

Thema: Eine einfache Methode der Sensitometrie mit Hilfe der Äquidensiten und ihre Anwendung insbesondere für Probleme der Doppelbelichtung

Magnifizenz, Spektabilität, verehrte Herren Professoren, meine Damen und Herren!

Die im folgenden zu behandelnde Untersuchung der bei Doppelbelichtungen photographischer Schichten auftretenden Erscheinungen ist praktischen Bedürfnissen entsprungen.

Insbesondere erforderte die Problematik der in der Filmtechnik viel angewendeten Überblendungsverfahren eine grundlegende Klärung der sensitometrischen Zusammenhänge bei Doppelbelichtungen – und dies sowohl in experimenteller als auch in theoretischer Hinsicht.

Es war eine Hauptaufgabe der Dissertation, bei den experimentellen Untersuchungen das von LAU und KRUG entwickelte Verfahren der „Äquidensitometrie“ generell zu verwenden und damit seine Eignung sowie vorteilhafte Anwendung für alle sensitometrischen Messungen unter Beweis zu stellen. Die zu untersuchenden Photomaterialien waren vornehmlich Photopapiere, die eine breite Eigenschaftenstreuung aufweisen.

Die Aufgabe der Sensitometrie ist bekanntlich die meßtechnische Erfassung des funktionalen Zusammenhanges zwischen der Belichtung und der daraus resultierenden Schwärzung bei einer photographischen Schicht.

Die Größen der Belichtung – Intensität E und Zeit t – bedürfen wegen ihrer exakten Definition hier keiner weiteren Erörterung; dagegen ist es notwendig, zunächst zu untersuchen, ob die konventionelle, auf photometrischen Messungen beruhende Definition der Schwärzung als der dekadische Logarithmus des Quotienten der Intensität des in die Schicht eintretenden Lichtes E_0 und der Intensität des die Schicht durchsetzenden Lichtes E

$$S = \lg \frac{E_0}{E} \quad (1)$$

für äquidensitometrische Schwärzungsmessungen brauchbar ist; denn nach (1) wird die Schwärzung über den Umweg eines Verhältnisses zweier Intensitäten gemessen.

Die Äquidensitometrie gestattet dagegen die Messung der Schwärzung mit einer adäquaten Größe, nämlich einer Schwärzungsskala in Gestalt eines Graukeils.

Eine der Natur der Schwärzung angemessene Definition setzt die Schwärzung S proportional der Zahl N der absorbierenden Zentren pro Flächeneinheit der Schicht, so daß

$$S = aN \quad (2)$$

gilt.

Betrachtet man die Schwächung der Intensität des Lichtes in differentiellen Schichtdicken, so gelangt man durch Integration der Differentialgleichung mit b als Proportionalitätsfaktor

$$-dE = bE dx \quad (3)$$

wieder auf die konventionelle Definitionsgleichung der Schwärzung.

¹Die maschinengeschriebene Ausarbeitung des Verteidigungsvortrages wurde im Jahre 2010 digitalisiert und in der vorliegenden Schrift wortgetreu wiedergegeben. Ein Kommentar befindet sich auf Seite 24.

Die beiden Gleichungen (1) und (2) sind ineinander überföhrbar und daher grundsätzlich äquivalent. Dennoch sagt Gl. (2) mehr aus als Gl. (1), da sie kein „Pauschalverhalten“ der Schicht beschreibt, sondern von den Absorptions- und Streueigenschaften der Pigmente ausgeht.

Zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors a denkt man sich die Schicht in Zellen von der Größe der mittleren Projektionsfläche \bar{f} der Körner (wabenartig) aufgeteilt.

Mit der mittleren Zellenbesetzungszahl

$$\bar{z} = N\bar{f} \quad (4)$$

ergibt sich aus der POISSONSchen Verteilungsfunktion

$$W(z) = \frac{\bar{z}^z}{z!} e^{-\bar{z}} \quad (5)$$

für die freibleibenden Zellen die Wahrscheinlichkeit

$$W(0) = e^{-\bar{z}} \quad (6)$$

und damit nach (1) die Schwärzung

$$S = \lg \frac{1}{e^{-\bar{z}}} = \bar{z} \lg e = N\bar{f} \lg e. \quad (7)$$

Dies ist die (hier anders und allgemeiner hergeleitete) NUTTINGSche Schwärzungsformel, die mit der Definitionsgleichung (2) übereinstimmt.

Gl. (2) bzw. (7) wird als Grundlage für die äquidensitometrische Schwärzungsmessung genommen.

In der linearen Abhängigkeit zwischen S und N kommt die bekannte additive Eigenschaft der Schwärzungen mehrerer überlagerter Schichten zum Ausdruck.

Die Schwärzung bezieht sich hiernach auf die Angabe der Pigmentdichte und mittleren Projektionsfläche der Schicht. Sie ist damit eine von den zufälligen geometrischen Meßbedingungen unabhängige Größe der Schicht.

Im Gegensatz zur photometrischen Schwärzungsmessung zeichnet sich die äquidensitometrische durch definierte Meßbedingungen aus. In Anlehnung an die „doppeldiffuse“ Normalschwärzung (einzig exakt definierte photometrische Schwärzungsmessung mit zwei ULBRICHT-Kugeln) führt sie zu stets vergleichbaren und reproduzierbaren Meßergebnissen.

Die äquidensitometrische Schwärzungsmessung wäre aber nicht in sich selbständig, wenn man zur Gewinnung eines Schwärzungsnormals auf photometrische Messungen Bezug nehmen müßte.

Die äquidensitometrische Eichung eines Graukeils als Schwärzungsskala ist ohne Kenntnis der Intensität und Zeit des zur Belichtung verwendeten Lichtes möglich, und zwar – mit Hilfe von Doppelbelichtungen.

Bekanntlich rückt die Schwärzungsbegrenzung auf einem durch einen Graukeil belichteten Photogramm um so weiter in Richtung größerer Schwärzungen des Graukeils vor, je größer die Lichtmenge ist.

Der Äquidensitenabstand der n -ten Belichtung ist gegeben durch

$$S_n = \lg \frac{E_0}{E_n} = a_n D_E. \quad (8)$$

Bei einer simultanen Doppelbelichtung erhält man die Gesamtintensität durch Überlagerung der Intensitäten der Einzelbelichtungen,

$$E_1 + E_2 = E_0, \quad (9)$$

also mit Gl. (8)

$$10^{-a_1} D_E + 10^{-a_2} D_E = 1. \quad (10)$$

Bei gleichen Einzelbelichtungen

$$a_1 = a_2 = a \quad (11)$$

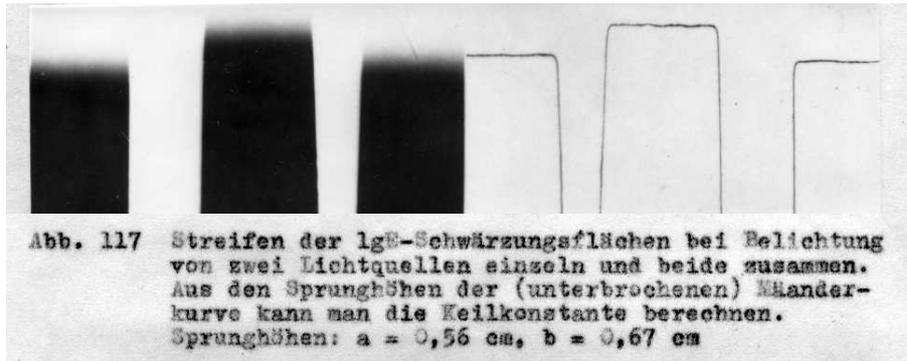
ergibt sich mit

$$2 \cdot 10^{-a} D_E \quad (12)$$

und somit

$$D_E = \frac{\lg 2}{a} \quad (13)$$

Abb. 117 zeigt eine äquidensitometrische Aufnahme² zur Bestimmung der Graukeilkonstante D_E mit zwei verschiedenen Einzelbelichtungen (verschiedene Lampen). Auch damit läßt sich die Keilkonstante aus der Bestimmungsgleichung (10) ermitteln.



Durch eine sukzessive Doppelbelichtung erhält man anstatt Gl. (13)

$$q D_E = \frac{\lg 2}{a}, \quad (14)$$

d.h., der hierbei auftretende SCHWARZSCHILD-Effekt wirkt sich bei einem (üblichen) SCHWARZSCHILD-Exponenten $q > 1$ wie eine scheinbare Vergrößerung der Keilkonstante D_E aus.

Im Hinblick auf eine klare und dem Untersuchungsgegenstand angemessene Terminologie war es erforderlich, weitere überkommene sensitometrische Grundbegriffe einer Kritik zu unterziehen und zum Teil neu zu definieren.

²Die Nummern der Abbildungen beziehen sich auf die Numerierung in der Dissertation. Bilder (auf die Seite geklebte Original-Photogramme) und Bildunterschriften werden aus dem beim Verfasser noch vorhandenen Original (Kohlebogen-Durchschlag) entnommen. Die Qualität von Bildern und Schrift entspricht nicht mehr heutigen (Jahr 2010) Maßstäben, ist aber den Möglichkeiten der 1960-er Jahre geschuldet. Das Durchkopieren der Photoschichten bedingt zudem eine starke Streuung der Äquidensiten. Siehe Kommentar auf Seite 23 !

Der Kürze halber wird hier auf eine Darlegung der Kritik verzichtet, und es werden nur einige für die folgenden Ausführungen wichtige Begriffe tabellarisch zusammengestellt und an Hand eines Beispiels erläutert.

Photogramm	Äquidensitogramm
Schwärzungspunkt	Schwärzungsstrecke
Schwärzungslinie	Schwärzungskurve
Schwärzungsfläche (Schwärzungsraum)	Schwärzungsrelief (Raumflächenäquidensiten)

Die Definitionen des „Schwärzungspunktes“ und der „Schwärzungslinie“ sind natürlich nur mit einer gewissen endlichen Umgebung sinnvoll, in der sie Mittelwerte darstellen. Die räumliche Darstellung der Schwärzung hat nur bei der Beschreibung der örtlichen Korn-dichte in voluminösen Emulsionspackungen praktische Bedeutung, wie sie beispielsweise bei Kernspurplatten zur Untersuchung der Wegspuren nuklearer Zerfälle auftreten.

Es ist zweckmäßig, die Koordinatenachsen zur Bezeichnung der variierten Parameter zu verwenden, womit eine unzweideutige Kennzeichnung erreicht wird, z.B. $\lg E_1$ - $\lg E_2$ -Schwärzungsfläche, $\lg E$ -Schwärzungskurve, $\lg E_1$ - $\lg E_2$ -Äquidensitogramm. Das $\lg E_1$ - $\lg E_2$ -Schwärzungsrelief läßt sich modellmäßig bzw. stereoskopisch darstellen.

Bei der Untersuchung des Photomaterials bezüglich seiner sensitometrischen Eigenschaften mit Hilfe von Graukeilen erhält man im allgemeinen zunächst Schwärzungsflächen, die das Versuchsergebnis dokumentarisch festhalten. Man könnte nun die Schwärzungsflächen photometrisch analysieren und auf diese Weise Schwärzungskurven und Äquidensitogramme gewinnen³. Die photometrische Aufnahme von Schwärzungsflächen ist im allgemeinen sehr mühselig. Zur Zeichnung von Abb. 157 wurden etwa 150 Meßwerte benötigt.

Bei der Analyse von Schwärzungsflächen erweist sich die Äquidensitometrie als besonders vorteilhaft. Die Umwandlung einer Linie gleicher Schwärzung in eine vom Untergrund sich abhebende Kurve mit photographischen Hilfsmitteln wird als „Äquidensitentransformation“ bezeichnet.

Zur *Äquidensitentransformation* eignen sich grundsätzlich alle photographischen *Extremwert-Effekte*.

Bisher wurde hierzu fast ausschließlich der SABATTIER-Effekt angewendet.

Solarisationsäquidensiten wurden erstmals von WERNER angegeben. In der hier zu besprechenden Arbeit wurde auch der CLAYDEN-Effekt auf seine Eignung für Äquidensitentransformationen untersucht. Die Vorzüge der einzelnen Äquidensitenarten sollen nachher an Hand einiger Beispiele demonstriert werden.

Es sei noch erwähnt, daß auch die Theorie der Streulichtäquidensiten in der Dissertation erweitert wurde. SCHULZ hatte gefunden, daß das Maximum der Intensität des Streulichtes bei der Schwärzung

$$S_m = 0,58 \pm 0,08 \quad (15)$$

liegt.

³Anmerkung des Verfassers im Jahre 2010:

Zur Zeit der Abfassung der Dissertation, also in den Jahren 1962-1964, waren bereits erste technische Verfahren zur zeilenweisen photometrischen Abtastung von Photogrammen bekannt, die aber dem Verfasser nicht zur Verfügung standen. In der heutigen Zeit (2010) würde bereits ein mit einem Computer verbundener Scanner diese Aufgabe mit hoher Qualität erfüllen. Es war aber die Aufgabenstellung des Kandidaten, die generelle Anwendbarkeit der Äquidensitometrie für die flächenhafte Schwärzungsmessung unter Beweis zu stellen.

Faßt man gemäß der eingangs erwähnten Definition der Schwärzung, die sich auch auf den CALLIER-Effekt anwenden läßt, die resultierende Intensität als Differenz zwischen diffusem und gestrahltem Licht auf, so erhält man (vereinfacht)

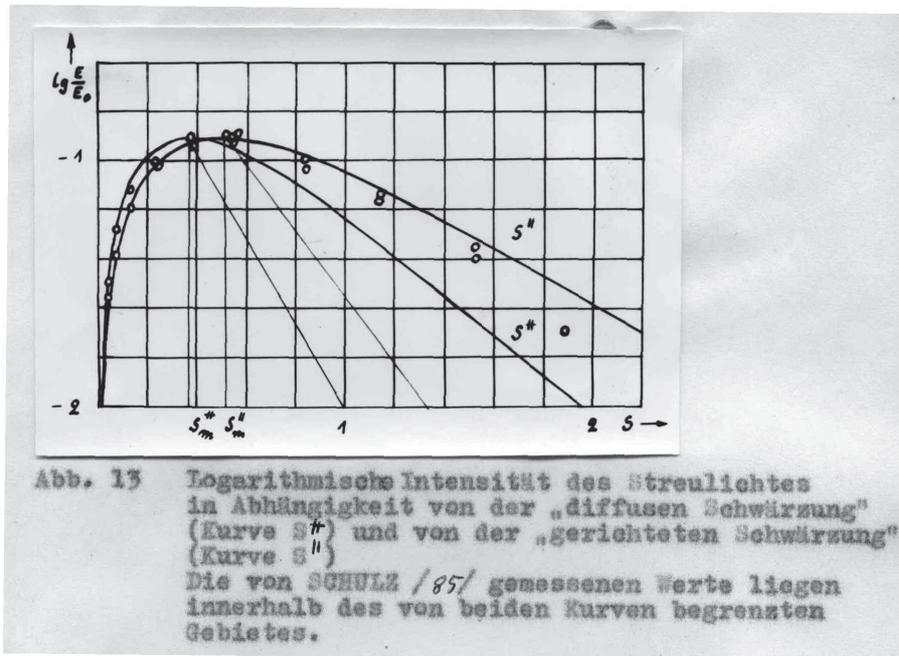
$$\lg \frac{E}{E_0} = \lg(10^{-S^\#} - 10^{-S^\parallel}) + F(\Omega). \quad (16)$$

$S^\#$ ist die bei diffusem Licht und S^\parallel die bei parallelem Licht gemessene Schwärzung. Ω ist der Raumwinkel der Streuung des Lichtes nach Durchgang durch die Schicht.

Berechnet man den Extremwert von (16), so erhält man für eine gegen Null strebende Korngröße

$$\lim_{\bar{r} \rightarrow 0} S_m = \lg e. \quad (17)$$

Abb. 13 zeigt Gl. (15) in graphischer Darstellung, und zwar $\lg \frac{E}{E_0}$ in Abhängigkeit von $S^\#$ und S^\parallel . Die Meßwerte von SCHULZ liegen in dem von beiden Kurven begrenzten Gebiet. Es handelt sich bei dieser Messung also gewissermaßen um eine „halbdiffuse“ Schwärzung.

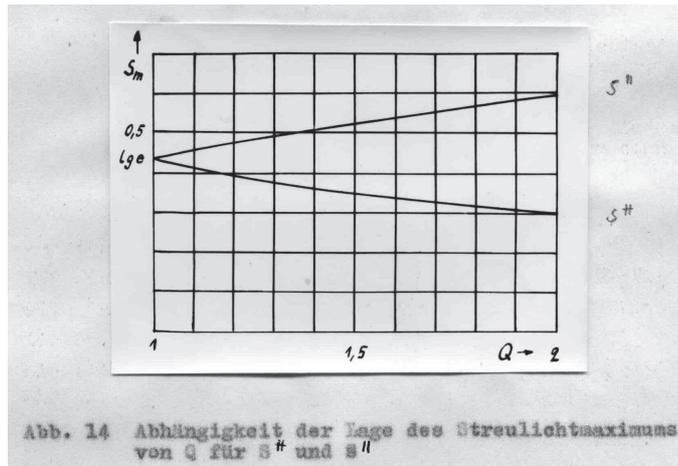


Die Streulichtäquidensität⁴ kennzeichnet somit eine definierte Schwärzung des Photogramms.

Abb. 14 gibt die Abhängigkeit der gestrahlten (oben) und der diffusen Schwärzung (unten) vom CALLIER-Quotienten wieder:

$$Q = \frac{S^\parallel}{S^\#} \quad (18)$$

⁴Die Untersuchung der Streulichtäquidensiten, welche von LAU und KRUG in ihrem Buch mit dem Titel „Die Äquidensitometrie“ beschrieben sind, gehörte zu den Aufgaben der Dissertation. Ihre Anwendung erfordert eine spezielle optische Geräteeinrichtung. Vom Verfasser aber wurde zur Darstellung von Äquidensiten konsequent nur das auf dem SABATTIER-Effekt beruhende äquidensitometrische Verfahren angewendet.

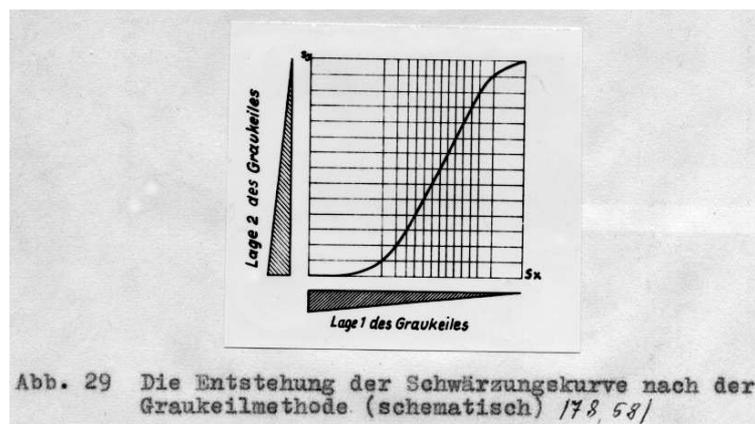


Gestrahlte Schwärzung und diffuse Schwärzung markieren die Grenzen der Schwärzungsmessung, die immer von den Meßbedingungen abhängt. Bei der äquidensitometrischen Schwärzungsmessung entscheidet der Schichtträger über die Art der Schwärzung. So bewirken klar-sichtige Schichtträger – Glas oder Film – überwiegend gestrahlte Schwärzung; ist Papier der Schichtträger, so ist die Schwärzung durch die Lichtstreuung im Papier weitgehend diffus. Beim Kopieren kann man sogar durch Auflegen einer Opalglasplatte die diffuse Schwärzungsmessung „erzwingen“. In jedem Falle aber liefert der *Graukeil* unter den gegebenen Meßbedingungen die *Maßskala für die Schwärzung*.

Äquidensitometrisch erzeugte Schwärzungskurven:

Die Analyse einparametrischer Schwärzungsflächen (das sind Photogramme, die durch Belichtung durch einen Graukeil gewonnen wurden) geschieht nach der von LUTHER, GOLDBERG und WEIGERT angegebenen Graukeilmethode, die hier durch die Äquidensitometrie erweitert wurde.

Durch Überdecken der einparametrischen Schwärzungsfläche mit dem schon zu ihrer Erzeugung verwendeten Graukeil erhält man bei einer gegenseitigen Koordinatenverdrehung um 90° ein Abbild der Schwärzungskurve als Äquidensite (Abb. 29).



Folgende Beispiele sollen andeuten, daß mit dieser Methode alle sensitometrischen Meßaufgaben in einfacher und zuverlässiger Weise gelöst werden können.

Von einer Eichung mit einer Bezugsintensität soll hier abgesehen werden. Ist eine solche Bezugsintensität bekannt, so kann man alle Wertepaare der Schwärzungsfunktion mit Hilfe eines Koordinatensystems aus der Schwärzungskurve entnehmen.

Beispiele⁵ zur Demonstration des Verfahrens:

Abb. 34/35 Temperaturabhängigkeit

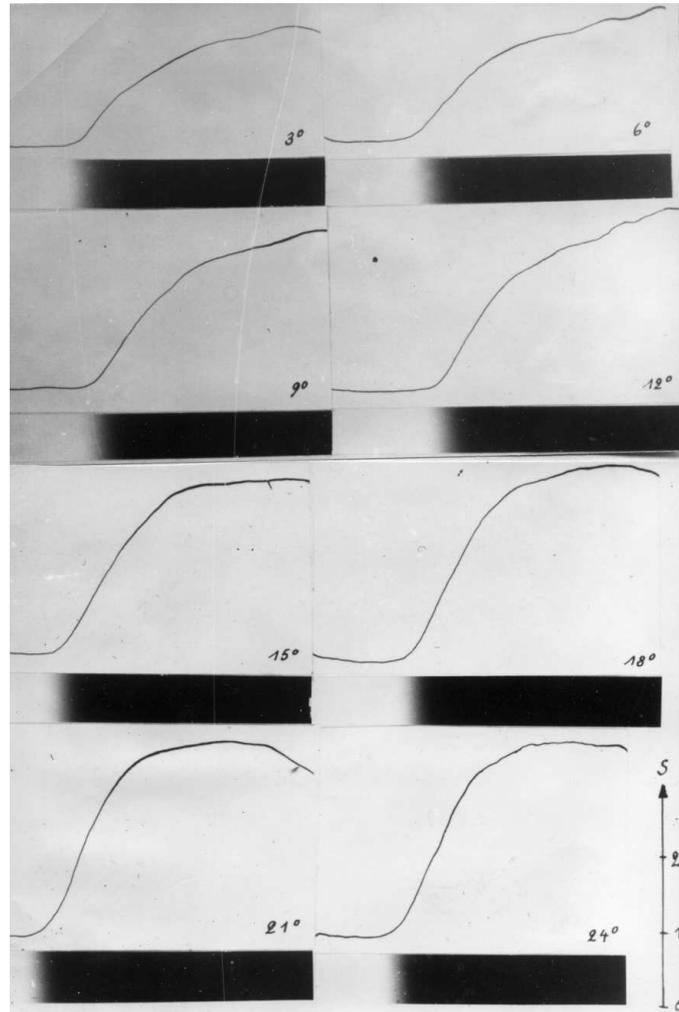


Abb. 34a...h lgE-Schwärzungskurven bei verschiedenen Entwicklertemperaturen und konstanter Entwicklungszeit $t_{entw.} = 2 \text{ min}$; Turaphot extra-hard, Rodinal $entw. 1: 5$

In Abb. 35 sind die Kurven von Abb. 34 zu einer Kurvenschar vereinigt.

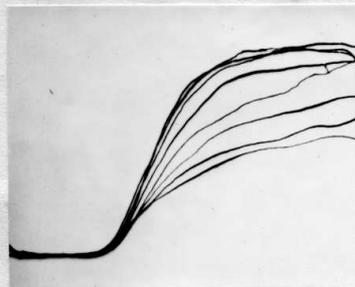


Abb. 35 Schar von lgE-Schwärzungskurven; Parameter: Temperatur des Entwicklers, siehe Abb. 34

⁵Die auf den folgenden Seiten aus der Dissertation wiedergegebenen Beispiele wurden in dem Verteidigungsvortrag von Diapositiven nacheinander auf den Bildschirm projiziert und dabei gleichzeitig erläutert.

Abb. 39/40/38 Doppelbelichtungskurven

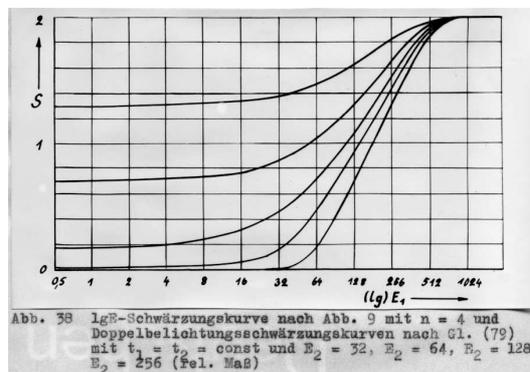
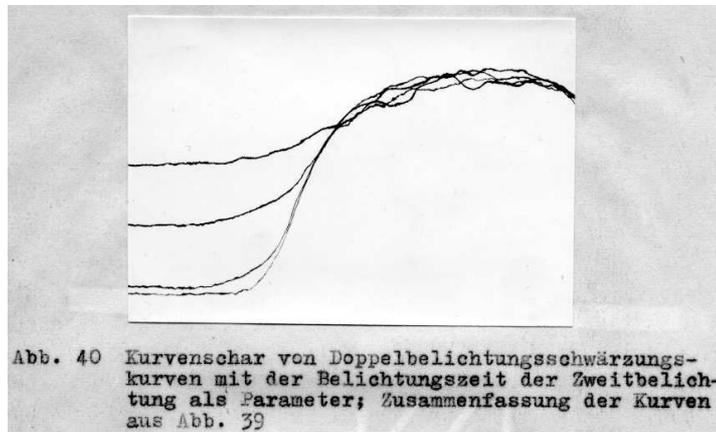
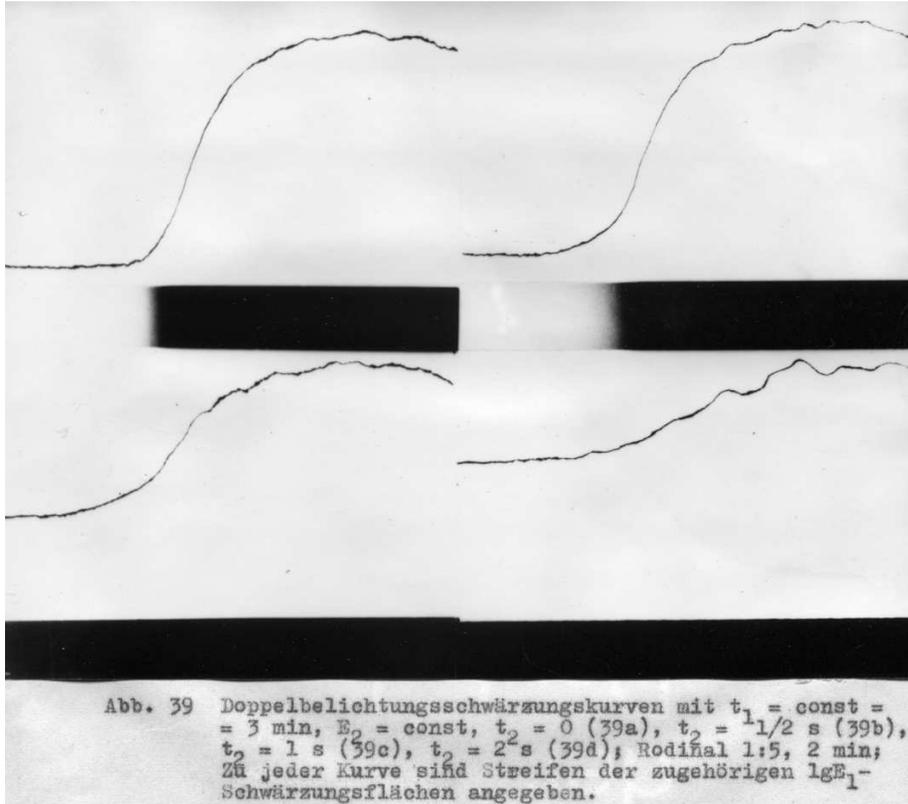


Abb. 41/42 SCHWARZSCHILD-Effekt

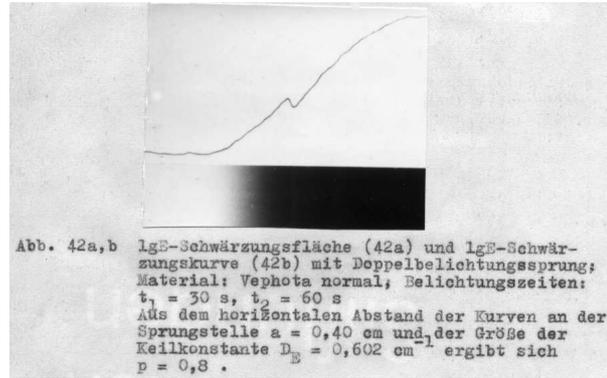
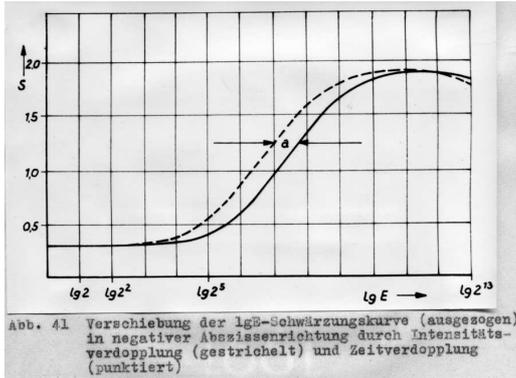


Abb. 49 HERSCHEL-Effekt

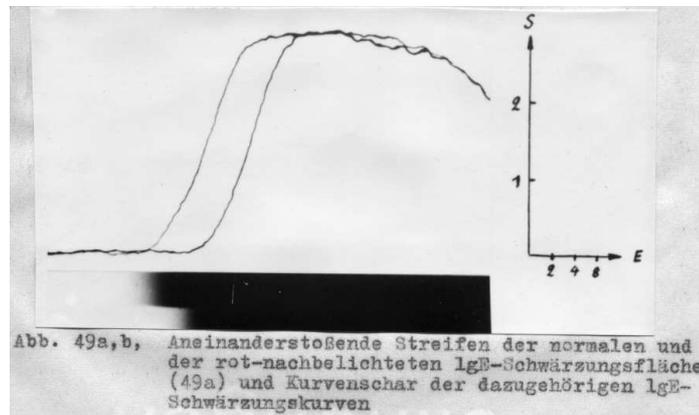
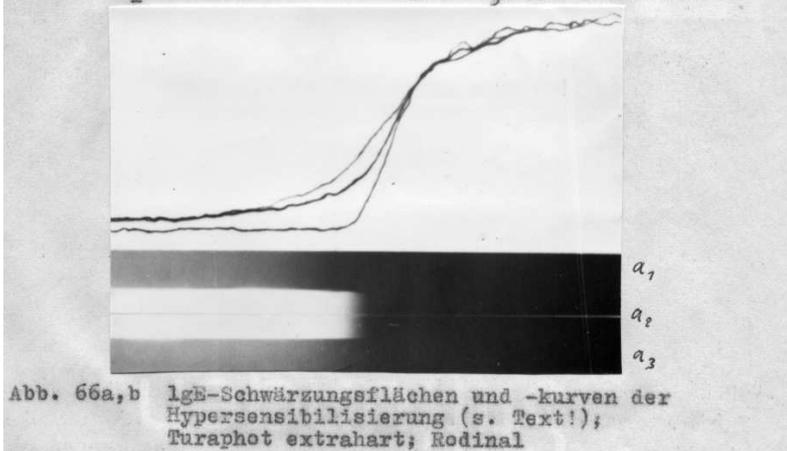


Abb. 66 Hypersensibilisierung

Die Hypersensibilisierung wird zur Empfindlichkeitssteigerung einer Langzeitbelichtung (Normalbelichtung) durch eine kurzzeitige, gleichmäßige Vorbelichtung, die nur einen geringen Schleier hervorruft, angewendet. Abb. 66a zeigt die aneinandergrenzenden Streifen der lgE-Schwärzungsflächen einer Lampenbelichtung (66a₂) mit gleichmäßiger Vorbelichtung (66a₁) bzw. Nachbelichtung (66a₃) mit Blitzlicht.



Von besonderem Interesse für die Äquidensitometrie sind aber die folgenden Extremwert-Effekte, die ebenfalls durch einparametrische Schwärzungsflächen und Schwärzungskurven erfaßt werden können.

Abb. 57/58 SABATTIER-Effekt

Abb. 57a zeigt eine typische SABATTIER- $\lg E_1$ -Schwärzungsfläche bei konstanter Zweitbelichtung und Abb. 57b die dazugehörige Schwärzungskurve.

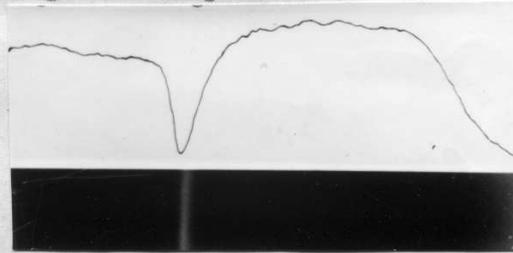


Abb. 57a,b $\lg E_1$ -Schwärzungsfläche und -kurve des SABATTIER-Effektes;
Material: Vephota extrahart; $t_2 = 20$ s; Rodinal

Auch die Schwärzungskurven von SABATTIER-Äquidensiten höherer Ordnung lassen sich auf diese Weise leicht gewinnen.

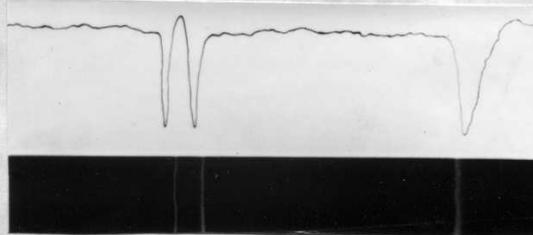


Abb. 58a,b $\lg E_1$ -Schwärzungsfläche und -kurve des Schwärzungsquerschnittes von Äquidensiten 2. Ordnung, die durch Kopieren von Abb. 57a und Anwendung des SABATTIER-Effektes erhalten wurden; Material und Verarbeitung wie in 57a

Abb. 70/77/80 CLAYDEN-Effekt

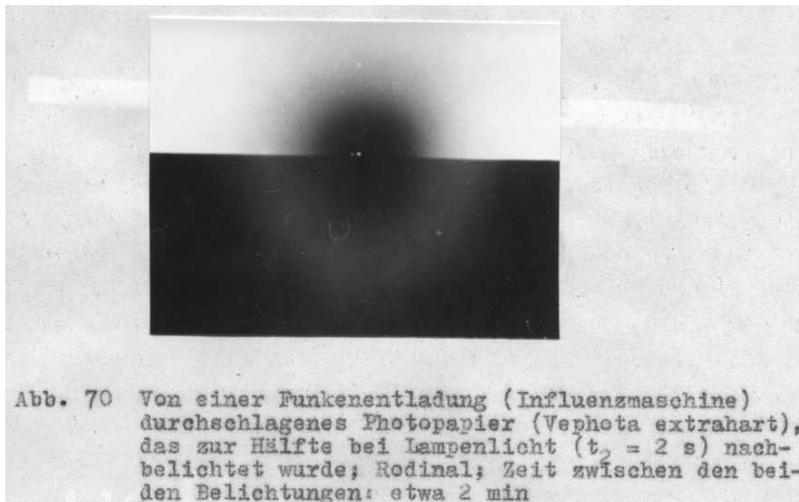


Abb. 70 Von einer Funkenentladung (Influenzmaschine) durchschlagenes Photopapier (Vephota extrahart), das zur Hälfte bei Lampenlicht ($t_2 = 2$ s) nachbelichtet wurde; Rodinal; Zeit zwischen den beiden Belichtungen: etwa 2 min

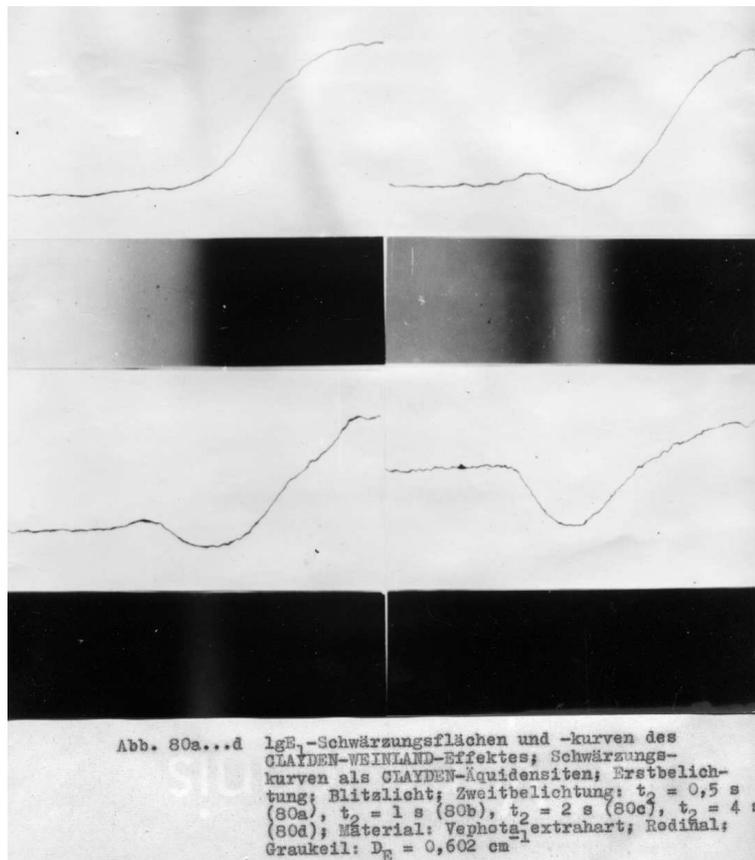
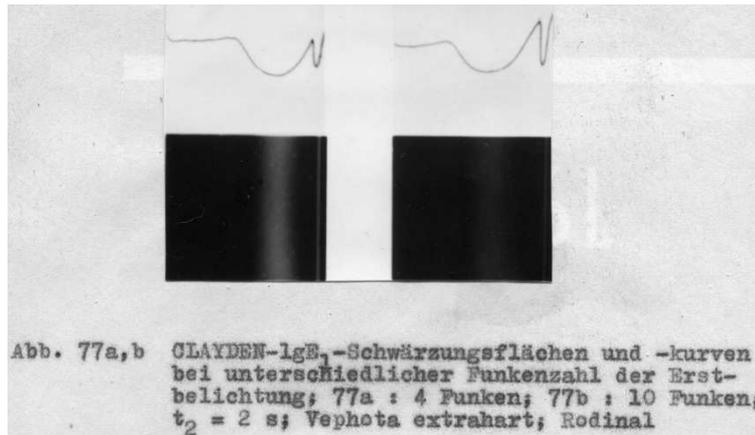


Abb. 82 SABATTIER- und CLAYDEN-Äquidensite

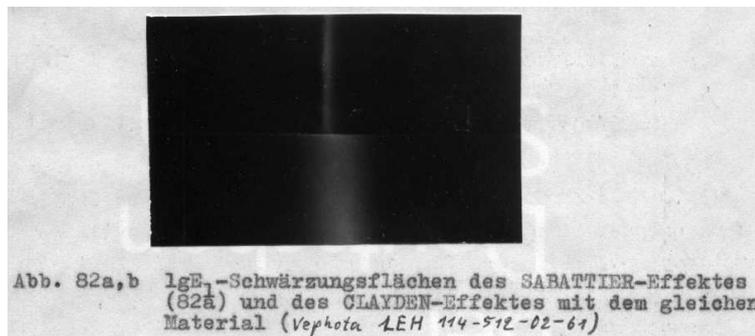
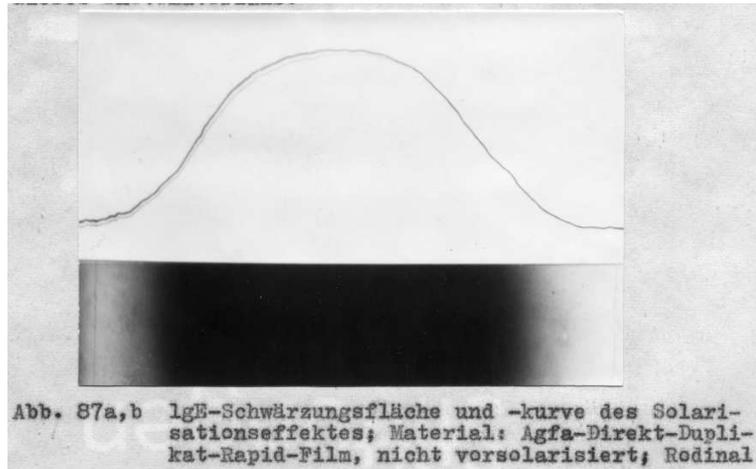
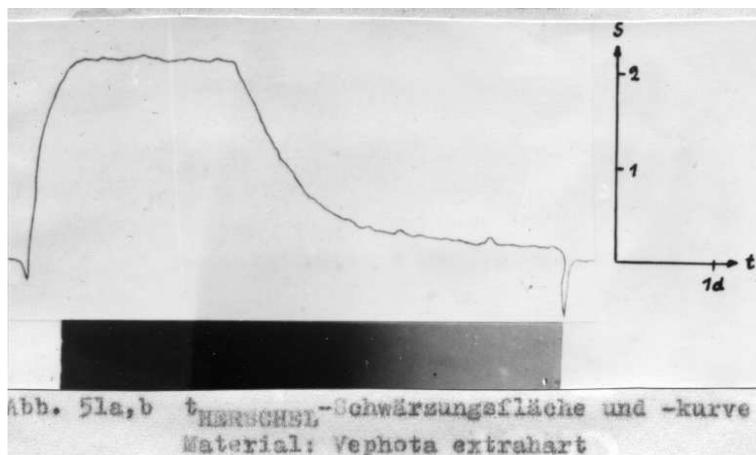


Abb. 85/86/27/92 Solarisationseffekt



Wichtig sind mitunter auch Schwärzungskurven mit linearer Abhängigkeit des variierten Parameters. Bei einer Zeitkurve läßt sich dies besonders einfach durch eine mit einem Uhrwerk angetriebene und über das Photomaterial bewegte Blende verifizieren.

Abb. 51/52 HERSCHEL-Effekt



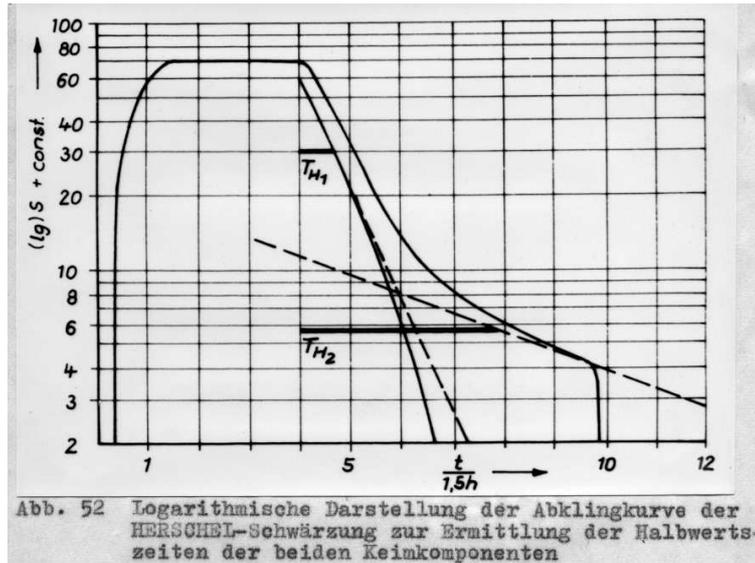


Abb. 91 Solarisationseffekt

Von großem Interesse hinsichtlich der im Abschnitt 4.3 vertretenen Theorie bzw. der analytischen Darstellung ist die t -Schwärzungskurve der Solarisation. Man gewinnt sie, indem man eine Blende mit gleichmäßiger Geschwindigkeit (Uhrwerk, Synchronmotor) während der Belichtung über das solarisierende Photomaterial hinwegbewegt.

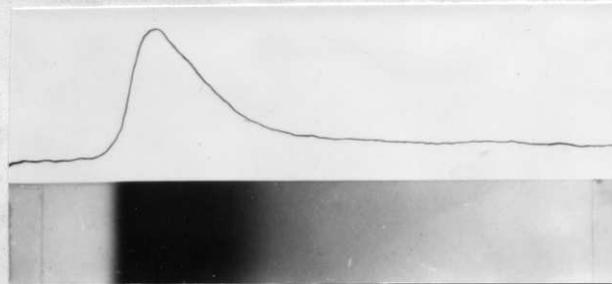


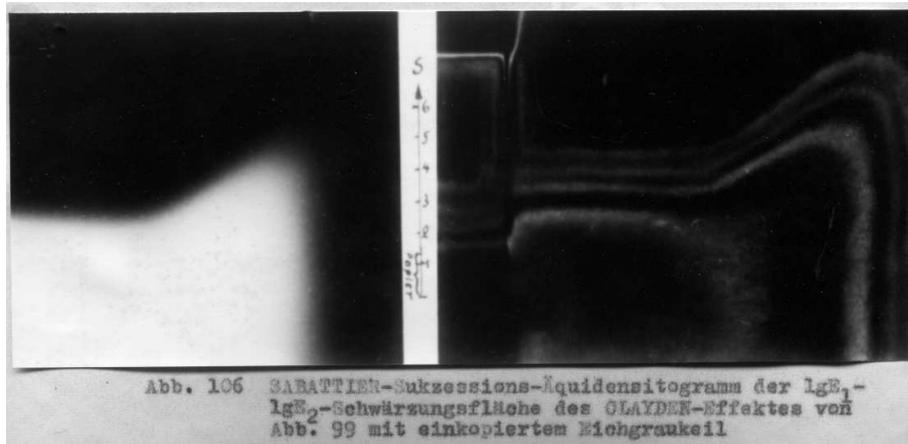
Abb. 91a,b t -Schwärzungsfläche und -kurve des Solarisationseffektes; Material: AGFA-Direkt-Duplikat-Rapid-Film; Rodinal; $v = 1,7 \text{ cm s}^{-1}$

Doppelbelichtungen

Die Wirkung der Doppelbelichtung läßt sich sehr vorteilhaft mit zweiparametrischen Schwärzungsflächen erfassen, da alle Variationskombinationen beider Belichtungen in der Schwärzungsfläche enthalten sind.

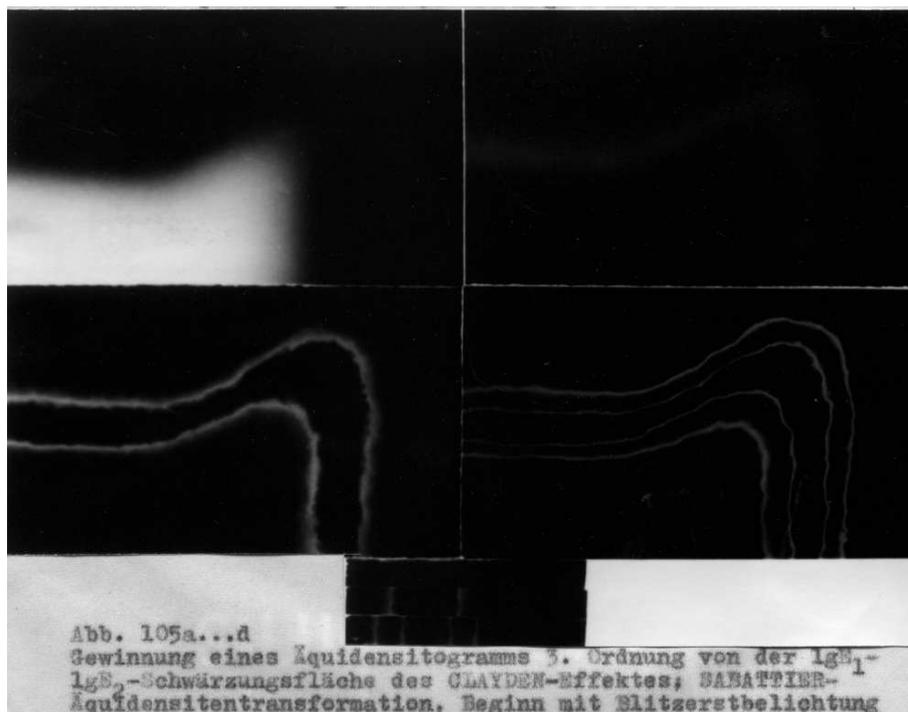
Für die Analyse solcher Schwärzungsflächen wurden vorhin, bei der Definition der neuen sensitometrischen Grundbegriffe, bereits einige Beispiele angeführt. Hierzu nun noch einige Ergänzungen:

Abb. 106 Mehrfachäquidensiten (mehrfache, sukzessive Anwendung des SABATTIER-Effektes)



Dieses zeichnet sich durch geringen Materialverbrauch und gute Koordinatentreue aus. Allerdings ist die Reproduzierbarkeit nicht gut, und man muß einen Eichgraukeil benutzen.

Abb. 105 Äquidensiten höherer Ordnung, Auflösung des Photogramms in eine Schar von Äquidensiten



Die Gewinnung von Äquidensiten höherer Ordnung unter Benutzung des SABATTIER-Effektes geht auf LAU und KRUG zurück. Neu ist an Abb. 105 die Zuhilfenahme des CLAYDEN-Effektes für die erste Äquidensitentransformation. Infolge des großen Belichtungsumfanges der CLAYDEN-Äquidensite – d.h. infolge ihrer großen Breite und ihrem flachen Flankenanstieg – wird bei der ersten Äquidensitentransformation bereits der gesamte Schwärzungsumfang des Photogramms erfaßt.

Weitere Äquidensitentransformationen werden dann mit dem SABATTIER-Effekt vorgenommen. Man erhält so eine gleichmäßige Verteilung der Äquidensiten über die gesamte Schwärzungsfläche.

In dieser Weise wurden die Äquidensitogramme der folgenden Beispiele für zweiparametrische Schwärzungsflächen gewonnen:

Beispiele für $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsflächen:

Abb. 115 $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche (mit Solarisation)

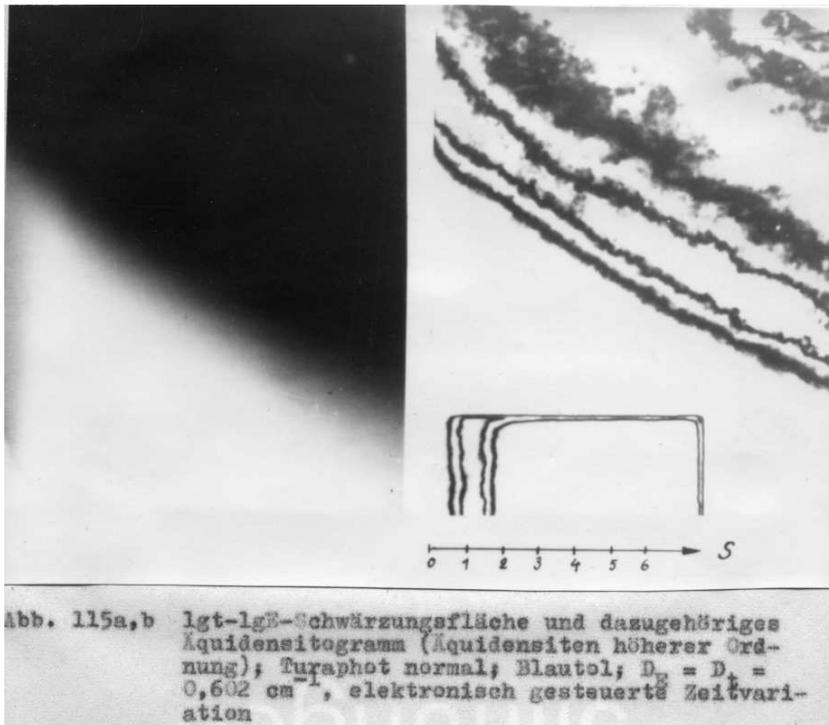


Abb. 123 $\lg t_2$ - $\lg E_2$ -Schwärzungsfläche (HERSCHEL-Effekt)

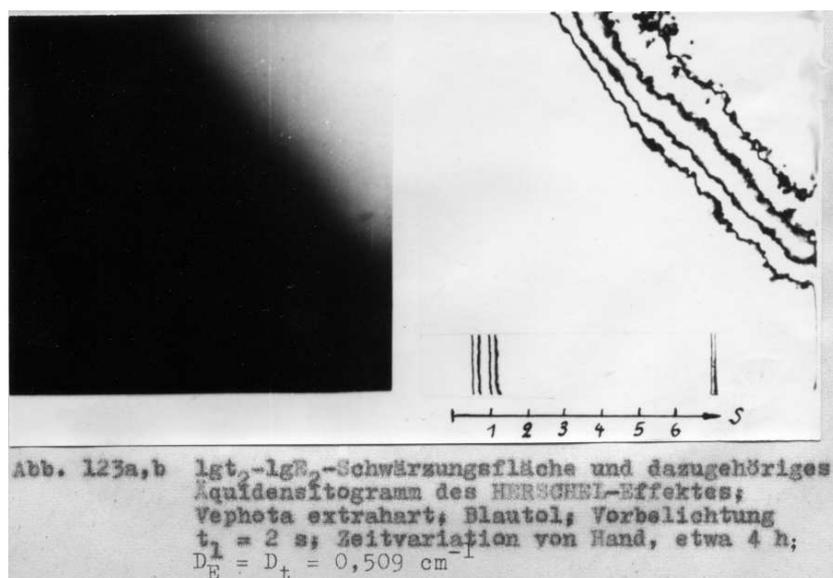


Abb. 121 $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche (Blitzfolge-Belichtung)

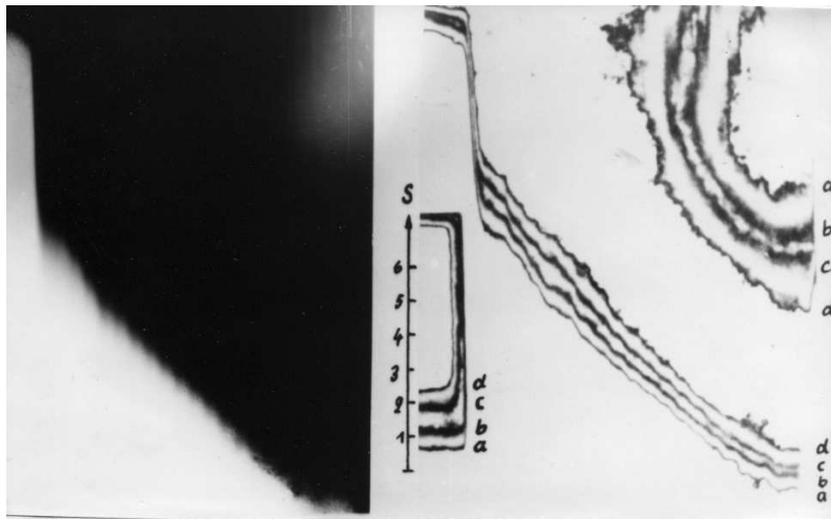


Abb. 121a,b $\lg t$ - $\lg E$ -Schwärzungsfläche und dazugehöriges Aquidensitogramm einer Blitzfolgebelichtung; Vephota extrahart; Rodinal; Blitzabstand etwa 1 s. Auf der t-Achse ist die Anzahl der Blitze in exponentieller Progression aufgetragen.

Beispiele für $\lg E_1$ - $\lg E_2$ -Schwärzungsflächen:

Abb. 125 Prinzip

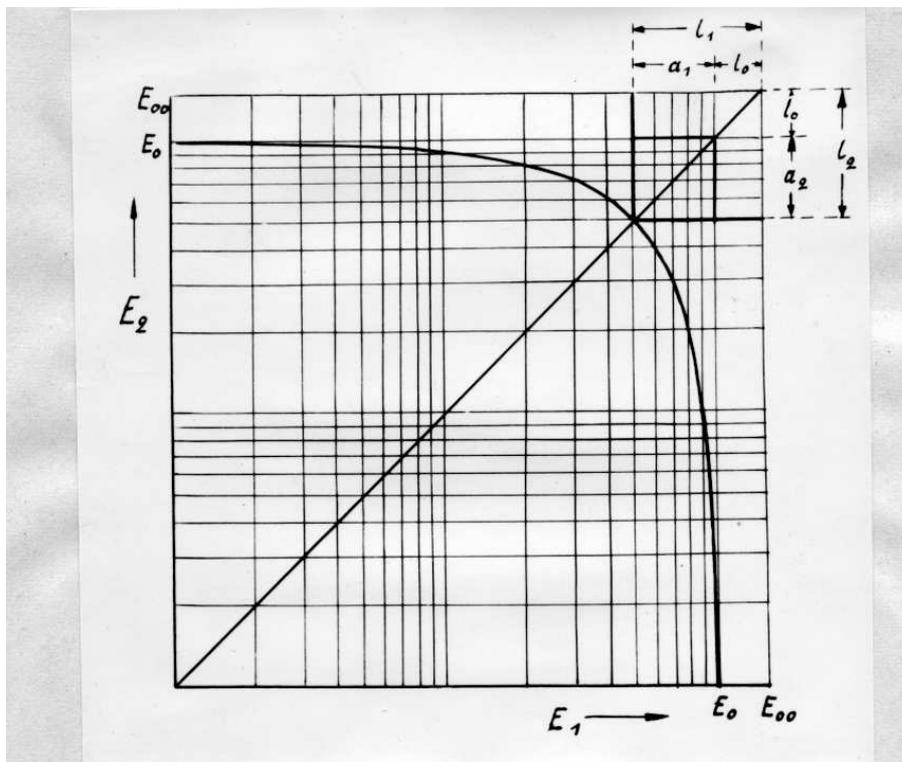


Abb. 125 Konstruktion der Aquidensite einer Kreuzkeilaufnahme mit $p = q = 1$ nach Gl. (108)

Abb. 127 sukzessive Langzeit-Doppelbelichtung

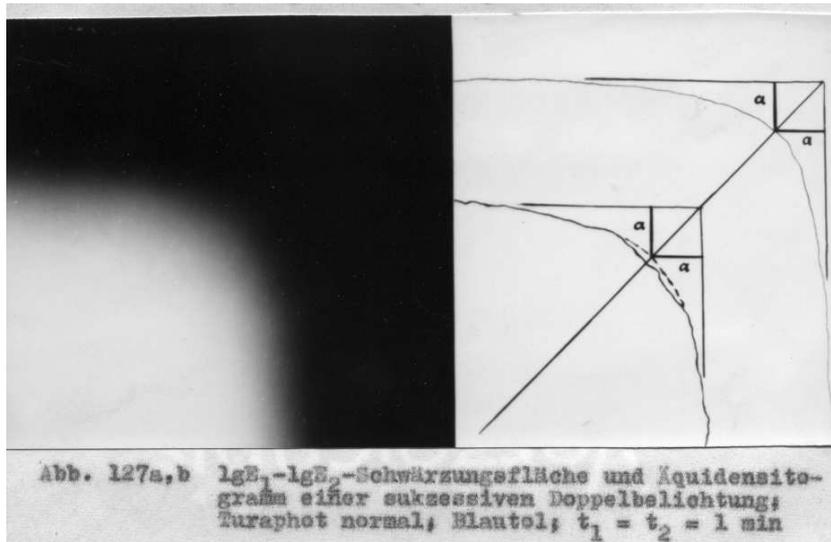


Abb. 131 sukzessive Blitz-Doppelbelichtung

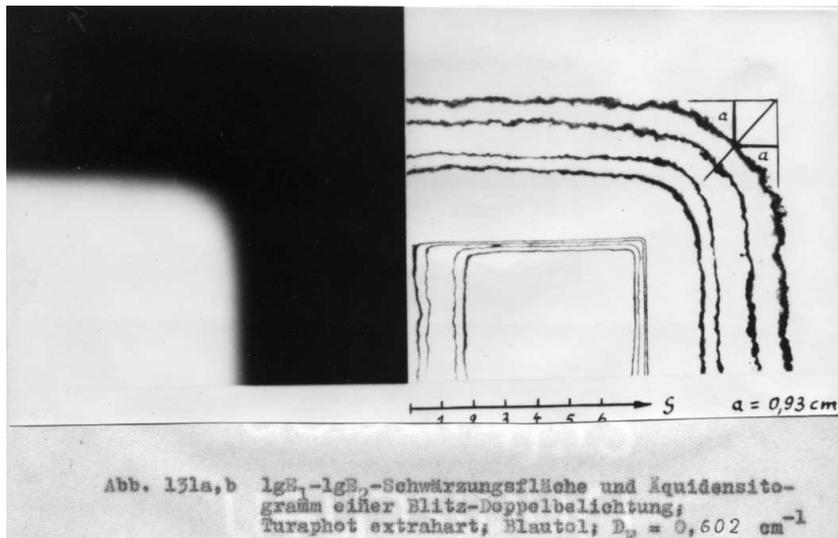
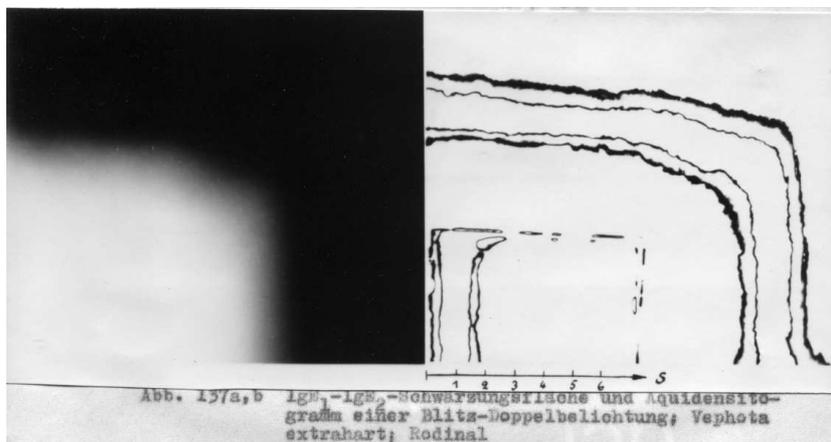


Abb. 137/138/139 Doppelbelichtungen auf Vephota



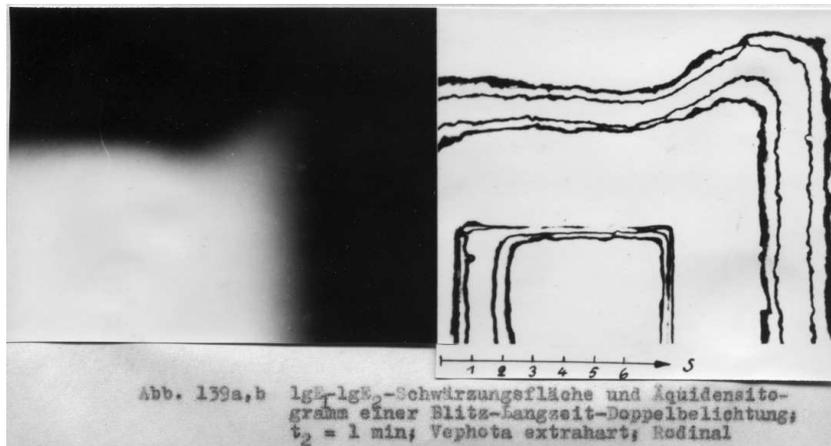
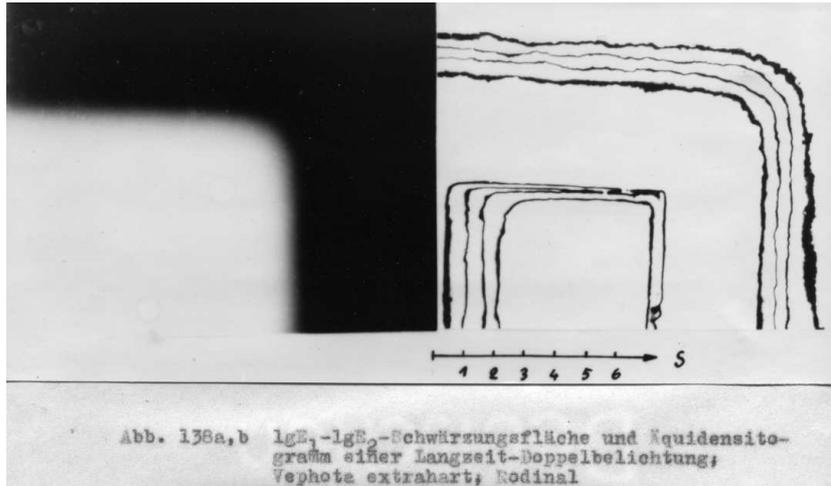
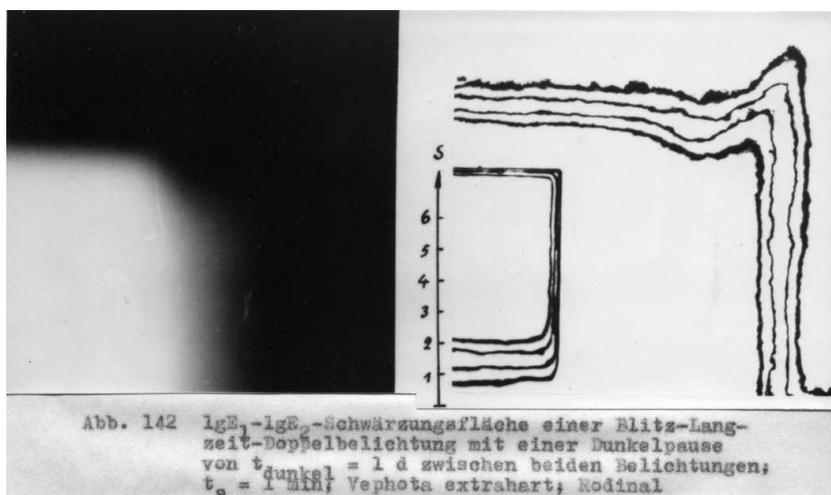


Abb. 142/143 Wirkung der Dunkelpause zwischen Blitz- und Langzeitbelichtung



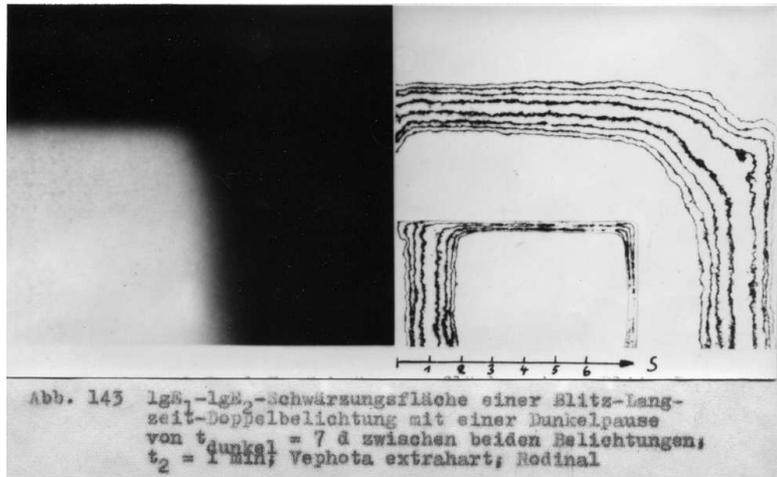


Abb. 145 SABATTIER-Effekt

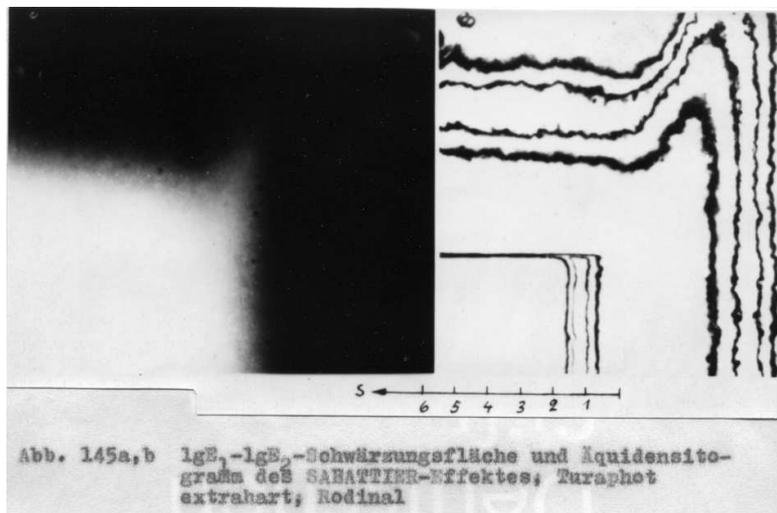
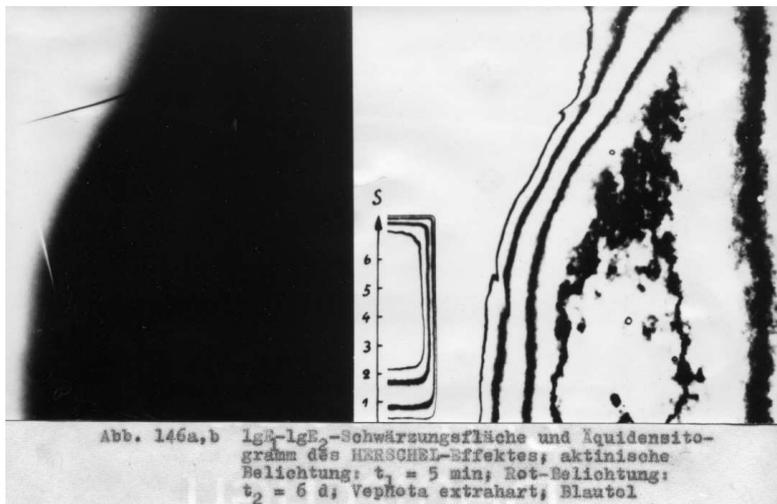


Abb. 146 HERSCHEL-Effekt



Im allgemeinen wird man bei der Aufnahme von Schwärzungsflächen aus praktischen Gründen – man denke z.B. an den Graukeil! – zur logarithmischen Variation greifen. Mitunter ist eine andere Form der Variation – z.B. die lineare – vorteilhafter oder sogar technisch wesentlich einfacher zu verwirklichen – insbesondere bei der Zeitvariation. Beispiele für die lineare Variation der Intensität und der Zeit der Belichtung sind in der Dissertation angeführt.

Die äquidensitometrische Methode ermöglicht eine intensive Informationsübermittlung von dem zu untersuchenden Photomaterial. Sie zeichnet sich durch eine gute Übersicht über das Versuchsmaterial aus, da in allen Verarbeitungsphasen die Koordinatenzuordnung erhalten bleibt und nicht – wie bei der photometrischen Auswertung – unzählige Einzelmessungen tabellarisch bzw. in Diagrammen zusammengestellt zu werden brauchen.

Die Auswahl aus den Versuchsergebnissen zeigt, daß hier eine Fülle von empirischem Material der theoretischen Deutung harret.

Umgekehrt stellen viele dieser Experimente Prüfungen der Theorie des photographischen Prozesses dar.

Die theoretische Deutung der in der Dissertation enthaltenen empirischen Ergebnisse geht von folgender Grundkonzeption aus:

Es wird die Hypothese aufgestellt, daß sich der Aufbau von Keimen (die schließlich bei der Entwicklung die Reduktion des kristallinen Silberbromids zu Silber auslösen) über eine Kette von n Gleichgewichtsreaktionen vollziehe. Die Hinreaktionen werden dabei durch die lichtelektrische Elektronenkonzentration und die Rückreaktionen durch den Photoeffekt bestimmt, der unmittelbar auf die schon gebildeten Keime einwirkt.

Wenn in jedem Glied der Reaktionskette der Übergang der Elektronenkonzentration N und der Belichtungszeit t proportional ist, dann ist die Wahrscheinlichkeit des Durchlaufens der Kette von n Gliedern für eine konstante Wirkung

$$N^n t^n = \text{const} \quad (19)$$

und bei Eintreten eines Reaktionsgleichgewichtes zwischen den ersten beiden Gliedern

$$N^n t^{n-1} = \text{const}, \quad (20)$$

da die Reaktionsordnung der Zeit um ein Glied vermindert wird.

Unter der Annahme der Proportionalität der Elektronenkonzentration N zu der Belichtungsintensität E erhält man auf der Grundlage der eben genannten Hypothese die SCHWARZSCHILD-Formel

$$Et^p = \text{const} \quad (21)$$

bzw. – unter Berücksichtigung der Elektronenfallen und der Rekombination von Elektronen und Defektelektronen – eine allgemeinere Beziehung

$$(\sqrt{1 + aE} - 1)t^{1-1/n} = \text{const}. \quad (22)$$

Diese Beziehung beschreibt gleichzeitig den normalen und den inversen SCHWARZSCHILD-Effekt. (Der normale SCHWARZSCHILD-Effekt tritt bei Langzeitbelichtung und der inverse bei Kurzzeitbelichtung auf.)

Hiernach ist – in qualitativer Übereinstimmung mit der Praxis –

$$p = 1 - \frac{1}{n} < 1 \quad \text{für} \quad n > 1 \quad \text{und} \quad t \rightarrow \infty$$

$$\text{bzw.} \quad p = 2(1 - \frac{1}{n}) < 2 \quad \text{für} \quad n < 1 \quad \text{und} \quad t \rightarrow 0.$$

Die Keimordnung muß aus Raumgründen des Vollkeimes (dem Silberhalogenidkristall auf-sitzender Tetraeder von Silberatomen) mindestens $n = 4$ für entwicklungsfähige Keime be-tragen, kann aber durch Auffüllung der ersten Stufen der Gleichgewichtskette (z.B. durch Sensibilisierung) für eine nachfolgende Belichtung effektiv verringert werden.

Auch gebrochene Keimordnungszahlen sind möglich. Sie ergeben sich durch die statistische Verteilung verschieden sensibilisierter Silberbromid-Kristalle in der Emulsion.

Auf der Grundlage dieser Theorie ist es nun möglich, eine analytische Darstellung der Schwärzungskurve anzugeben. Abb. 8/9 zeigt Schwärzungskurven, die nach (25) konstruiert wurden.

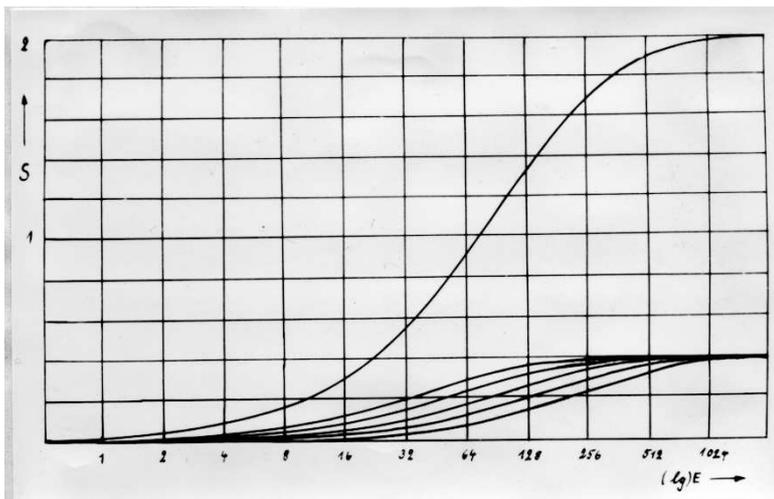


Abb. 8 Schar der Partialschwärzungskurven und Gesamtschwärzungskurve bei der Keimordnung $n = 1$

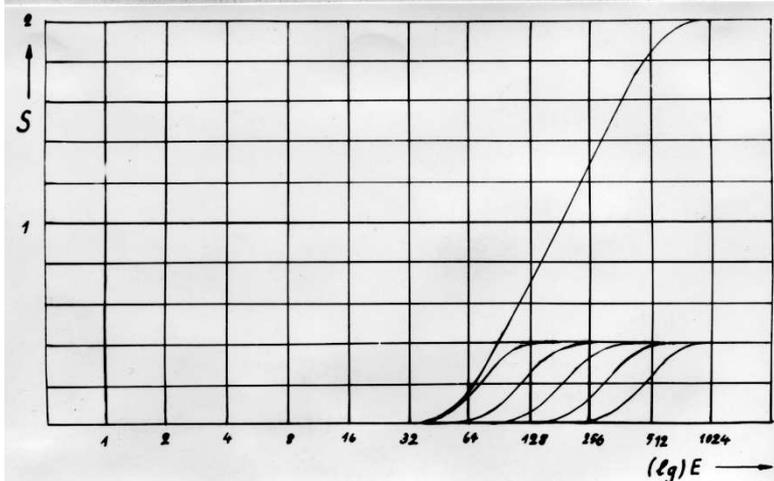


Abb. 9 Schar der Partialschwärzungskurven und Gesamtschwärzungskurve bei der Keimordnung $n = 4$

Das Argument der Funktion

$$S = f(E, t) \tag{23}$$

ist das SCHWARZSCHILD-Produkt Et^p – bzw. allgemeiner nach (22).

Dieses Argument tritt als Faktor in der mittleren Zellenbesetzungszahl der entwicklungsfähigen Keime in einer POISSON-Verteilung auf.

Die Schwärzung einer Partialschicht ergibt sich damit zu

$$\Delta S_i = \Delta S_{i0} \left(1 - 10^{-(\varepsilon E t^p 10^{-D x_i})^n}\right) \quad (24)$$

bzw. die Gesamtschwärzung zu

$$S = \sum_i \Delta S_i = S_0 \left(1 - \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j 10^{-(\varepsilon E t^p 10^{-D x_i})^n}\right). \quad (25)$$

Geht man zu der Integraldarstellung über, so erhält man

$$S = S_0 \left(1 - \frac{1}{x_0} \int_0^{x_0} e^{-(\varepsilon^* E t^p e^{-D^* x})^n} dx\right). \quad (26)$$

Mit Hilfe der Substitution

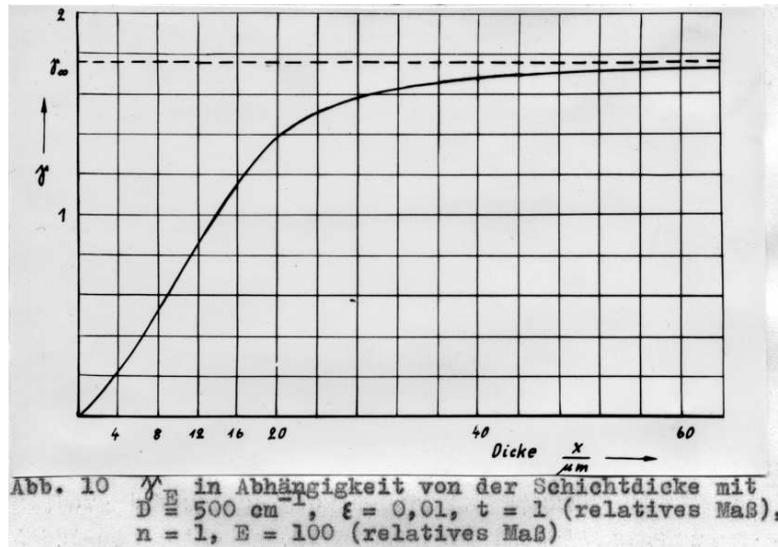
$$(\varepsilon^* E t^p e^{-D^* x})^n = u \quad (27)$$

läßt sich die Gleichung für die Schwärzungskurve in folgende Exponentialintegral-Funktion mit $\mathcal{E}i(E, t)$ überführen:

$$S = S_0 \left(1 + \frac{1}{n S_D} \left[\mathcal{E}i(-[\varepsilon^* E t^p e^{-S_D^*}]^n) - \mathcal{E}i(-[\varepsilon^* E t^p]^n) \right]\right). \quad (28)$$

Alle Größen sind hierin konstant – bis auf die unabhängigen Variablen E und t . Die Schichttiefe x (eine Hilfsgröße zur Ableitung der Gleichung!) ist darin nicht enthalten.

Mit Hilfe dieser analytischen Darstellung der $\log E$ -Schwärzungskurve kann der γ -Wert in Abhängigkeit von der Schichtdicke berechnet werden (Abb. 10).

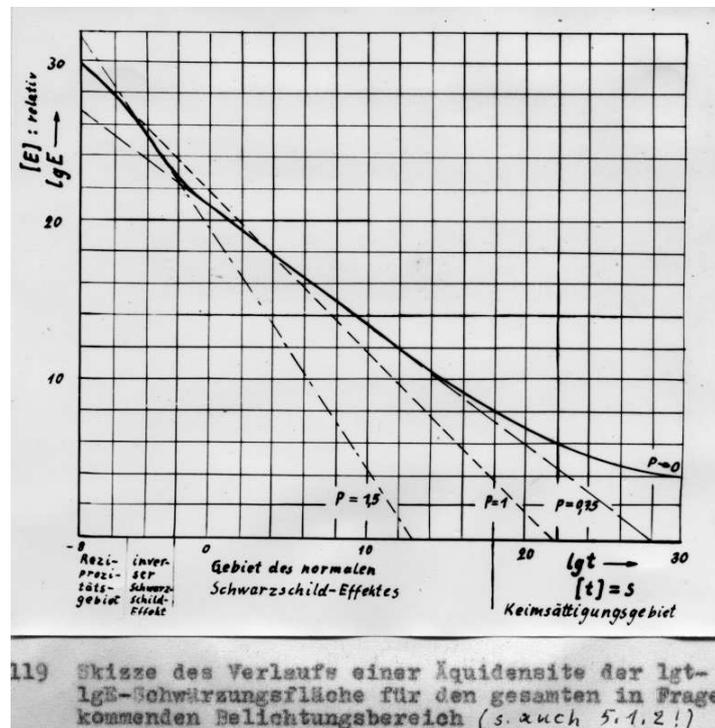


In gleicher Weise sind auch die Schwärzungskurven der Solarisation und weiterer photographischer Effekte – die vorhin bereits vorgeführt wurden – berechnet worden.

Nach der soeben in ihren Grundzügen erläuterten Theorie läßt sich die Doppelbelichtung so berechnen, daß die Endbedingungen der Erstbelichtung (Verteilung der Keime auf die einzelnen Stufen der Gleichgewichtskette) als Anfangsbedingungen für die Zweitbelichtung eingesetzt werden. Sind beide Belichtungen sehr unterschiedlich, so strebt das System bei

der Zweitbelichtung wieder einem solchen Gleichgewichtszustand zu, der sich sogar in einem Abbau von Keimen äußern kann, z. B. beim CLAYDEN-Effekt, HERSCHEL-Effekt, VILLARD-Effekt u.a. .

Die praktischen und theoretischen Untersuchungen der Dissertation gestatten folgenden Überblick über das gesamte Gebiet der Belichtung:



Es wurde eine (theoretische) Äquidensite der lgt - lgE -Schwärzungsfläche herausgegriffen. Die Neigung der Äquidensite gibt den SCHWARZSCHILD-Exponenten in dem jeweiligen Belichtungsgebiet an.

Abschließend sei noch bemerkt, daß wohl die eingangs erwähnte Problematik der Doppelbelichtung, wie sie z.B. bei der Filmüberblendung auftritt, einer befriedigenden Lösung zugeführt werden konnte, daß aber viele Probleme durch die in der Arbeit behandelte Methode erst neu aufgedeckt wurden und noch einer Klärung harren. Es zeigt sich auch hier, daß Theorie und Praxis in einer engen Wechselbeziehung miteinander stehen.

Es sei mir nun gestattet, meinen Dank auszusprechen an:

Herrn Prof. Dr. LAU,

Herrn Prof. Dr. PICTH,

Herrn Dr. MELCHER,

Herrn Dipl.-Ing. KRÖBER,

Herrn Prof. Dr. ESTEL,

die Kollegen der Werkstatt Herrn PAUDLER,

Herrn KRANEPUHL, Herrn WEINHOLD, Herrn STREICH

und meine Frau, ohne deren geduldige Rücksichtnahme und ständige Aufmunterung die Fertigstellung der Arbeit bis heute nicht möglich gewesen wäre.

Ich danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Kommentar des Verfassers im Jahre 2010 zu der Verteidigung der Dissertation

Bei der Sichtung des Manuskriptarchivs fiel dem Verfasser die maschinengeschriebene Ausarbeitung des Vortrags der Verteidigung der Dissertation in die Hand, welche – ungeachtet des zweckbestimmten rhetorischen Stils – als eine Kurzfassung der Schrift gelten kann.

Die Verteidigung fand am 19. 11. 1965 an der Pädagogischen Hochschule Potsdam statt. Für den Vortrag wurde die Auflage erteilt, den Stoff in nicht mehr als genau 45 Minuten darzulegen. Dies wurde durch Straffung des Textes und Projektion der Formeln und Bilder auf Diapositiven erreicht, welche in schneller Folge mit begleitenden Erklärungen vorgetragen wurden.

Die Abbildungen sind einem dem Verfasser noch verbliebenen Exemplar der Dissertation durch Scannen entnommen, wobei die dazugehörigen Bildunterschriften miteinbezogen wurden. Das Exemplar der Dissertation ist ein dritter Durchschlag mittels Kohlebogen, welcher nur eine verwaschene Schreibmaschinenschrift hervorbringt. Hiermit wird aber die Authentizität der Wiedergabe bestätigt.

Die Dissertation ist eine Arbeit der Experimentalphysik und hat darum auch in der Verteidigung die Ergebnisse von Experimenten vorzuführen, die – thematisch bedingt – in Form von Bildern vorliegen. Die Qualität der Bildbeispiele ist einerseits durch die zeitbedingten Umstände (Jahre 1961-1965) aber auch durch die Aufgabenstellung selbst begründet. Es kam darauf an, sehr unterschiedliche Photomaterialien mit weit streuenden Eigenschaften zur Verfügung zu haben, die auch die zu untersuchenden Effekte, insbesondere der Doppelbelichtung, hervorbringen. Diese fand der Kandidat vor allem in den zum Kopieren verwendeten handelsüblichen Photopapieren, von denen es „weiche“, „normale“, „harte“, „extraharte“ und dergleichen mehr an Sorten gab. Die Photoemulsionen dieser Papiere sind nicht auf hohe Empfindlichkeit gezüchtet und zeigen oft die photographischen Effekte besonders klar. Zudem brauchte man hinreichend große Flächen, um die Kreuzkeilmethode der Belichtung durch den Graukeil und Äquidensitentransformationen anzuwenden.

Die Äquidensitentransformationen mit Anwendung des SABATTIER-Effektes und mehrfachem Umkopieren wurden in der Regel auf extrahart arbeitendem Printonfilm (9cm·12cm) vorgenommen. Als ein Nachteil dieser „einfachen“ Methode der Sensitometrie ist ein hoher Materialverbrauch und auch Zeitaufwand für die vielen aufeinanderfolgenden Prozesse für Belichten, Kopieren, Entwickeln und Trocknen der Schichten und Zwischenverarbeitungen zu sehen. Mit einem elektronischen Flächenäquidensitometer könnte der große Materialverbrauch vermieden werden. Ein solches Gerät stand dem Verfasser aber nicht zur Verfügung.

Nachteilig ist auch das Durchkopieren durch den Schichtträger Papier, welches eine geringe Homogenität der Transparenz und mitunter sogar eine faserige Struktur aufweist. Die erzielten Ergebnisse der Äquidensiten sehen daher mehr oder weniger „ausgefranst“ aus, und man muß den ungefähren Mittelwert abschätzen.

Dennoch kommt der grundsätzliche Charakter der Schwärzungswirkung von Doppelbelichtungen als experimentelles Ergebnis der Arbeit gut heraus und gibt Veranlassung zu einer der wichtigsten Folgerungen für die Theorie des photographischen Prozesses:

Doppelbelichtungen unterschiedlicher Belichtungsart sind nichtkommutativ!

Die Frage nach der Kommutativität aufeinander folgender Belichtungen für Schwärzungswirkungen wurde erst in einer weiterführenden Folgearbeit des Verfassers beantwortet.

Die hier vorgelegte wortgetreue Wiedergabe des Textes hat den Charakter einer Dokumentation und kann dem interessierten Leser eine kurzgefasste Einführung in den Gegenstand der Thematik geben.

Der Text wurde durch Scannen und Schriftanalyse in eine Zeichenkette umgesetzt, mit dem Textverarbeitungsprogramm LaTeX 2e bearbeitet und in das Internet eingestellt unter der Adresse

www.ewald-gerth.de/19verteidigung.pdf .

Zu einer späteren Zeit soll auch die vollständige Dissertation in das Internet eingefügt werden. Vorerst soll hierzu die Zusammenfassung als Auszug aus der Dissertation dienen:

www.ewald-gerth.de/19zusam.pdf

Im Vorlauf der Verteidigung wurden auf Anforderung der Pädagogischen Hochschule Potsdam vom Kandidaten Thesen aufgestellt und diese hektografiert der Mathematisch-Physikalischen Fakultät zur Verteilung an die zu erwartenden Opponenten übergeben:

www.ewald-gerth.de/19thesen.pdf

Vor der Verteidigung fanden im Rahmen eines Rigorosums mehrere Prüfungen statt:

1. Philosophie (Pflichtfach, Prüfer: Frau Prof. Dr. Götz)
2. Physik (Hauptfach, Prüfer: Prof. Dr. Junghähnel, Prof. Dr. Klebe)
3. Physikalische Chemie (Nebenfach, Prüfer: Prof. Dr. Gehlen)

Das Protokoll wurde von Dr. Mitzner geführt.

Die Verteidigung fand am 19. 11. 1965 im Kleinen Hörsaal des Instituts für Experimentalphysik der Pädagogischen Hochschule Potsdam statt. Im Auditorium befanden sich auch geladene Vertreter der Filmfabrik ORWO Wolfen und der DEFA Babelsberg. Nach dem Verteidigungsvortrag nahmen als erste die Gutachter Prof. Dr. E. Lau und Prof. Dr. J. Picht das Wort. Danach wurde die Diskussion für alle Anwesenden freigegeben.

Das Promotionsverfahren wurde mit der Überreichung der Urkunde abgeschlossen:

www.ewald-gerth.de/19urkunde-prom-a.pdf

Potsdam, 9. Dezember 2010

Dr. rer. nat. habil. Ewald Gerth