide Kurven spiegelsymmetrisch nach der gleichen Exponentialfunktion. Den zugehörigen Kurvenverlauf der Einzelschwärzungen $S_1(z)$ und $S_2(z)$ der Intensitäten $E_1(z)$ und $E_2(z)$ zeigt Abb. 17b.

Die Kurven $S_1(z)$ und $S_2(z)$ weichen oberhalb des Simultanpunktes von Gl. (33) ab. Diese Abweichungen sind aber bei einem Filmbild von Szene 1 und Szene 2 nicht wahrzunehmen, weil das Aufblenden der Szene 2 bis zum Simultanpunkt SP und von da ab das Abblenden der Szene 1 nach dem Simultanpunkt SP den Überblendungscharakter bestimmen.

Ist $q > 1$, dann verlagert sich der Simultanpunkt SP in Abb. 17a und 17b weiter nach oben (SP'), womit der geradlinige Anteil des Kurvenverlaufes der Einzelschwärzungen unterhalb des Simultanpunktes SP' in Abb. 17b sich verlängert (gestrichelte Kurve). Damit ist die Forderung 2 noch besser erfüllt.

Ein instruktiver Versuch einer Überblendung wurde mit zwei gleichen sich teilweise überlappenden Graufeldern S_1 und S_2 (Abb. 18) auf einem fortlaufenden Filmstreifen vorgenommen, wobei die Intensitätskurven mit dem Doppelbelichtungsrechen-schieber korrigiert wurden unter Berücksichtigung des SCHWARZSCHILD-Exponenten des verwendeten Filmmaterials. (Vergleiche gestrichelte Kurven in Abb. 17a). Die Gesamtschwärzung S_0 blieb während des ganzen Überblendungsverlaufes konstant.

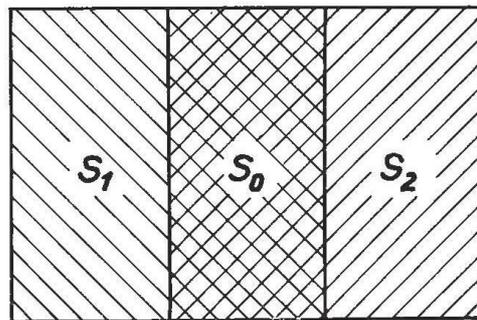


Abb. 18 Aufteilung des Bildfeldes in drei Teile für eine Probeüberblendung.
Im Mittelfeld (S_0) überlappen sich Bildfeld S_1 der verschwindenden Szene und Bildfeld S_2 der auftauchenden Szene

Ein Überblendungsversuch mit unterschiedlich hellen Szenen bei Anwendung der gleichen Überblendungskurven bestätigte auch hier die Richtigkeit der in dieser Arbeit dargelegten Überlegungen. Durch die SCHWARZSCHILD-Korrektur wird diese unkritische Überblendung verbessert (s. 5.2).

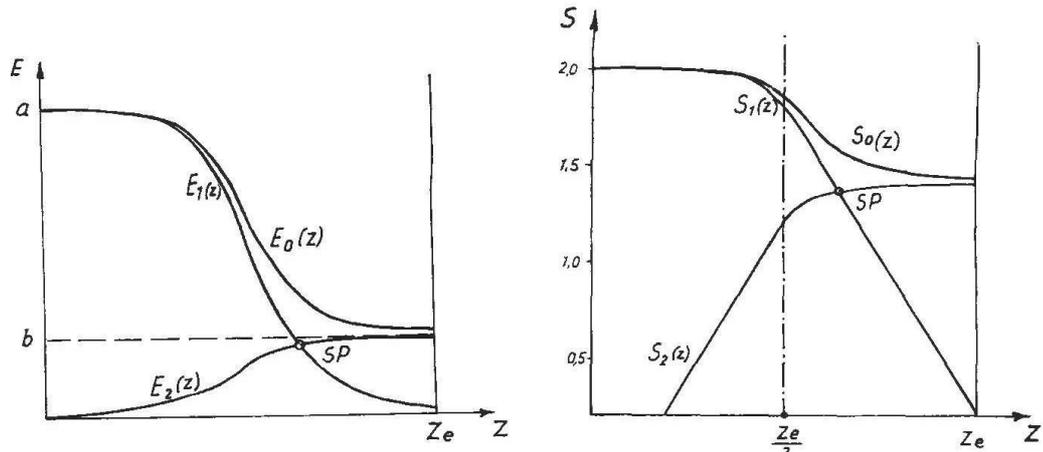


Abb. 19a,b SCHWARZSCHILD-korrigierter Überblendungsverlauf ungleich heller Szenen

a) Intensitätsverlauf

b) Schwärzungsverlauf unter Zugrundelegung einer linearisierten Schwärzungskurve

Die Kurven der Einzelschwärzungen haben gleiche zueinander symmetrische Form, die Kurve der dunkleren Szene ist aber parallel nach unten verschoben (Abb. 19b). Abb. 19a zeigt den zu Abb. 19b gehörigen Verlauf der Intensitäten.

Man erkennt weiterhin aus Abb. 19b, daß das eigentliche Überblendungsgeschehen (merkliches Verschwinden der hellen Szene) erst beginnt, wenn die dunkle Szene schon fast voll da ist. Damit erhält die unter 5.1 erwähnte Methode, die dunkle Szene während der ganzen Überblendung voll wirken zu lassen, eine gewisse Berechtigung, setzt aber voraus, daß bei der dunklen Szene keine hellen Flächenelemente vorkommen.

Am günstigsten ist es auf jeden Fall, auch bei ungleich hellen Szenen den vorgeschlagenen Kurvenverlauf bei der Überblendung einzuhalten.

Selbst für die einfache Auf- und Abblende lassen sich die hier entwickelten Überblendungskurven verwenden. Hierbei ergibt sich oberhalb des Wendepunktes der Kurve ein „weicherer“ Einmünden in die endgültige Helligkeit bzw. ein „weicherer“ Beginn des Abfalls der Helligkeit als bei Verwendung von Exponentialkurven nach HAGEMANN [10]. Für einen deutlicheren Beginn des Abfalls bzw. des Aufhörens des Anstieges der Helligkeit einer Szene sind Kurvenausschnitte zu verwenden.

Von besonderem Interesse ist das Ergebnis, daß die hier entwickelten Überblendungskurven für alle in Frage kommenden Arten von Blenden anzuwenden sind.

Eine Überblendungsmaschine (z. B. Trickapparatur), die durch diese Kurven gesteuert wird, führt automatisch alle Überblendungen, Ab- und Aufblendungen von Filmszenen richtig durch.

Es wurden von den Verfassern auch Versuche mit ORWOColor-Film durchgeführt und dabei festgestellt, daß für ihn grundsätzlich die gleichen Überblendungsgesetzmäßigkeiten gelten wie für den Schwarz-Weiß-Film. Allerdings setzt sich der SCHWARZSCHILD-Exponent der Mischfarben aus den Exponenten der Grundfarben zusammen (etwa arithmetisches Mittel), so daß bei Überblendungen auch der Farbcharakter der Szenen zu berücksichtigen ist.

Die Intensitätsvariation kann mit Blenden oder Graukeilen durchgeführt werden. Mit Hilfe von zwei Graukeilen, die wegen der gleichmäßigen Ausleuchtung des Bildfeldes gegeneinander bewegt werden müssen und die einen Kurvenverlauf der Intensität des hindurchgelassenen Lichtes entsprechend Abb. 17a besitzen, ist es möglich, ein einfaches Überblendungsgerät zu schaffen, das schon bei der Aufnahme verwendet werden kann und das sicher dem Schmalfilmamateur nützlich sein wird [11, 18]. Ein ähnliches Zusatzgerät, das vor oder hinter dem Objektiv angebracht werden kann, ist bereits von der Firma *Kinotechnique* zum Zwecke der automatischen Belichtungsregelung für Filmkameras entwickelt worden [22]. Die SCHWARZSCHILD-Korrektur kann man in erster Annäherung durch eine gegenseitige Verschiebung der Kurven, die beim Rücklauf des Keilsystems eingestellt wird, erreichen.

Nach den vorangegangenen Darlegungen können Vorrichtungen entwickelt werden, mit denen sowohl von Hand als auch vollautomatisch Ab- und Aufblendungen, Überblendungen und Simultanblenden bei Kinefilmen in photographisch korrekter Weise hergestellt werden können.

Literatur

- [1] ARENS, H., AGFA-Veröffentlichungen 1 (1930) 11
- [2] ARENS, H., AGFA-Veröffentlichungen 4 (1935) 15
- [3] ARENS, H., Ztschr. wiss. Phot. 44 (1949) 44, 51, 172
- [4] BERGHAUS, H., AGFA-Veröff. Leverkusen München 2 (1958) 198
- [5] BRÜNNER, R., OBERTH. A., SCHEIBE, G., Ztschr. wiss. Phot. 50 I (1955) 283
- [6] BURTON, P. C., BERG, W. F., Referat von ARENS, H. Ztschr. wiss. Phot. 44 (1949) 228
- [7] EGGERS, J., FRIESER, H., Ztschr. wiss. Phot. 50 II (1955) 405
- [8] EGGERS, J., AGFA-Veröff. Leverkusen München 2 (1958) 205
- [9] FRIESER, H., EGGERS, J., AGFA-Veröff. Leverkusen München 1 (1955) 76
- [10] HAGEMANN, W., Bild und Ton 6 (1952) 171
- [11] HEGE, W., Bild und Ton 8 (1948) 233
- [12] KLÖTZER, F., Ztschr. wiss. Phot. 50 II (1955) 386
- [13] VAN KREVELD, A., Ztschr. wiss. Phot. 32 (1934) 222
- [14] KRÖBER, K., Patentanmeldung WP 57 a/76096
- [15] LAU, E., KRUG, W., Die Äquidensitometrie: Akademieverlag Berlin 1957
- [16] MAIDORN, G., Bild und Ton 5 (1951) 159

- [17] MELCHER, H., WEDEL, K., GERTH, E., SENF, W., Wiss. Ztschr. PHP. 2 (1960) 177,
Praxis der Naturwiss. (1961) 10 (1961) 24-28, 50-54, 81-83, Heft 1-3
- [18] SBRZENY, P., Bild und Ton 5 (1958) 133
- [19] SCHULZ, G., Feingerätetechnik 2 (1953) 167
- [20] WEIGERT, F., LUTHER, B., GOLDBERG, E., Ztschr. wiss. Phot. 6 (1911) 323
- [21] WERNER, H., Anwendung von Bildtransformationsverfahren
zur Verbesserung der Messung der Linienlage bei Debye-Scherrer-Aufnahmen (Diplomarbeit)
Berlin, 1962
- [22] SOULÉ, C., Kinotechnik 6 (1963) 171

Sensitometry of double exposures in application to film crossfading

KLAUS KRÖBER and EWALD GERTH

Abstract

Crossfading is in filmmaking a frequently used method to transit from one scene to another one very smoothly with a subtle change – that means: without jumps, dips and bumps of the total brightness of the overlapping images of the fading-out and the fading-in images. The transition is performed by double exposures, which can be made simultaneously or successively. In praxis the successive dissolve is preferred, because it needs only one technical equipment for the shots. Using for the dissolve process photographic material, then the SCHWARZSCHILD-effect must not be neglected, due to which the common copy of the overlapping scenes shows in the middle – dependent on the structure of the images – a more or less noticeable dip in brightness.

The referred article with the investigation of double exposures on photographic material is related to a method developed by LAU and KRUG using equidensites. It is shown how by means of exposures through gray wedges equidensitometric characteristic curves and density areas the influence of the SCHWARZSCHILD-effect can be demonstrated, determining moreover the SCHWARZSCHILD-exponent $p = 1/q$ of any photo-layers. On the base of SCHWARZSCHILD's famous blackening law $E \cdot t^p = \text{const}$ (E intensity of light, t exposure time) the law of the double exposure is derived:

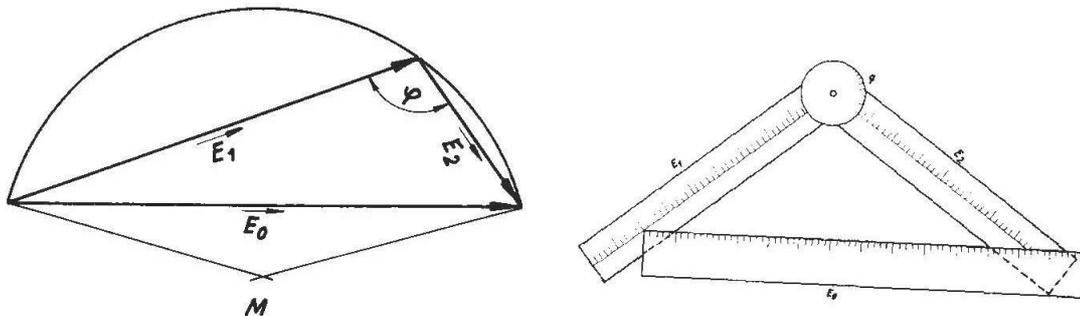
$$E_1^q t_1 + E_2^q t_2 = E_0^q t_0 = \text{const}$$

(The indices 1 and 2 mark the exposures; index 0 is the total exposure.)

In case of equal exposure times $t_1 = t_2 = t_0$ (as valid for the single images of the dissolved shots) we have a formula, which resembles that of PYTHAGORAS:

$$E_1^q + E_2^q = E_0^q = \text{const}$$

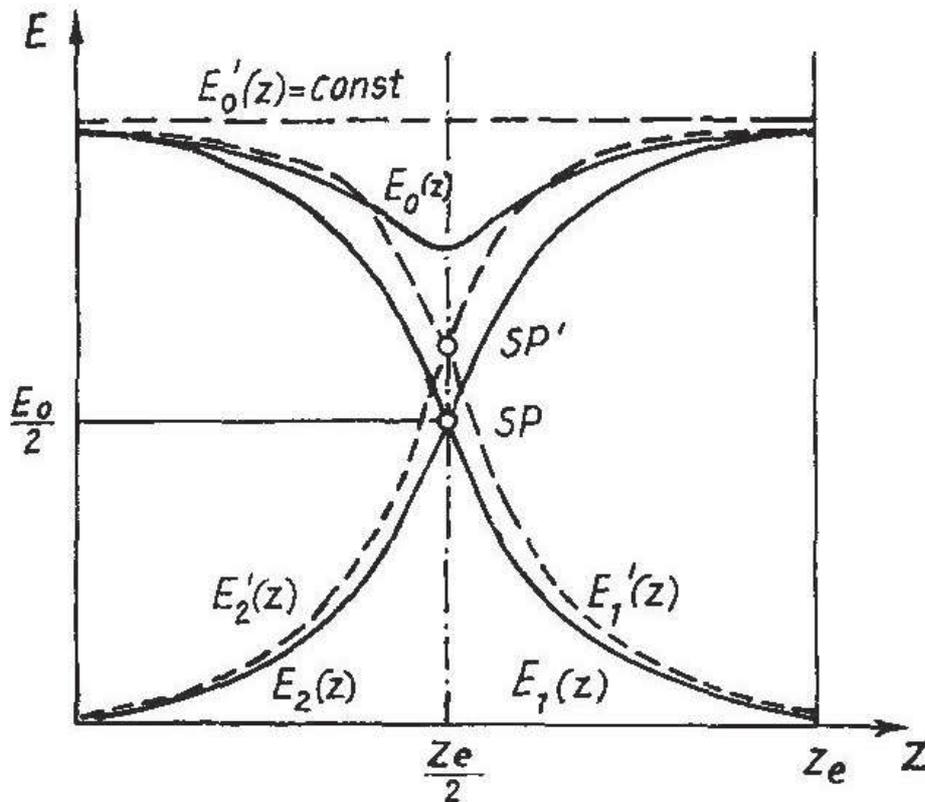
Since the SCHWARZSCHILD-exponent q has the limited range $1 < q < 2$ we can expect a similar geometrical construction like the rectangular triangle of PYTHAGORAS – only with an amplified angle φ , which is responsible for the SCHWARZSCHILD-effect:



This geometrical relation gave the incentive for the construction of a “double-exposure slide-rule”, which can be used for quick evaluation of the exposure data but also for the mechanic steering of an “exposure equipment”:

For simultaneous (photographic) double exposures and for (electronic) video dissolves no correction accounting for the SCHWARZSCHILD-effect is necessary.

But in all cases of dissolves the transition run has to obey the sensory-physiological law of WEBER and FECHNER, according to which the decreasing intensity $E_1(z)$ of the fade-in scene progresses in time $t = z \cdot \Delta t$ (Δt exposure time of a single picture, z running number of pictures) with $\frac{\Delta E}{E} = \Delta t \cdot \text{const}$ by an exponential function down from the point SP, whereas the intensity $E_2(z)$ of the fade-out scene increases up to the point SP exponentially, respectively.



The rest of both intensity curves is the complement to the whole intensity – leading to mirror-symmetrical sigmoid curves (solid lines). The efficiency of the double exposure is reduced by the SCHWARZSCHILD-effect with a dip in the middle part of the resulting curve to $E_0(z)$. The SCHWARZSCHILD-correction is achieved by the banked intensities $E'_1(z)$ and $E'_2(z)$ (dashed lines).

The transition run holds also for scenes with unequal intensities and diminishing perceptibility of the deviations due to the SCHWARZSCHILD-effect from the middle to the beginning and to the end of the crossfading. Thus, the same cross-fading procedure can be applied for all dissolves – photographic and electronic ones – the last running only by the SCHWARZSCHILD-exponent $p = q = 1$.

Article available in German by the web-address: www.ewald-gerth.de/10.pdf