

Vorschläge für ein äquidensitometrisch begründetes Begriffssystem der Sensitometrie

Von Ewald Gerth

Aus dem Institut für Physik der Pädagogischen Hochschule Potsdam

Mit 18 Abbildungen

*Herrn Professor Dr. E. Lau dankbar und hochachtungsvoll zum 75. Geburtstag
am 7. März 1968 gewidmet*

Beim Abfassen von Abhandlungen über die verschiedensten Gegenstände der wissenschaftlichen Photographie stößt man häufig auf Schwierigkeiten, wenn es gilt, mit dem vorhandenen, historisch entstandenen Begriffs- und Wortschatz der Sensitometrie spezielle sensitometrische Zusammenhänge und Erscheinungen treffend und eindeutig zu formulieren. Man greift dann meist zu wortreichen Umschreibungen des gemeinten Begriffes, die – besonders bei mehrfachen Wiederholungen – recht lästig werden können.

Weglassen der Umschreibungen führt dagegen wieder zu Ungenauigkeiten und Verwechslungsmöglichkeiten. Hierfür sei als ein Beispiel der Begriff der von HURTER und DRIFFIELD [2] als „*characteristic curve*“ eingeführten und ins Deutsche übertragenen „*Schwärzungskurve*“ angeführt. In dem deutschsprachigen Schrifttum ist – eigentlich unzulässig – dieser Begriff eingengt auf die graphische Darstellung der Abhängigkeit der Schwärzung von dem Logarithmus der Belichtung. Nun ist aber die Belichtung eine aus der Belichtungszeit und der Belichtungsintensität zusammengesetzte Größe, so daß man noch die „Schwärzungskurve bei Zeitvariation“ und die „Schwärzungskurve bei Intensitätsvariation“ unterscheiden muß. Doch auch durch die Darstellung der Abhängigkeit der Schwärzung vom Logarithmus der Belichtung $E \cdot t$ (Intensität · Zeit) werden noch nicht beide Variationsmöglichkeiten eindeutig zusammengefaßt. Für einen begrenzten Belichtungsbereich, der hier durch den **terminus** „Schwarzschild-Bereich“ bezeichnet werden soll, kann man in hinreichender Näherung die sensitometrischen Eigenschaften der Schicht durch eine „Schwärzungskurve in Abhängigkeit vom Logarithmus des Schwarzschild-Produktes Et^p “ kennzeichnen.

Fast schon grotesk wirken solche in der fotografischen Praxis für die Kennzeichnung der Gradation der Schwärzung gängigen Ausdrücke wie „flach“ oder „weich“, „steil“ oder „hart“. – Irgendwo dazwischen liegt dann das „normal“ arbeitende Fotomaterial.

¹Scanned from an original reprint of the article by E. Gerth in 2015.

Darüber hinaus gibt es aber noch viele andere Formen der Abhängigkeit der Schwärzung von einem variierten Parameter (z.B. der Temperatur bei der Belichtung oder der Entwicklung, der Entwicklungsdauer, der Konzentration des Entwicklers usw.), die in ihrer graphischen Darstellung auch „Schwärzungskurven“ im eigentlichen Sinne sind, leider aber nicht mehr als solche bezeichnet werden können, da dieser **terminus** für die in dem englischsprachigen Schrifttum viel treffender als „charakteristische Kurve“ (characteristic curve) des Photomaterials benannte „Schwärzungskurve“ vergeben ist. Selbst wenn man von der Vielzahl der Parameter, die die Schwärzung der photographischen Schicht beeinflussen, absieht und lediglich die Zeit und die Intensität der Belichtung als unabhängige Variable der Funktion $S = f(\log(Et))$ zuläßt, muß man die Frage aufwerfen, ob die graphische Darstellung der Schwärzung in der Form $S = f(E, t)$ mit linearer Variation der unabhängigen Variablen nicht auch eine „Schwärzungskurve“ sei, die dann allerdings nicht mehr die von den Schwärzungskurven bekannte und gewohnte „charakteristische“ sigmoide f -Form aufweist. Solche Kurven, die hier unter Verallgemeinerung des Begriffes auch als „Schwärzungskurven“ bezeichnet werden sollen, werden z.B. häufig bei der Dosimetrie ionisierender Strahlung mit Röntgenfilm aufgenommen.

Ähnliches wie für die Schwärzungskurven gilt auch für die von ARENS [1] eingeführten Schwärzungsflächen. Des weiteren sind aus der Äquidensitometrie die Begriffe „Photogramm“ und „Äquidensitogramm“ u. a. bekannt. Auch hiervon gibt es viele Abarten. Es erscheint daher dringend erforderlich, diese Begriffe neu zu ordnen, zu systematisieren und dafür eine neue Terminologie zu finden, die aber – um keine Verwirrung zu stiften – die alte Terminologie nicht einfach umstößt und durch eine neue ersetzt, sondern die die alte Terminologie in sich einbezieht und durch geeignete, möglichst kurze Erweiterungen präzisiert.

Selbst die grundlegende Größe der Sensitometrie, die Schwärzung, ist nicht so eindeutig definiert, als dass nicht an ihr Kritik zu üben wäre.

1. Die Schwärzung

Die Schwärzung S wird allgemein nach HURTER und DRIFFIELD [2] als der dekadische Logarithmus der Opazität O

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

einer von weißem Licht (Sonnenlicht bzw. Glühemission) durchsetzten Schicht erklärt,

$$S = \lg \frac{E_0}{E}, \quad (2)$$

die im Bereich des sichtbaren Lichtes keine Abhängigkeit von der Wellenlänge zeigt.² In (1) und (2) ist E_0 die Intensität des Lichtes vor und E die Intensität nach Durchgang des Lichtes durch die Schicht.

²In der Praxis liegt bei Schwärzungsmessungen natürlich stets eine (wenn mitunter auch geringe) Wellenlängenabhängigkeit vor. Die obige Definition stellt eine Idealisierung dar, bei der die Schwärzung als ein wellenlängenunabhängiger Spezialfall der Extinktion aufgefasst wird.

Aber schon die Durchführung der Intensitätsmessung wirft einige Probleme auf. Intensitätsempfindliche Detektoren (Photozellen, Photoelemente, photographische Schichten) sind im allgemeinen auch für Licht außerhalb des sichtbaren Spektralbereiches empfindlich, so dass bei Verwendung einer Photometrierlichtquelle mit breitem Spektrum ein gemessener Schwärzungsverlauf ganz und gar von dem visuellen Eindruck des Schwärzungsverlaufes abweichen kann. Außerdem kommt es bei der photometrischen Schwärzungsmessung noch auf die Richtcharakteristik des Lichtes an. Wird nämlich die Schicht von dem Licht schräg durchsetzt, so ist der Weg des Lichtes durch die Schicht länger und damit die Schwärzung größer als bei senkrechter Durchstrahlung. Bei Verwendung von diffusem Licht durchsetzt die Mehrzahl der Lichtstrahlen die Schicht schräg, so dass daraus eine scheinbar größere Schwärzung als bei Verwendung von gerichtetem Licht resultieren würde. Die gleichzeitig noch auftretende Streuung des Lichtes an der Schicht (CALLIER-Effekt) bewirkt aber wiederum eine scheinbare Zunahme der Schwärzung bei gerichtetem Licht, so dass ein Schwärzungsverlauf in gerichtetem Licht sogar noch kontrastreicher erscheint als in diffusem Licht. Der ermittelte Wert der Schwärzung richtet sich stets nach der Messgeometrie des verwendeten Densitometers. Von der Messgeometrie ist lediglich die photometrische Messung der Schwärzung mit zwei ULBRICHT-Kugeln unabhängig, bei der das Licht aus dem Raumwinkel 2π in die Schicht eingestrahlt und auch nach dem Durchtritt durch die Schicht über den Raumwinkel 2π gesammelt und gemittelt wird. Diese so gemessene Schwärzung wird als „doppeldiffuse Schwärzung“ bezeichnet – im Gegensatz zu der „diffusen Schwärzung“ (eine ULBRICHT-Kugel zur Sammlung und Mittelung des Lichtes hinter der Schicht) und der „gerichteten Schwärzung“ (Verwendung von gerichtetem Licht).

Übliche Densitometer besitzen eine von Gerät zu Gerät unterschiedliche Messgeometrie, so dass die Schwärzung ein und derselben Schicht mit unterschiedlichen Geräten zu verschiedenen Messergebnissen führt. Da der CALLIER-Effekt auch von der Korngröße der streuenden Schicht abhängt, gibt es keinen „gerätespezifischen“ CALLIER-Faktor, der es gestatten würde, die mit dem Densitometer gemessene Schwärzung in die „doppeldiffuse Schwärzung“, die wegen der Unabhängigkeit von der Messgeometrie als die *N o r m a l s c h w ä r z u n g* angesehen werden darf, umzurechnen.

Die photometrische Schwärzungsmessung besitzt den Nachteil, dass die Schwärzung als abgeleitete Größe über den Umweg eines logarithmischen Intensitätsverhältnisses gemessen wird.

Zur Messung der Schwärzung mit einer adäquaten Messgröße kann man eine Schwärzungsskala in Gestalt eines schwärzungslinearen Graukeiles verwenden. Vermittels der Keilkonstante des Graukeils

$$D = \frac{\Delta S}{\Delta I} \quad (3)$$

wird die Messung eines Schwärzungsunterschiedes ΔS auf die Messung der Länge ΔI zurückgeführt.

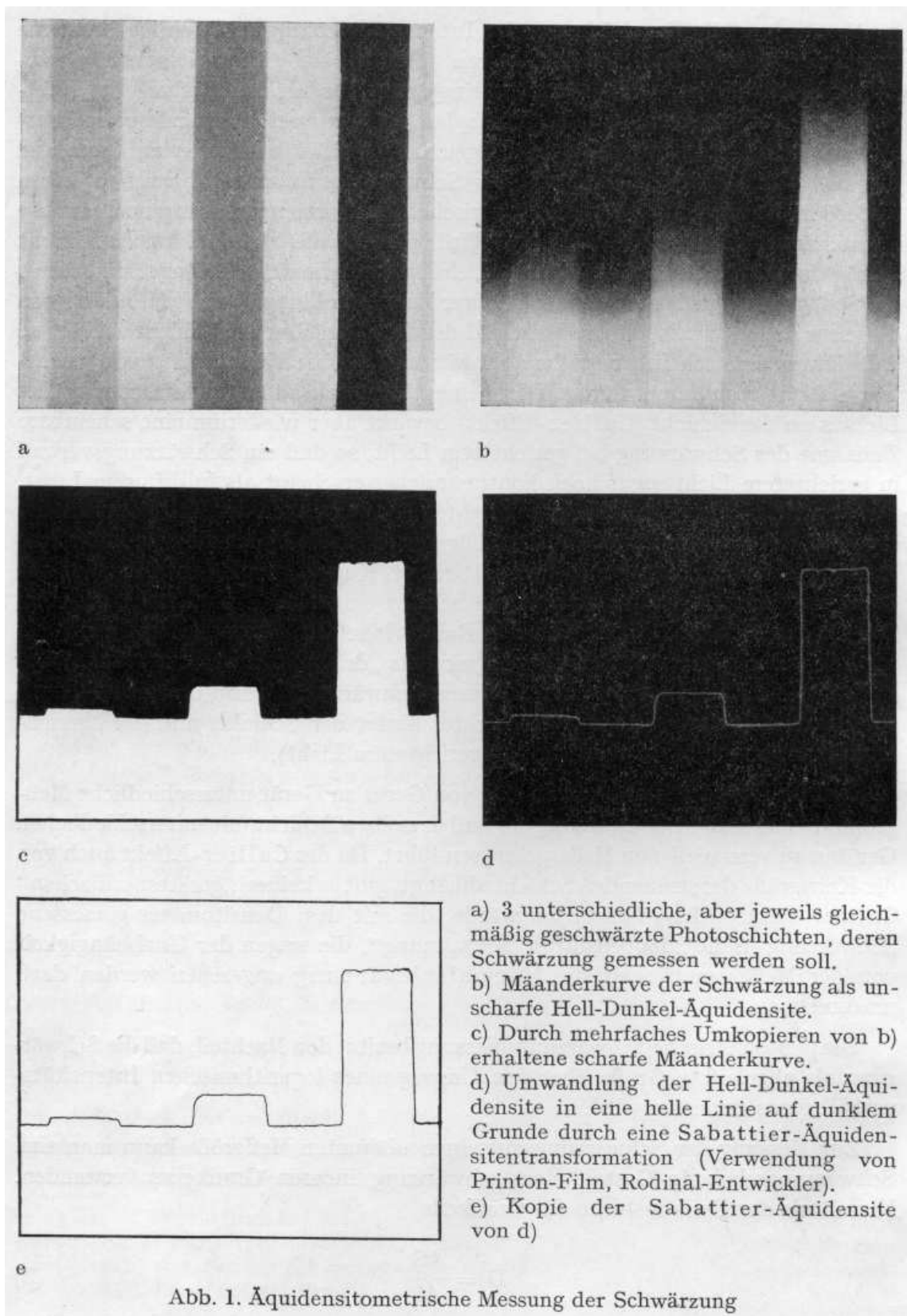


Abb. 1. Äquidensitometrische Messung der Schwärzung

Zur Durchführung der Schwärzungsmessung mit dem Graukeil ist ein beliebiger lichtempfindlicher Detektor geeignet, dessen Intensitätscharakteristik nicht bekannt zu sein braucht, da mit dem Keil nur die bekannte mit der unbekannten Schwärzung verglichen wird. Auf diesem Prinzip beruht bekanntlich das GOLDBERG-Densitometer.

Äquidensitometrisch lässt sich die Schwärzung als „Sprunghöhe“ einer „Mäanderkurve“ messen, die dadurch entsteht, dass ein Streifen der zu messenden geschwärzten Schicht auf den Graukeil gelegt und beides zusammen auf möglichst „hart“ arbeitendes Photomaterial kopiert wird (Abb. 1).

Wäre die Schwärzungskurve des zum Kopieren verwendeten Photomaterials eine ideale Rechteckkurve, so würde man eine beliebige Äquidensite des mit der geschwärzten Schicht überdeckten Graukeils unmittelbar als scharfe Hell-Dunkel-Linie erhalten. Auf Grund der sigmoiden (f -förmigen) Gestalt der Schwärzungskurve sind die Übergänge von Hell nach Dunkel in Abb. 1 b stark verwaschen. Durch mehrfaches Umkopieren wird die Rechteckkurve weitgehend angenähert (Abb. 1 c). Schließlich kann durch Anwendung des SABATTIER-Effektes die Hell-Dunkel-Linie in eine helle Linie auf dunklem Grunde verwandelt werden (Abb. 1 d), welche nach Umkopieren als dunkle Linie auf hellem Grunde erscheint (Abb. 1 e).

Die äquidensitometrische Schwärzungsmessung zeichnet sich durch gute Reproduzierbarkeit aus, sofern der Graukeil, hinter dem sich die zu messende Schicht und dahinter wiederum das Kopierphotomaterial befinden, mit einer Opalglasscheibe bedeckt wird. Die so gemessene Schwärzung kommt der „doppeldiffusen Schwärzung“ sehr nahe. Die Zusammenhänge wurden von KIRSCH [3] näher untersucht. Es besteht allerdings noch eine gewisse Abhängigkeit von der Korngröße.

Der äquidensitometrischen Schwärzungsmessung wird die linear zunehmende Schwärzung des Graukeils zugrunde gelegt.

Dies legt den Gedanken nahe, die Definition der Schwärzung überhaupt umzukehren und anstatt von der photometrisch bedingten Definition (2) davon auszugehen, dass die Schwärzung S der Anzahl N der absorbierenden Zentren je Flächeneinheit der Schicht proportional sei, so dass mit dem Proportionalitätsfaktor a

$$S = aN \quad (4)$$

gilt. Bei einer homogenen Verteilung der Pigmentierung, die für den Grenzfall von Pigmenten atomarer Größenordnung in die „Färbung“ übergeht, ist demnach die Schwärzung auch der Schichtdicke x proportional,

$$S^* = bx. \quad (5)$$

b ist wiederum ein Proportionalitätsfaktor, und der Stern deutet an, dass S noch mit dem Modul $\ln 10$ zu multiplizieren ist.

Betrachtet man die Schwächung der Intensität E des Lichtes in differentiellen Schichtdicken dx , so gelangt man über die Differentialgleichung

$$-dE = bE \, dx \quad (6)$$

auf das Lambertsche Gesetz

$$E = E_0 e^{-bx} = E_0 e^{-S^*}, \quad (7)$$

woraus für die „natürliche Schwärzung“

$$-S^* = \ln \frac{E_0}{E} \quad (8)$$

und nach Multiplikation mit dem Modul $\lg e$ die konventionelle Definition der Schwärzung als dekadischer Logarithmus der Opazität nach (2) folgt.

Die beiden Gleichungen (2) und (4) sind hiernach ineinander überführbar und daher grundsätzlich äquivalent. Dennoch sagt Gl. (4) mehr aus als Gl. (2), da sie nicht nur die allgemeine Lichtschwächung durch die Schicht beschreibt, sondern unmittelbar von den Absorptions- und Streueigenschaften der Pigmente in der Schicht ausgeht.

Zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors a in (4) denkt man sich die Schicht in Zellen von der Größe der mittleren Projektionsfläche $\bar{f}$ der Pigmente (wabenantig) aufgeteilt. Für den Fall – wie er bei der photographischen Schicht vorliegt –, dass in einer Zelle nur wenige Pigmente übereinander liegen können, gilt das Verteilungsgesetz für kleine Zellenbesetzungszahlen von POISSON. Mit der mittleren Zellenbesetzungszahl

$$\bar{z} N \bar{f} \quad (9)$$

ergibt sich aus der POISSONschen Verteilungsfunktion

$$W(z) = \frac{\bar{z}^z}{z!} e^{-\bar{z}} \quad (10)$$

für die freibleibenden Zellen die Wahrscheinlichkeit

$$W(0) = e^{-\bar{z}} \quad (11)$$

und damit nach (2) die Schwärzung

$$S = \lg \frac{1}{e^{-\bar{z}}} = \bar{z} \lg e = N \bar{f} \lg e. \quad (12)$$

Dies ist die NUTTINGSche Schwärzungsformel [4, 5], durch welche der Proportionalitätsfaktor in Gl. (4) zu $\bar{f} \lg e$ bestimmt wird.

Es ist bemerkenswert festzustellen, dass die mittlere Projektionsfläche $\bar{f}$ der Pigmente auch die Lichtverluste durch Streuung an den Pigmenten mit erfasst, so dass Gl. (12) sowohl für die Schwärzung der Schicht bei gerichtetem Licht als auch bei diffusem Licht gilt. Die effektive Vergrößerung von $\bar{f}$ wird dann durch den CALLIER-Koeffizienten [6] beschrieben.

Berechnet man nach Gl. (8) die „natürliche Schwärzung“, so entfällt der Modul, und man erhält

$$S^* = \ln \frac{1}{e^{-\bar{z}}} = \bar{z} = N \bar{f}. \quad (13)$$

Bereits aus diesen kurzen Ableitungen ist zu ersehen, dass es zweckmäßiger wäre, die Schwärzung als den natürlichen Logarithmus der Opazität und nicht als den dekadischen Logarithmus zu definieren. Viele Formeln und Herleitungen werden dadurch kompliziert, weil man stets den Modul der Logarithmensysteme als Faktor mitführen muss.

2. Die Schwärzungsfunktion

Die „Schwärzungsfunktion“ beschreibt den allgemeinen Zusammenhang zwischen der Schwärzung einer photographischen Schicht und allen Parametern, die auf die Größe der Schwärzung einwirken. Sie ist demnach (s. Einleitung!) eine Funktion einer größeren Zahl unabhängiger Variablen. Man pflegt die Schwärzungsfunktion im allgemeinen aber so zu formulieren, dass nur die variierten Parameter als unabhängige Variable aufgeführt werden. So ist z. B. $S = f(E, t)$ eine Schwärzungsfunktion, die den Zusammenhang zwischen der Intensität sowie Zeit der Belichtung und der resultierenden Schwärzung beschreibt, während alle anderen Parameter der allgemeinen Schwärzungsfunktion konstant sind.

Die numerische Erfassung der Schwärzungsfunktion ist die Aufgabe der Sensitometrie. Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen äquidensitometrischen Methoden zur experimentellen Darstellung der Schwärzungsfunktion können auf Grund des flächenhaften Charakters der photographischen Schicht naturgemäß jeweils nur zwei unabhängige Variable erfassen.

Das Ziel der Theorie des photographischen Prozesses ist es u. a., eine möglichst geschlossene, physikalisch begründete, analytische Darstellung der Schwärzungsfunktion zu finden.

3. Das Photogramm

Unter einem „Photogramm“ ist grundsätzlich eine flächenhafte Schwärzungsverteilung zu verstehen, deren Schwärzung eine koordinatenmäßige Zuordnung zu einer geometrischen Verteilung der Lichtmenge unter Einbeziehung der Schwärzungsfunktion besitzt. Der gemeinhin bekannteste Fall eines Photogramms ist die sog. „Photographie“, bei der die Helligkeitsverteilung (Leuchtdichtevertelung) eines Gegenstandes koordinatenähnlich auf der photographischen Schicht durch Schwärzungen, die mit der Leuchtdichte der Flächenelemente des Gegenstandes in einem gesetzmäßigen Zusammenhang stehen, abgebildet wird. Hierzu ist allerdings zu bemerken, dass der **terminus** „Photographie“ im eigentlichen Sinne ein Verfahren kennzeichnet und nicht das Ergebnis dieses Verfahrens.

Obgleich es sicher ein wenig aussichtsreiches Unterfangen sein dürfte, gegen einen allgemein eingebürgerten, aber dem Sinne nach unrichtigen Sprachgebrauch vorzugehen, so sollte doch zumindest bei wissenschaftlichen Abhandlungen die richtige Terminologie eingehalten werden. Die photographische Schicht als Träger wissenschaftlicher Informationen ist in verarbeitetem Zustand (d. h. nach der Entwicklung usw.) selbstverständlich stets ein „Photogramm“.

Für die Sensitometrie sind gerade solche Photogramme von Bedeutung, bei denen die Schwärzung eine koordinatenmäßige Zuordnung zu den variierten Parametern der Schwärzungsfunktion besitzt.

4. Das Äquidensitogramm

Eine „Äquidensite“ ist definiert als der geometrische Ort aller Punkte gleicher Schwärzung in einem Photogramm. Überträgt man die Verbindungslinie dieser Punkte gleicher Schwärzung koordinatengetreu aus dem Photogramm in ein anderes Koordinatensystem, so erhält man ein „Äquidensitogramm“ des Photogramms. Die Äquidensite im Photogramm wird auf diese Weise in eine Linie (bzw. Kurve) des Äquidensitogramms transformiert, welche im allgemeinen ebenfalls kurz als „Äquidensite“ bezeichnet wird. Liegen Verwechslungsmöglichkeiten vor, so sollte man zwischen „realen Äquidensiten“ (im Photogramm) und „transformierten Äquidensiten“ (im Äquidensitogramm) unterscheiden.

Die Hervorhebung einer Äquidensite des Photogramms und ihre Darstellung im Äquidensitogramm bezeichnet man als eine „Äquidensitentransformation“. Diese kann auf mannigfache Weise durchgeführt werden.

Die visuelle Lokalisierung der Äquidensite in einem Photogramm führt im allgemeinen zu großen Fehlern, da das Auge – besonders bei strukturell ineinandergreifenden Schwärzungsverläufen – optischen Täuschungen unterliegt. Eine so ermittelte Äquidensite könnte graphisch in das Äquidensitogramm eingetragen werden, so dass man von einer „graphischen Äquidensitentransformation“ sprechen kann. Als „graphisch“ ist auch eine Äquidensitentransformation zu bezeichnen, wenn die Punkte gleicher Schwärzung des Photogramms zwar photometrisch ermittelt werden, dann aber graphisch in das Äquidensitogramm eingetragen werden. Die „Schwärzungsflächen“ von ARENS [1, 7, 8] sind nach der hier vorgeschlagenen Terminologie solche graphischen Äquidensitogramme.

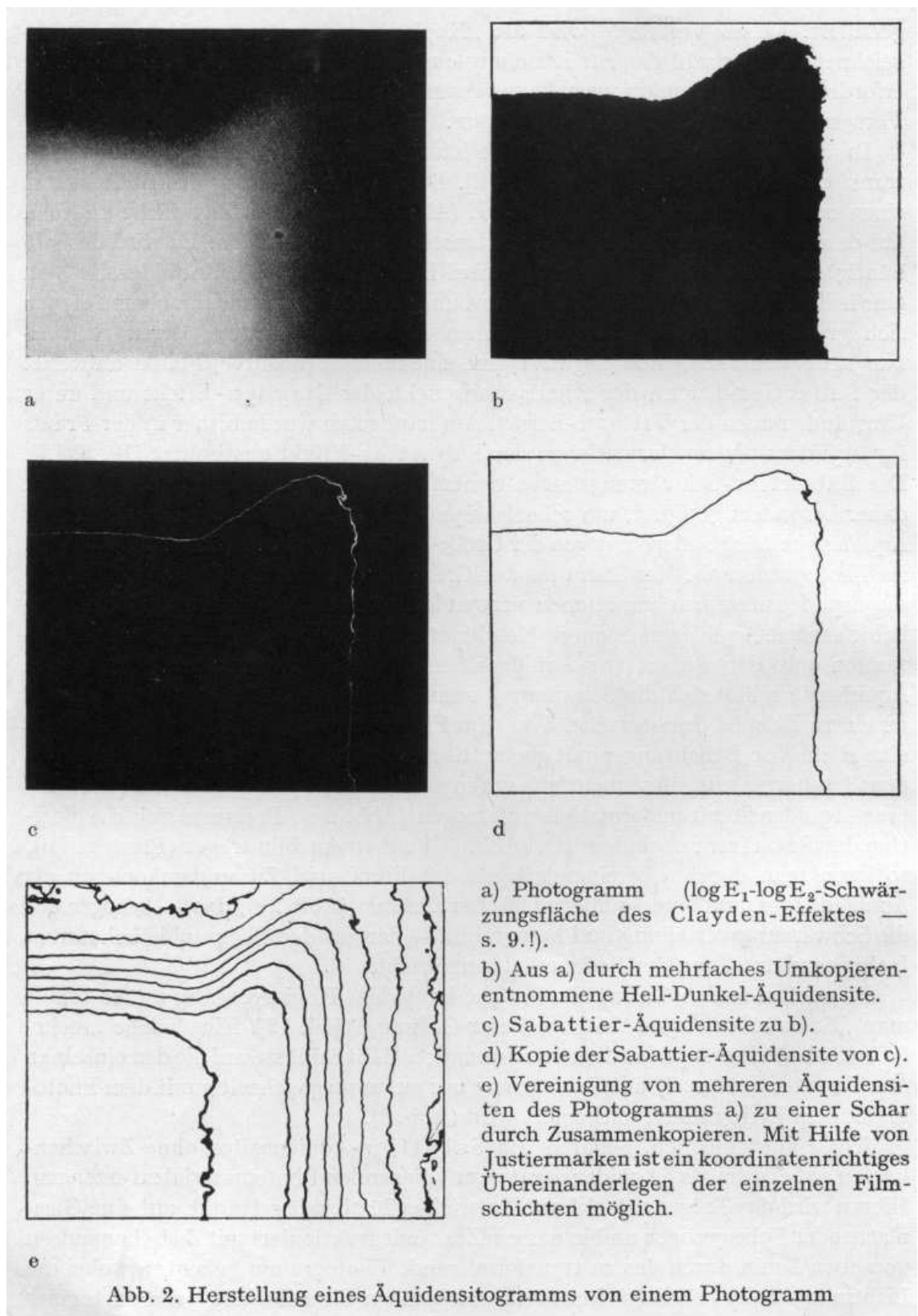
Nach dem Zeilenschreibverfahren, wie es z. B. beim Fernsehen angewandt wird, ist auch durch Hellsteuerung bei bestimmten Schwärzungswerten eine „elektronische Äquidensitentransformation“ möglich. Die Äquidensite des durch die Fernsehkamera aufgenommenen Photogramms erscheint dann unmittelbar als Linie auf dem Leuchtschirm.

Von praktischem Interesse für die Sensitometrie sind insbesondere die photographischen Methoden der Äquidensitentransformation. Bereits durch Umkopieren auf möglichst hart arbeitendes Photomaterial kann man eine Äquidensite des Photogramms als Hell-Dunkel-Linie (Abb. 1 b) darstellen. Je öfter man umkopiert, um so mehr wird die angestrebte Rechteckcharakteristik (Sprungfunktion) der aus den mehrfachen Kopierpressen resultierenden Kopierschwärzungskurve angenähert. Dieses Verfahren wird als „Kopier-Äquidensitentransformation“ bezeichnet. Die Anzahl der zur Erzielung einer scharfen Hell-Dunkel-Äquidensite erforderlichen Umkopierungen kann wesentlich herabgesetzt werden durch die Verwendung photochemischer Verstärker.

In vielen praktischen Fällen reicht häufig eine solche Kopier-Äquidensitenttransformation völlig aus [9, 10, 11, 12]. Durch die Aufteilung des Bildfeldes in einen hellen und einen dunklen Bereich (Abb. 1) ist es allerdings nicht möglich, auf dem Äquidensitogramm Äquidensitenscharen zu vereinigen. Es wird deshalb häufig erforderlich sein, die Heil-Dunkel-Linie („Hell-Dunkel-Äquidensite“) in eine helle Linie auf dunklem Grunde bzw. umgekehrt zu verwandeln. Hierzu eignen sich grundsätzlich alle photographischen Extremwert-Effekte, deren Schwärzungskurve eine steigende (negative) und eine fallende (positive) Flanke aufweist: der SABATTIER-Effekt, der Solarisationseffekt, der CLAYDEN-Effekt und unter Umständen auch der VILLARD-Effekt. Am häufigsten wurde bisher in der Praxis für Äquidensitenttransformationen der SABATTIER-Effekt ausgenutzt [10, 8, 12]. Die SABATTIER-Schwärzungskurve besitzt eine große Flankensteilheit und ist daher besonders geeignet, um scharfe Äquidensiten zu gewinnen. Die Breite der Äquidensite hängt allerdings von der Größe des jeweiligen Schwärzungsgradienten im Photogramm ab. Man kann bis zur Grenze des Auflösungsvermögens der für die Äquidensitenttransformationen verwendeten photographischen Schichten beliebig scharfe Äquidensiten durch Kombination der Kopier-Äquidensitenttransformation mit der SABATTIER-Äquidensitenttransformation erhalten. Für solche Äquidensiten lässt sich die Schwärzung sehr genau festlegen. Dieses Verfahren sei an einem Beispiel demonstriert. Von dem Photogramm in Abb. 2a wurden durch eine Reihe von Belichtungen mit geometrischer Progression der Zeit Kopier-Äquidensiten hergestellt, diese mehrfach umkopiert (Abb. 2b) und dann einer SABATTIER-Äquidensitenttransformation unterzogen (Abb. 2c). Befinden sich die Positive der SABATTIER-Äquidensiten (Abb. 2d) auf einem Filmträger (Printonfilm), so kann man durch Übereinanderlegen der Filme und Zusammenkopieren als Äquidensitogramm eine Äquidensitenschar erhalten (Abb. 2e), das – bezogen auf die Schwärzungsverteilung im Photogramm – der aus der Geographie bekannten Isohypsendarstellung des Bodenreliefs entspricht.

Wendet man den SABATTIER-Effekt bei jedem Kopiervorgang an, so erhält man „Sabattier-Äquidensiten höherer Ordnung“ [10, 12]. Eine solche „mehrfache SABATTIER-Äquidensitenttransformation“ lässt Schlüsse auf die den einzelnen Äquidensiten entsprechende Schwärzung nur zu, wenn gleichzeitig mit dem Photogramm ein Eichgraukeil mitkopiert wird (Abb. 3).

Es ist auch möglich, Scharen von SABATTIER-Äquidensiten ohne Zwischenkopien auf einem als „Äquidensiträger“ dienenden Photomaterial zu erzeugen. Hierzu wird das Trägermaterial mit Entwicklerflüssigkeit getränkt, auf eine Glasplatte oder Folie gezogen und in nassem Zustande fraktioniert mit Zwischenpausen von etwa 1 min durch das zu transformierende Photogramm belichtet, wobei die Lichtmengen der möglichst kurzzeitig erfolgenden Einzelbelichtungen nach einer geometrischen Progression (etwa Faktor 2) größer werden (Abb. 4). Dieses (nicht sehr gut reproduzierbare) Verfahren, das ein unscharfes Äquidensitogramm liefert, kann wegen der aufeinanderfolgenden Erzeugung der einzelnen Äquidensiten als „sukzessive Sabattier-Äquidensitentranformation“ bezeichnet werden.



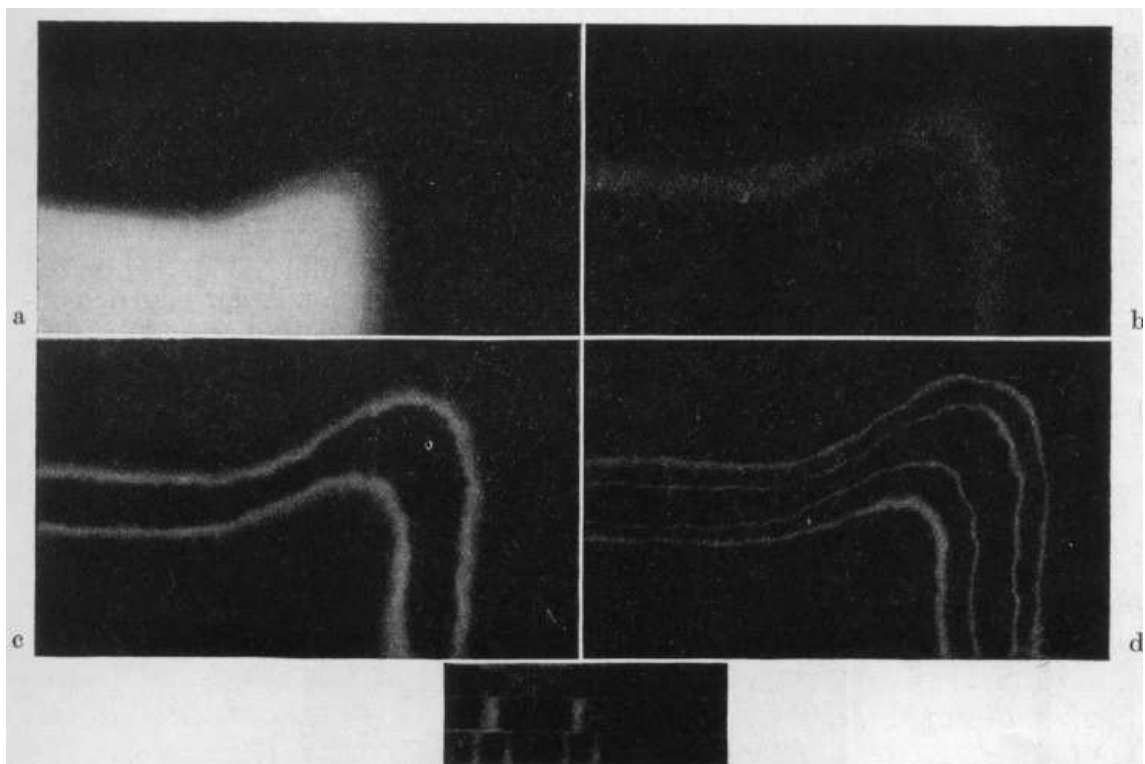


Abb. 3. Herstellung eines Äquidensitogramms 3. Ordnung

a) Photogramm (wie in Abb. 2a). b) 1. Äquidensitentransformation (mit Hilfe des Clayden-Effektes). c) 2. Äquidensitentransformation (Sabattier-Effekt). d) 3. Äquidensitentransformation (Sabattier-Effekt)

Unten: Äquidensiten des Eichgraukeils zu b, c und d

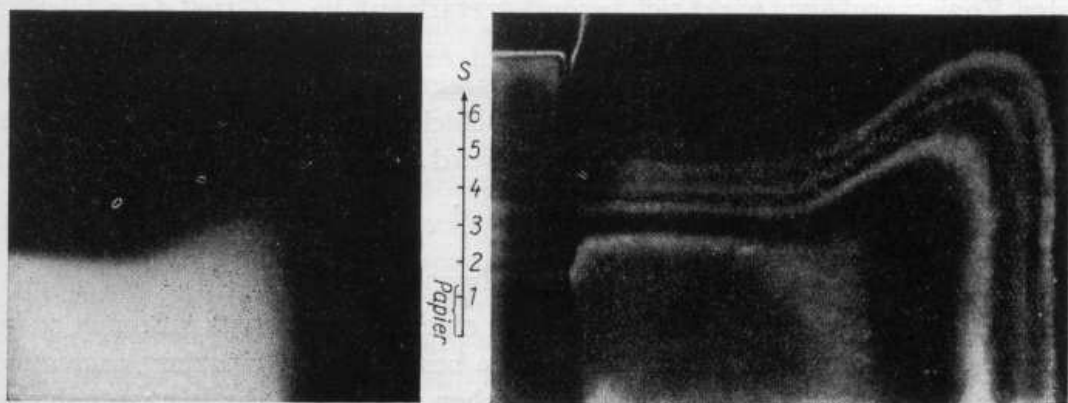


Abb. 4. $\log E_1 - \log E_2$ -Schwärzungsfläche des Clayden-Effektes (a) und dazugehöriges Äquidensitogramm (b) mit einkopiertem Eichgraukeil. Mehrfachäquidensiten durch wiederholte Anwendung des Sabattier-Effektes

Bei der Erzeugung von „Äquidensiten höherer Ordnung“ ist es oft nützlich, die erste Äquidensitentransformation nicht mit dem SABATTIER-Effekt, sondern mit dem CLAYDEN-Effekt vorzunehmen. Die CLAYDEN-Äquidensite [12] ist viel breiter als die SABATTIER-Äquidensite (Abb. 5), so dass mit der ersten Äquidensitentransformation ein wesentlich größerer Schwärzungsbereich erfasst werden kann.

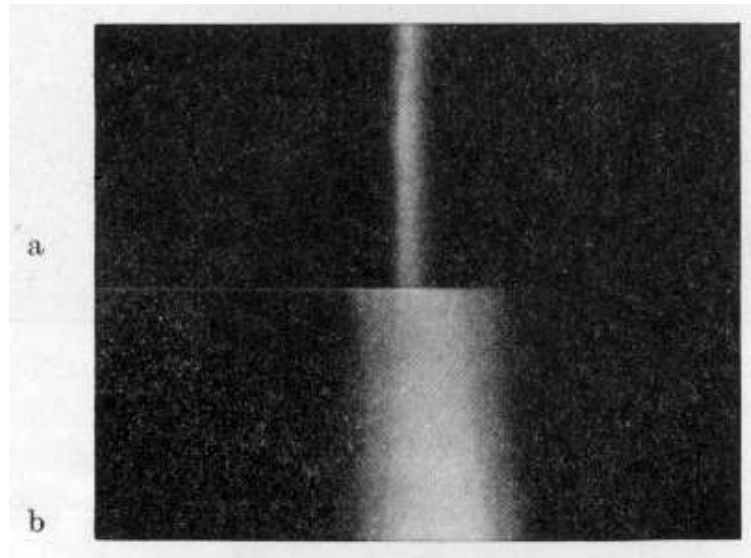


Abb. 5. Vergleich einer durch den Sabattier-Effekt (a) und durch den Clayden-Effekt (b) gewonnenen Äquidensite

Außerdem zeichnet sich die CLAYDEN-Äquidensite durch eine feinere Kornstruktur aus als die SABATTIER-Äquidensite, deren positive Flanke durch den chemischen Partialeffekt [10, 12] stark zerfranst erscheint. Die Körnigkeit bei den ersten Kopiervorgängen wirkt sich besonders stark auf die „Glätte“ der schließlich resultierenden Äquidensite aus.

Die Hervorhebung von Äquidensiten aus einem Photogramm ist auch durch spezielle chemische Behandlung der Photoschicht möglich. Über eine derartige „chemische Äquidensitentransformation“ wird an anderer Stelle dieser Zeitschrift berichtet [Z. wiss. Phot. 62, 95 (1968)].

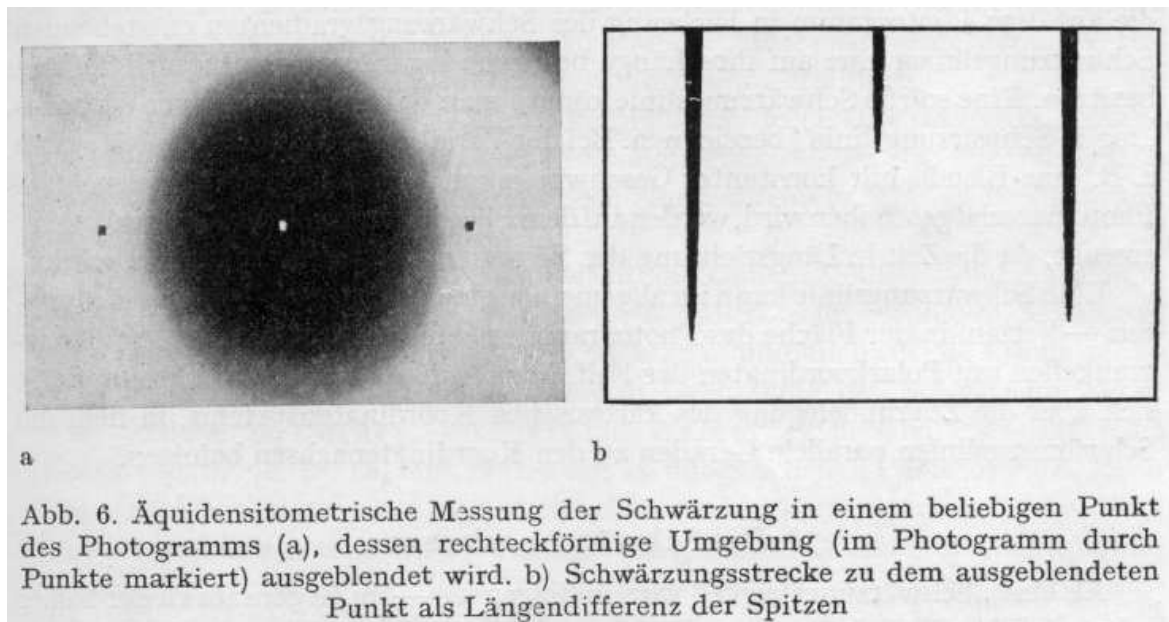
5. Der Schwärzungspunkt

Die flächenhafte Schwärzungsverteilung eines Photogramms lässt sich so beschreiben, dass jedem Punkt der Fläche eine bestimmte Schwärzung zugeordnet ist. Wegen der diskontinuierlichen, statistischen Verteilung der Pigmente der geschwärzten Schicht ist die Definition eines „Schwärzungspunktes“ nur mit einer gewissen endlichen Umgebung des Punktes sinnvoll, in der die Schwärzung gemittelt wird. Die statistische Schwankung der in einem Punkt des Photogrammes gemessenen Schwärzung hängt von der Größe der in die Schwärzungsmessung miteinbezogenen Umgebung des Punktes ab.

Tastet man ein Photogramm mit einer photometrischen Sonde ab, bei der nur eine kleine Fläche in der Umgebung des bezüglich seiner Schwärzung auszumessenden Punktes im Photogramm vom Messlicht durchleuchtet wird, so kann man ganze Folgen von Schwärzungspunkten erfassen. Sind die Schwärzungspunkte in ihrem Schwärzungsbetrag gleich, so ist die Verbindungslinie dieser Punkte eine Äquidensite. Jede beliebige andere zusammenhängende Schwärzungspunktfolge im Photogramm ist eine „Schwärzungslinie“ (s. 7.!).

6. Die Schwärzungsstrecke

Man kann den Schwärzungsbetrag des Schwärzungspunktes mit Hilfe eines Graukeiles nach Gl. (3) als Länge messen. Diese Länge wird als „Schwärzungsstrecke“ bezeichnet.



Die Schwärzungsstrecke zu einem Schwärzungspunkt wird erhalten, indem z. B. der zu messende Schwärzungspunkt durch eine kreisförmige oder besser rechteckige Blende aus dem Photogramm ausgeblendet und dann mit konstanter Beleuchtung und konstanter Geschwindigkeit in Richtung des Schwärzungsgradienten über einen schwärzungslinearen Graukeil bewegt wird, unter dem sich ein Photomaterial als Äquidensitenträger befindet (Abb. 6).

Erstreckt sich die Schwärzung konstant über eine Fläche, deren Lineardimension größer als S/D ist, so kann man sie durch die in Abb. 1 dargestellte Mäanderkurve bestimmen. Die Sprunghöhe der Mäanderkurve ist im Grunde genommen auch eine Schwärzungsstrecke.

7. Die Schwärzungslinien

Eine „Schwärzungslinie“ ist definiert als eine eindimensional zusammenhängende Folge von Schwärzungspunkten in einem Photogramm. Es gilt daher für die Schwärzungslinie in gleicher Weise wie für den Schwärzungspunkt, dass sie nur unter Einbeziehung einer gewissen endlichen Umgebung sinnvoll definiert werden kann.

Die Variation der Schwärzung längs einer Schwärzungslinie ist ebenfalls eindimensional, kann also im einfachsten Falle von nur einem Parameter abhängen. Handelt es sich bei diesem Parameter um eine unabhängige Variable der Schwärzungsfunktion, die eine gesetzmäßige Zuordnung zu den Koordinaten der Schwärzungslinie besitzt, so kann dieser variierte Parameter zur Kennzeichnung der Schwärzungslinie dienen. Belichtet man z. B. ein Photomaterial durch einen schwärzungslinaren Graukeil, so verändert sich die Intensität des durch den Keil hindurchtretenden Lichtes in Abhängigkeit von der in Richtung des Schwärzungsgradienten gemessenen Keillänge nach einer Exponentialfunktion [8, 12], d. h., die an der Keillänge abgelesene Intensitätsskala folgt der inversen Funktion, so dass die auf dem Photogramm in Richtung des Schwärzungsgradienten entstehenden Schwärzungslinien eine auf ihre Länge bezogene logarithmische Intensitätsskala besitzen. Eine solche Schwärzungslinie könnte man daher in eindeutiger Weise als „log E -Schwärzungslinie“ bezeichnen. Bei der Variation der Belichtungszeit, wenn z. B. eine Blende mit konstanter Geschwindigkeit vor das konstant beleuchtete Photomaterial geschoben wird, werden auf dem Photogramm „ t -Schwärzungslinien“ erzeugt, da die Zeit in Längsrichtung der Schwärzungslinie linear variiert wird.

Eine Schwärzungslinie kann im allgemeinen einen beliebigen – auch gekrümmten – Verlauf in der Fläche des Photogramms nehmen. Dies wäre z. B. bei Kreisgraukeilen mit Polarkoordinaten der Fall. Für sensitometrische Zwecke empfiehlt sich aber die Zugrundelegung des kartesischen Koordinatensystems, in dem die Schwärzungslinien parallele Geraden zu den Koordinatenachsen befolgen.

8. Die Schwärzungskurven

Als eine „Schwärzungskurve“ wird im folgenden – im Gegensatz zu der bisher gebräuchlichen Terminologie (s. Einleitung!) – die Darstellung der Schwärzung als Ordinatenlänge in Abhängigkeit von dem auf der Abszisse abgetragenen variierten Parameter der Schwärzungsfunktion definiert.

Andere Darstellungsmöglichkeiten der Schwärzungsfunktion – z. B. in Form von Tabellen oder einer digitalen Datenspeicherung –, für die häufig auch der Begriff „Schwärzungskurve“ verwendet wird, bleiben hier außer Betracht.

Die Klassifizierung der Schwärzungskurven erfolgt wie bei den Schwärzungslinien durch Voranstellen des die Abszissenteilung bestimmenden variierten Parameters. Die „Schwärzungskurve bei Intensitätsvariation“ (nach bisheriger Terminologie) bekommt somit die kürzere Bezeichnung „log E -Schwärzungskurve“. Ist die Abszisse nach dekadischen Logarithmen geteilt, so ist auch die Bezeichnung „lg E -Schwärzungskurve“ zutreffend.

Mit dieser Terminologie ist eine Unterscheidung der verschiedensten Schwärzungskurven möglich. Die „Schwärzungskurve bei Zeitvariation“, die der Empfindlichkeitsbestimmung des Photomaterials nach Scheiner zugrunde lag, kann man hiernach als „log t -Schwärzungskurve“ bezeichnen. Diese ist zu unterscheiden von der „ t -Schwärzungskurve“, bei der die Zeit linear variiert wird. Solche t -Schwärzungskurven werden im allgemeinen bei der Filmdosimetrie ionisierender Strahlungen benutzt.

Aber nicht nur durch die Parameter der Belichtung können Schwärzungskurven beschrieben werden; es können z. B. auch Schwärzungskurven aufgenommen werden, bei denen nur Parameter der Entwicklung als Variable auftreten. Nach dem oben Gesagten beschreibt eine „ c -Schwärzungskurve“ die Abhängigkeit der Schwärzung von der Konzentration des Entwicklers und eine „ T -Schwärzungskurve“ die Abhängigkeit von der Temperatur des Entwicklers. Belichtungszeit und Entwicklungszeit sind durch Indizes zu unterscheiden. So kennzeichnet eine „ $t_{\text{Entw.}}$ -Schwärzungskurve“ die Abhängigkeit der Schwärzung von der Entwicklungszeit. Empfindlichkeitskurven des Photomaterials sind „ λ -Schwärzungskurven“. Diese Auswahl der Beispiele möge genügen, um das Prinzip der hier vorgeschlagenen Terminologie zu erläutern.

Schwärzungskurven wurden bisher vornehmlich durch eine diskontinuierliche Folge von Messwerten aufgenommen. Photometriergeräte, die eine kontinuierliche Folge von Messwerten aufzeichnen, müssen eine Schreibvorrichtung besitzen und sind dementsprechend kostspielig.

Zuverlässig und billig sind die äquidensitometrischen Methoden der Aufnahme von Schwärzungskurven, die in den meisten Fällen ohne besondere Schwierigkeiten angewendet werden können. Das wichtigste und auch für die Praxis geeignetste Verfahren zur äquidensitometrischen Gewinnung der Schwärzungskurve dürfte die von LUTHER, GOLDBERG und WEIGERT [9] bereits 1911 angegebene „Graukeilmethode“ [8,12] sein, bei der das zu untersuchende Photomaterial durch einen schwärzungslinearen Graukeil belichtet und sodann verarbeitet wird. Das so erhaltene Photogramm wird dann mit dem gleichen Graukeil in solcher Weise zur Deckung gebracht, dass die Schwärzungsgradienten von Graukeil und Photogramm einen rechten Winkel miteinander bilden, und beide werden zusammen auf ein Äquidensiten-Trägermaterial kopiert. Die Schwärzungskurve bildet sich dann als Hell-Dunkel-Äquidensite aus (Abb. 7). Durch weitere Kopier- und SABATTIER-Äquidensitenformationen erhält man die Schwärzungskurve als dunkle Linie auf hellem Grunde (Abb. 7d).

Die Schwärzungskurve kann auch als eine zusammenhängende Folge von Schwärzungsstrecken angesehen werden, so dass zwischen beiden eine analoge Beziehung besteht wie zwischen der Schwärzungslinie und dem Schwärzungspunkt. Demzufolge ist es – wie unter 6. beschrieben – auch möglich, eine Schwärzungslinie in eine Schwärzungskurve umzuwandeln, indem die Schwärzungslinie mit einer schmalen, spaltförmigen Blende aus dem Photogramm ausgeblendet und dann orthogonal zur Spaltrichtung mit konstanter Beleuchtung und konstanter Geschwindigkeit über das mit dem Graukeil (Schwärzungsgradient in Bewegungsrichtung) bedeckte Äquidensitenträger-Photomaterial hinwegbewegt wird.

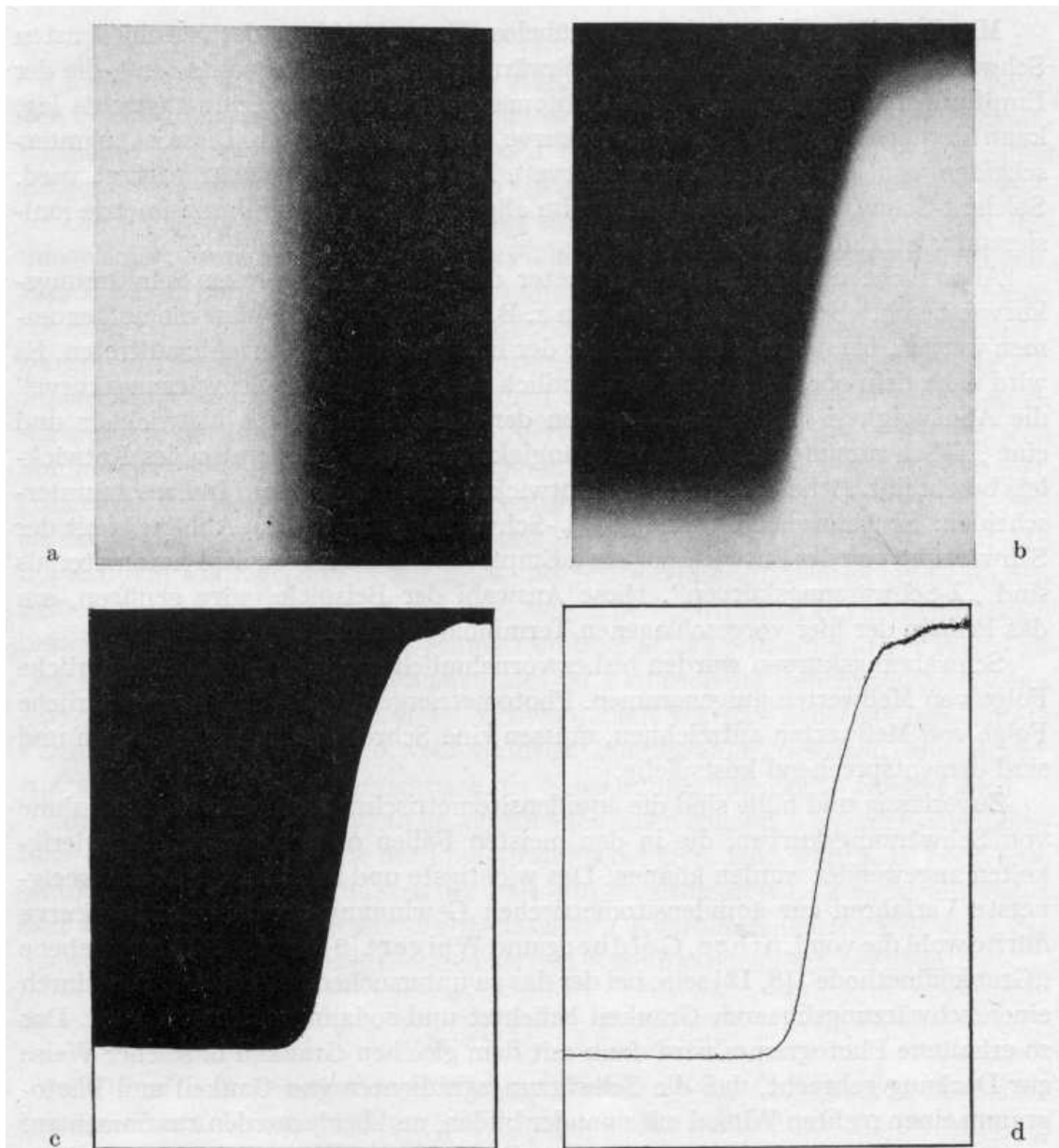
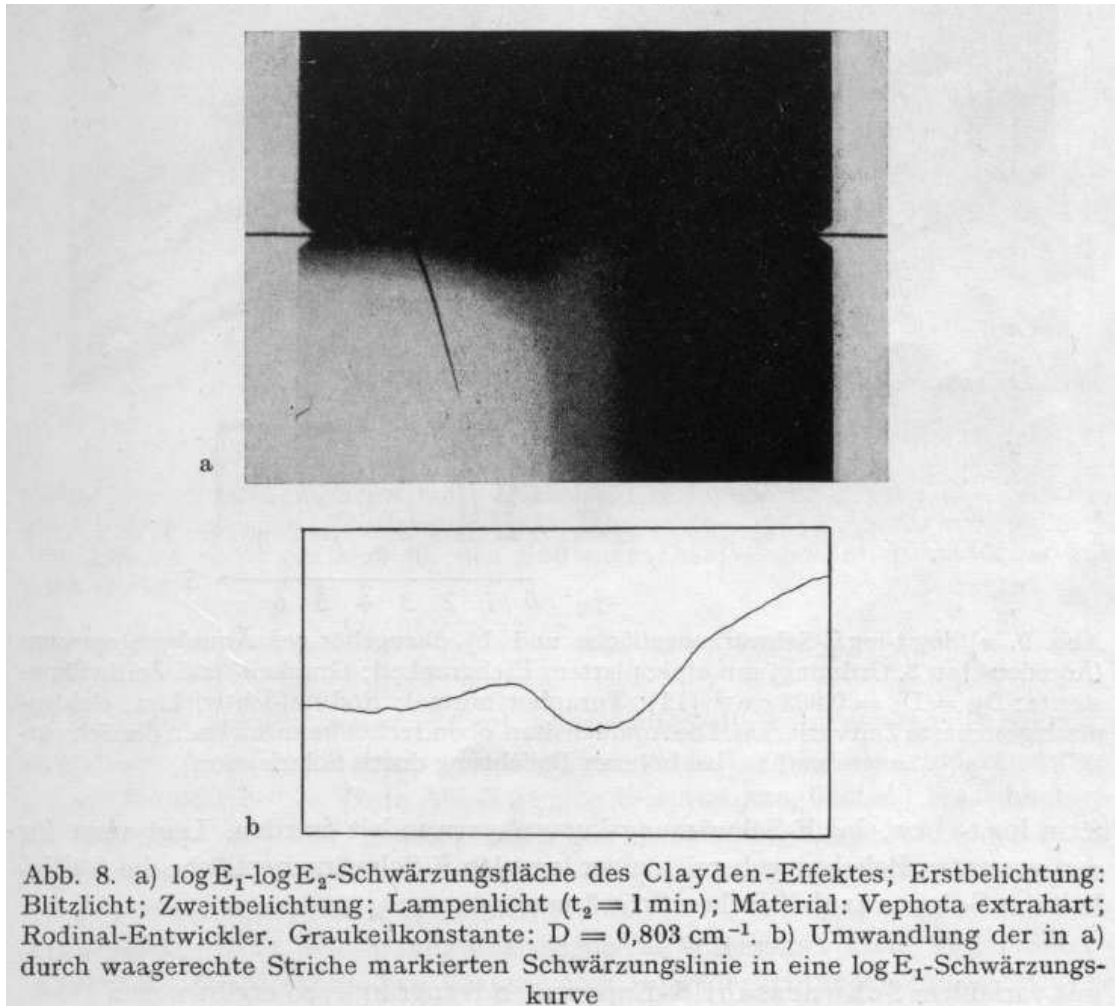


Abb. 7. Äquidensitometrische Gewinnung der log E-Schwärzungskurve

a) Kopie des Graukeils auf das zu untersuchende Photomaterial (log E-Schwärzungsfläche). Daten: Belichtungszeit 2 min, Graukeilkonstante¹⁾ $D = 0,803 \text{ cm}^{-1}$, Rodinal-Entwickler, Entwicklungszeit 3 min. Material: ORWO FU 5. b) Kopie der Überlagerung von a) mit dem gleichen Graukeil, der schon zur Erzeugung von a) diente. Die log E-Schwärzungskurve bildet sich als unscharfe Hell-Dunkel-Äquidensite aus. c) Die log E-Schwärzungskurve als scharfe Hell-Dunkel-Äquidensite nach mehrmaligem Umkopieren von b). d) Durch Sabattier-Äquidensitentransformation und Umkopieren aus c) gewonnene log E-Schwärzungskurve

¹⁾ Die Keilkonstante des zur Gewinnung der Abb. 7, 8, 9, 10 und 11 verwendeten Graukeils betrug $D = 0,602 \text{ cm}^{-1}$. Die in den Abbildungstexten angegebenen Werte berücksichtigen den Verkleinerungsmaßstab der Reproduktion.

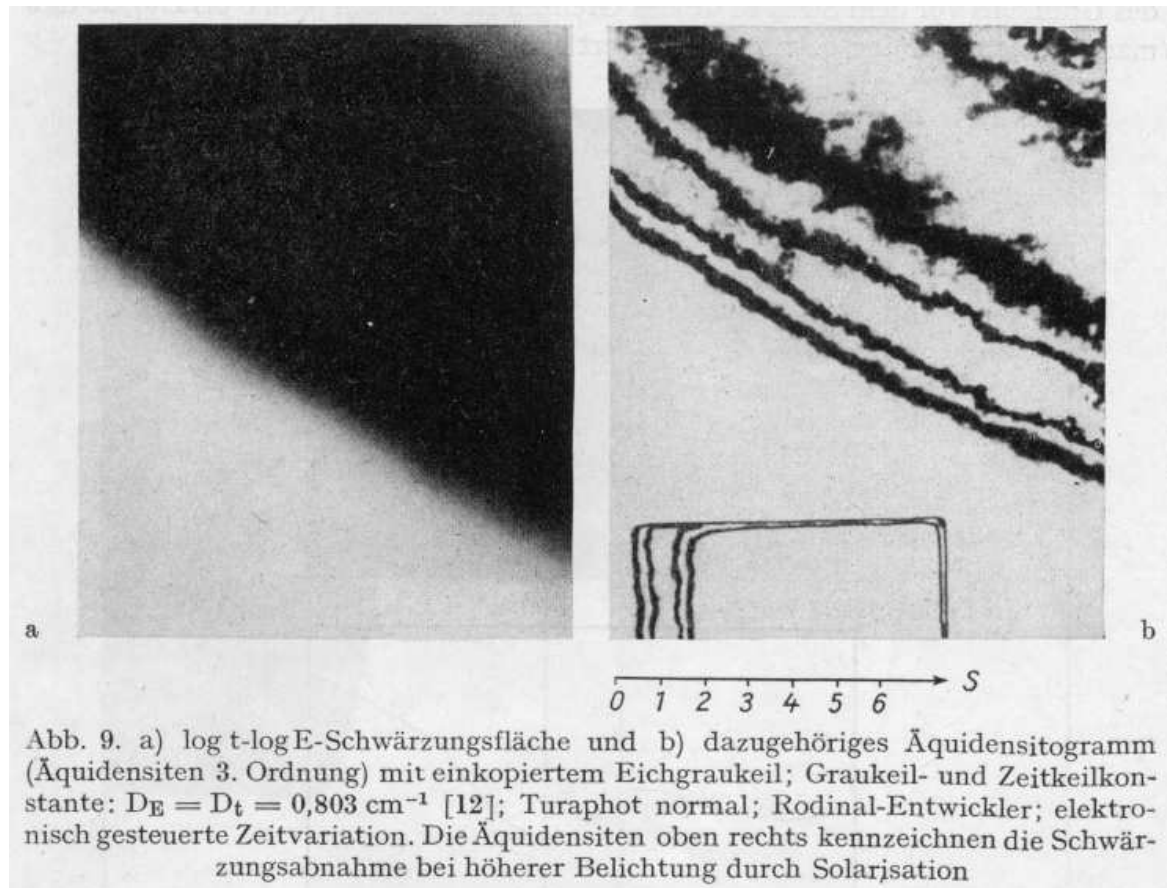
Abb. 8. zeigt ein Photogramm ($\lg E_1$ - $\lg E_2$ -Schwärzungsfläche des CLAYDEN-Effektes, s. Abschnitt 8!), aus dem die durch horizontale Striche markierte Schwärzungslinie ausgeblendet und nach dem oben angedeuteten Verfahren in eine Schwärzungskurve (Abb. 8b) verwandelt wurde. Es sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, dass es nach diesem Verfahren möglich ist, den Schwärzungsabfall längs der Spaltblende und damit die effektive Keilkonstante durch Drehung des Graukeils vor dem Spalt in weiten Grenzen zu variieren (von 0 bis D_E), so dass man sie leicht auf den gewünschten Wert einstellen kann.



9. Die Schwärzungsflächen

Photogramme, deren Schwärzung eine koordinatenmäßige Zuordnung zu maximal 2 Parametern der Schwärzungsfunktion besitzt, werden als „Schwärzungsflächen“ bezeichnet. So ist beispielsweise die Erfassung der Schwärzung als Funktion der beiden Parameter der Belichtung, Intensität E und Zeit t , für einen größeren, von den Linear-dimensionen und der Keilkonstante des Gaukeils abhängigen Belichtungsbereich durch eine „ $\log t$ - $\log E$ -Schwärzungsfläche“ (Abb. 9 a) möglich, auf deren Abszisse $\log t$ und deren Ordinate $\log E$ abgetragen ist.

Eine $\log t$ - $\log E$ -Schwärzungsfläche enthält alle mit der Zeit- und Intensitätsvariation der Belichtung zusammenhängenden sensitometrischen Eigenschaften des Photomaterials in dem erfassten Belichtungsbereich. Aus einer solchen Schwärzungsfläche können nach 7. beliebige Schwärzungslinien entnommen und nach 8. in $\log t$ - bzw. $\log E$ -Schwärzungskurven verwandelt werden.



Legt man für den gesamten Belichtungsbereich einer $\log t$ - $\log E$ -Schwärzungsfläche die Gültigkeit des Schwarzschildschen Schwärzungsgesetzes

$$Et^p = \text{const} \quad (14)$$

mit variablem Schwarzschild-Exponenten p zugrunde, so ergibt wegen

$$\log E = \text{const} - p \log t \quad (15)$$

die Neigung der Äquidensiten in jedem Punkte der $\log t$ - $\log E$ -Schwärzungsfläche den negativen Wert von p .

Für die rationelle Auswertung von $\log t$ - $\log E$ -Schwärzungsflächen eignen sich daher besonders gut Äquidensitendarstellungen, wie sie von ARENS 1930 [1, 7, 8] mit der Bezeichnung „Schwärzungsflächen“ eingeführt wurden. Die ARENSsche „Schwärzungsfläche“ erhält hier den terminus „ $\log t$ - $\log E$ -Äquidensitogramm“ (Abb. 9b). Der Begriff der „Schwärzungsfläche“ wurde bisher unnötig auf die „ $\log t$ - $\log E$ -Schwärzungsfläche“ eingengt.

Für die Variation zweier Parameter der Schwärzungsfunktion, die stets durch eine Schwärzungsfläche zu erfassen ist, ergeben sich noch die mannigfaltigsten Kombinationsmöglichkeiten.

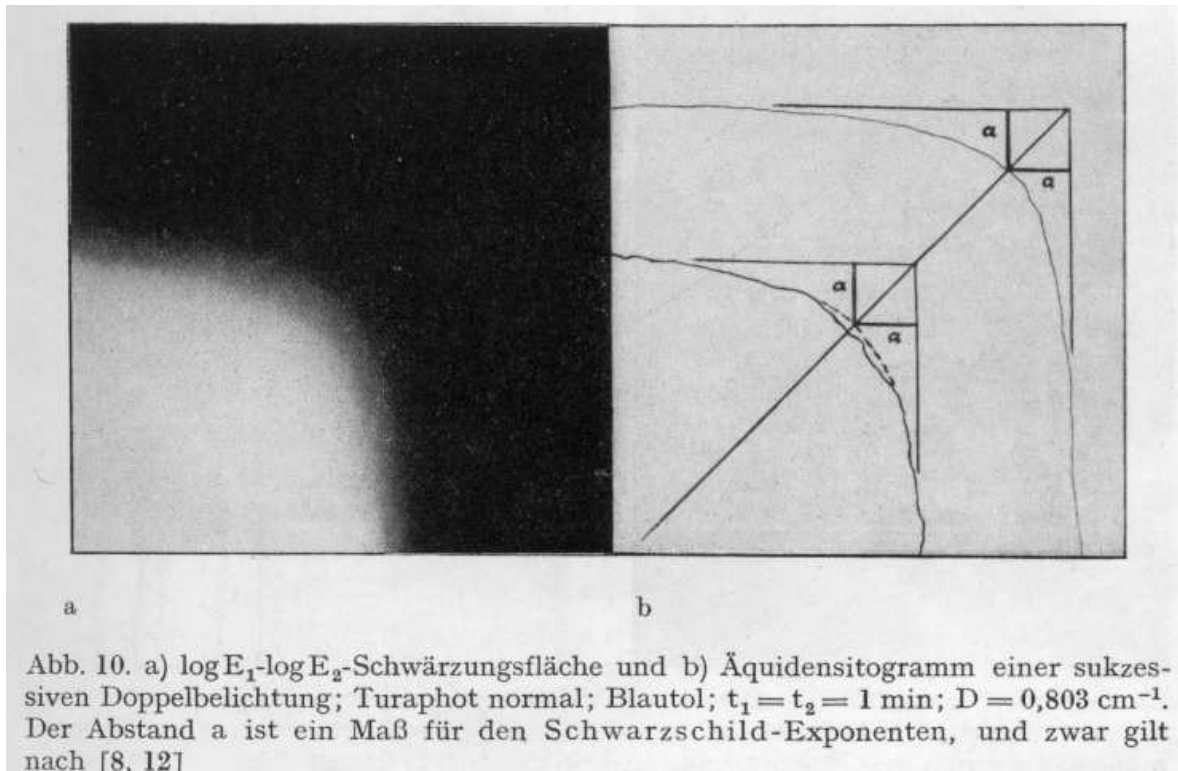


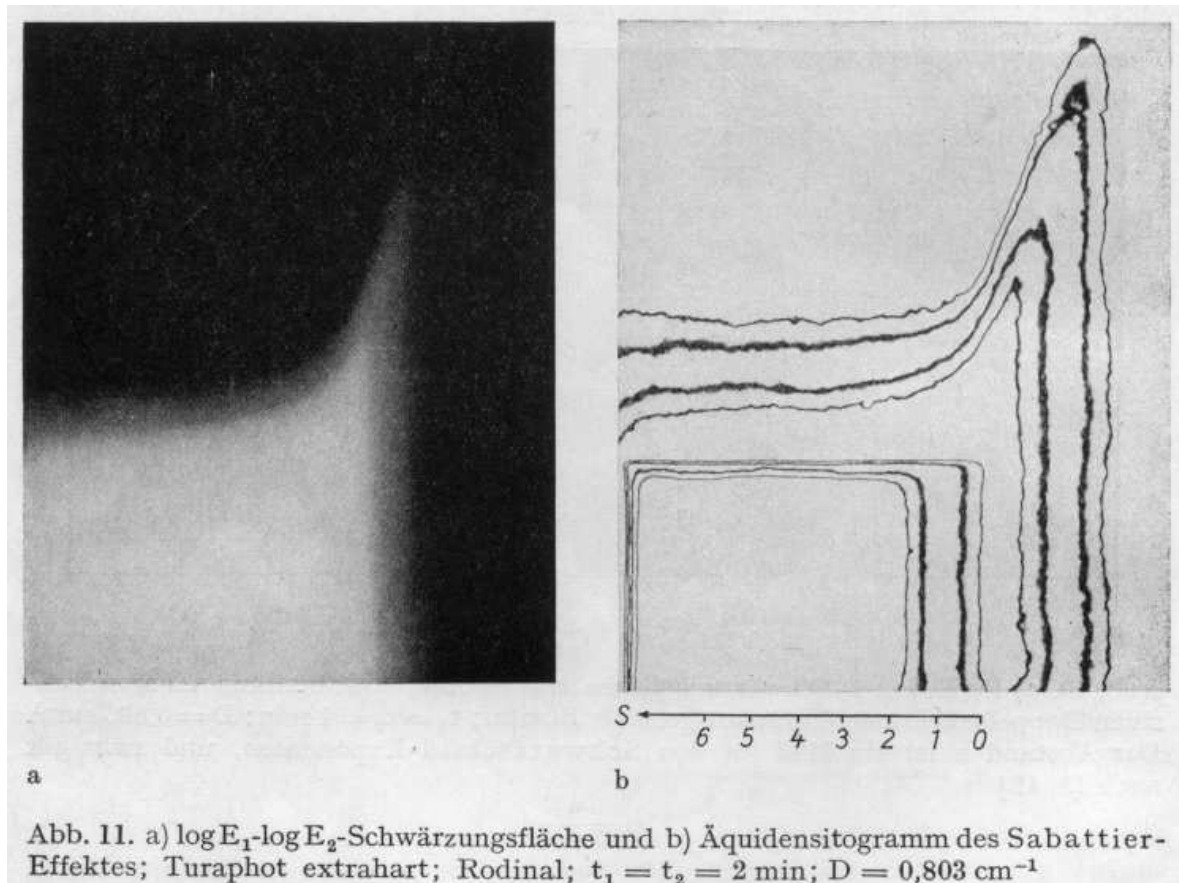
Abb. 10. a) $\log E_1$ - $\log E_2$ -Schwärzungsfläche und b) Äquidensitogramm einer sukzessiven Doppelbelichtung; Turaphot normal; Blautol; $t_1 = t_2 = 1$ min; $D = 0,803 \text{ cm}^{-1}$. Der Abstand a ist ein Maß für den Schwarzschild-Exponenten, und zwar gilt nach [8, 12]

$$p = \frac{aD}{\lg 2}$$

Wird nur ein Parameter variiert, so verlaufen alle Äquidensiten der Schwärzungsfläche parallel. Ein solches Photogramm (Abb. 7 a) wird als „einparametrische Schwärzungsfläche“ (z. B. in Abb. 7 a: „ $\log E$ -Schwärzungsfläche“) bezeichnet – im Gegensatz zu einer „zweiparametrischen Schwärzungsfläche“, bei der beide Dimensionen der Fläche zur koordinatenmäßigen Variation von zwei Parametern der Schwärzungsfunktion ausgenutzt werden.

Zweiparametrische Schwärzungsflächen können besonders vorteilhaft zur Untersuchung der photographischen Wirkung von Doppelbelichtungen eingesetzt werden. Wird bei jeder einzelnen Belichtung durch den Gaukeil nur die Intensität variiert, wobei die beiden Lagen des Gaukeils bei den jeweiligen Belichtungen einen rechten Winkel miteinander bilden, so erhält man eine $\log E_1$ - $\log E_2$ -Schwärzungsfläche“ (Abb. 10a), deren Äquidensiten den charakteristischen [12] hyperbelähnlichen Verlauf wie in Abb. 10b zeigen.

Abweichungen von dem hyperbelähnlichen Verlauf der Äquidensiten deuten auf die Wirkung photographischer Effekte hin, die ja zum größten Teil Doppelbelichtungseffekte sind. Man kann die zweiparametrischen Schwärzungsflächen geradezu zur Demonstration der photographischen Effekte verwenden. $\log E_1$ - $\log E_2$ -Schwärzungsflächen des CLAYDEN-Effektes wurden beispielsweise für die zugrundeliegenden Photogramme der Abb. 2, 3, 4, 6 und 8 verwendet.



Die $\log E_1$ - $\log E_2$ -Schwärzungsfläche des SABATTIER-Effektes hat ein ähnliches Aussehen wie die des CLAYDEN-Effektes, nur dass sich das Schwärzungsminimum in Richtung der Zweitbelichtung als wesentlich schmalere Einbuchtung bis in sehr hohe Schwärzungen erstreckt (Abb. 11).

Auch die $\log t_1$ - $\log E_2$ -Schwärzungsfläche des VILLARD-Effektes, bei dem die Röntgenbestrahlung durch eine exponentielle Zeitvariation und die Langzeitnachbelichtung mit Glühlampenlicht durch einen Graukeil vorgenommen wird, besitzt ein ähnliches Aussehen wie die $\log E_1$ - $\log E_2$ -Schwärzungsfläche des CLAYDEN-Effektes. Ein ganz anderes Erscheinungsbild bietet die $\log E_1$ - $\log E_2$ -Schwärzungsfläche des HERSCHEL-Effektes (Abb. 12a), bei dem die Erstbelichtung mit aktinischem und die Zweitbelichtung mit rotem Dunkelkammerlicht jeweils durch den gleichen Graukeil vorgenommen wird.

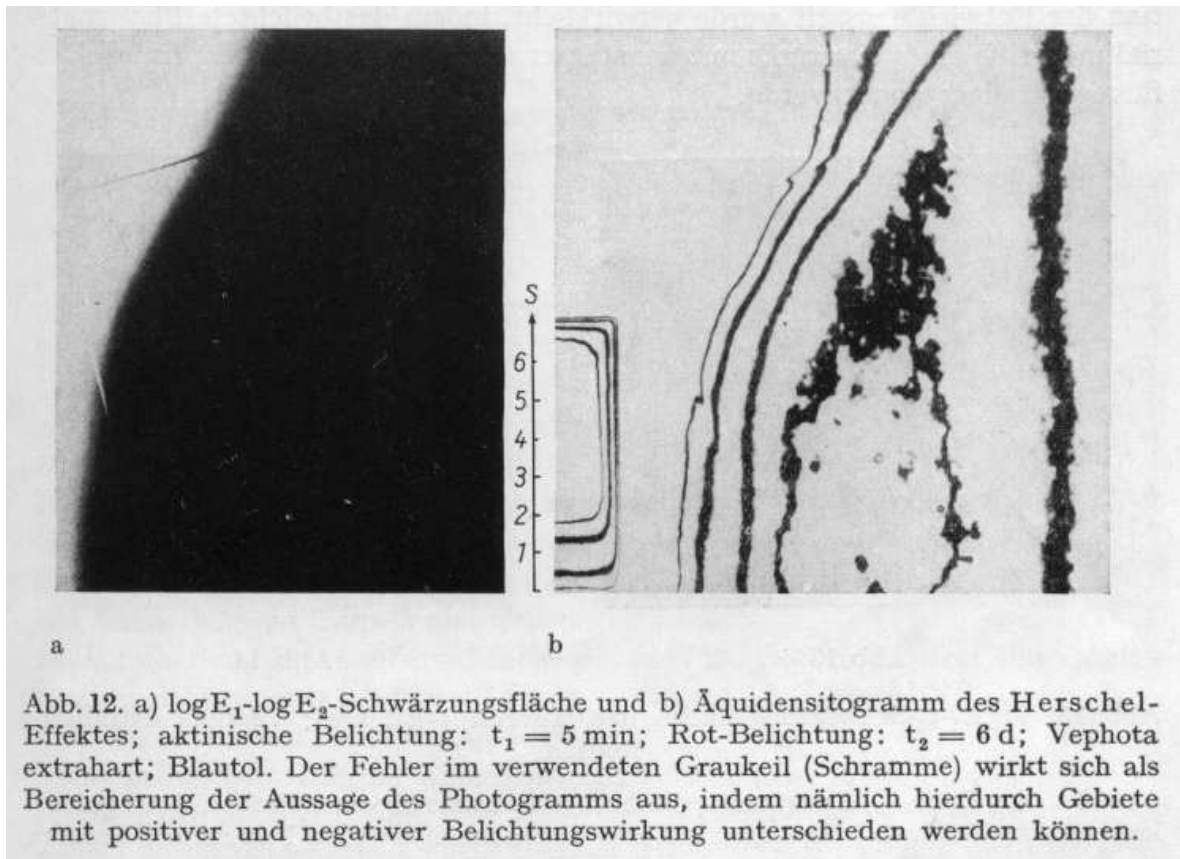
Die Äquidensiten des $\log E_1$ - $\log E_2$ -Äquidensitogramms in Abb. 12b zeigen in einem größeren Belichtungsgebiet einen annähernd geradlinigen Verlauf. Ausgehend von der daraus zu entnehmenden linearen Gleichung

$$\log E_2 = r \log E_1 + \text{const}, \quad (16)$$

in der r für einen gewissen Bereich als annähernd konstant angesehen werden kann, lässt sich für den HERSCHEL-Effekt ein Schwärzungsgesetz angeben,

$$E_1^{-r} E_2 = \text{const}, \quad (17)$$

das formal dem SCHWARZSCHILD'schen Schwärzungsgesetz entspricht. Die Größe r kann dann als „HERSCHEL-Exponent“ bezeichnet werden. Es sei noch bemerkt, dass entsprechende Gesetze auch für begrenzte Belichtungsgebiete des CLAYDEN-, des VILLARD- und des SABATTIER-Effektes formuliert werden können.



Zwei weitere Beispiele sollen die Fülle der Kombinationsmöglichkeiten für zweiparametrische Schwärzungsflächen deutlich werden lassen:

Abb. 13 zeigt eine $\log E_1 - t_2$ -Schwärzungsfläche des HERSCHEL-Effektes, bei dem die Erstbelichtung mit Lampenlicht durch einen Graukeil und die Zweitbelichtung bei rotem Dunkelkammerlicht mit gleichmäßig (von einem Uhrwerk angetrieben) über das Photomaterial bewegter Blende (lineare Zeitvariation) vorgenommen wurde.

Die Äquidensiten dieser Schwärzungsfläche sind in der Koordinatenlage nach Abb. 13 als Exponentialfunktionen zu beschreiben. Als Beispiel für die Kombination eines Belichtungs- und eines Entwicklungsparameters wird schließlich noch eine $\log E - t_{\text{Entw.}}$ -Schwärzungsfläche angeführt. Die Belichtung wurde in üblicher Weise mit einem Graukeil bei Glühlampenlicht vorgenommen. Die lineare Variation der Entwicklungszeit wurde verwirklicht, indem das belichtete Photomaterial mit Hilfe eines Uhrwerks mit konstanter Geschwindigkeit in die Entwicklerflüssigkeit eingetaucht wurde.

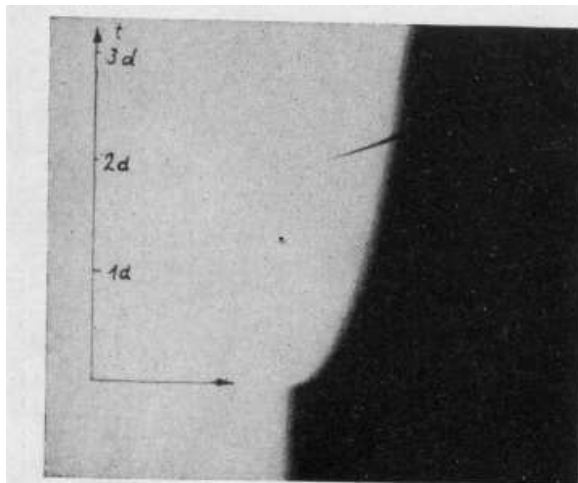


Abb. 13

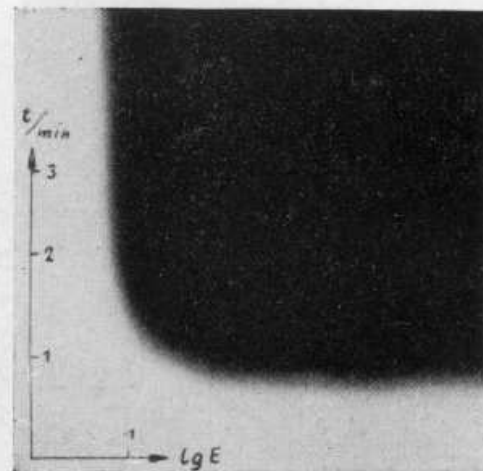


Abb. 14

Abb. 13. $\log E_1 - t_2$ -Schwärzungsfläche des Herschel-Effektes; Vephota extrahart; Rodinal

Abb. 14. $\log E_1 - t_{\text{Entw.}}$ -Schwärzungsfläche; einparametrig-unendliche Mannigfaltigkeit von $\log E$ -Schwärmungslinien mit der Entwicklungszeit als Parameter; Vephota extrahart; Rodinal

In den zweiparametrischen Schwärzungsflächen sind ganze Versuchsserien, die sonst nur durch Scharen von Schwärzungskurven dargestellt werden können, vereinigt. Aus der Schwärzungsfläche, die eine gute Übersicht über das von der Belichtung erfasste Gebiet erlaubt, können die interessierenden Schwärzungslinien bzw. -kurven „ausgeblendet“ werden. Aus Abb. 14 entnimmt man z. B. eine Schar von $\log E$ -Schwärmungskurven mit der Entwicklungszeit als Parameter, indem man einige Schwärzungslinien parallel zur $\log E$ -Achse „ausblendet“.

Die Anwendung zweiparametrischer Schwärzungsflächen in der Sensitometrie und bei der wissenschaftlichen Erforschung photographischer Phänomene ermöglicht in einer Vielzahl von Fällen große Einsparungen an Photomaterial und Arbeitszeit. Daneben sind auch die Vorteile der gleichartigen Verarbeitung der kleinflächigen, zu untersuchenden Photoschicht, die alle, sonst nur durch viele Einzelversuche zu ermittelnden Informationen enthält, nicht zu übersehen. Eine zweiparametrische Schwärzungsfläche kann sogar als ein auf kleinstem Raum untergebrachtes Dokument bzw. als ein Qualitätsbeleg für die sensitometrischen Eigenschaften des Photomaterials verwendet werden.

9. Die Schwärzungsreliefs

Für die Darstellung der Schwärzung als Ordinate in Abhängigkeit von 2 unabhängigen Variablen benötigt man ein dreidimensionales Koordinatensystem. Derartige „Schwärzungsreliefs“ wurden von ARENS [1] aus Gips hergestellt.

Für eine ebene Darstellung genügt es häufig, eine Schar von Äquidensiten, die die Isohypsen des Schwärzungsreliefs repräsentieren, in die von den Koordinaten der unabhängigen Variablen aufgespannte Ebene zu projizieren. Hierdurch erhält man das bekannte „Äquidensitogramm“ der Schwärzungsfläche.

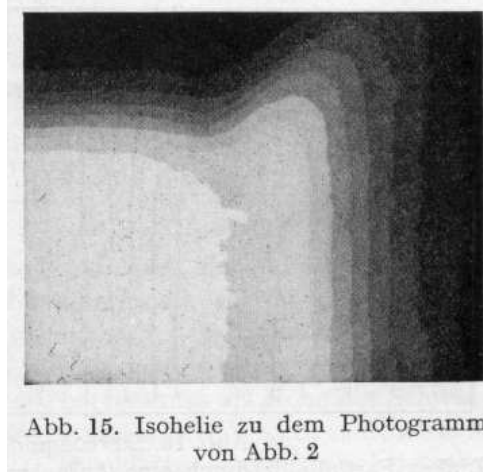


Abb. 15. Isohelie zu dem Photogramm von Abb. 2

Ein übersichtliches Äquidensitogramm, dessen Äquidensiten bestimmten Schwärzungen des Photogramms zugeordnet werden, reicht im allgemeinen – wie man es auch vom Lesen der Landkarten mit Isohypsendarstellung des Bodenreliefs gewöhnt ist – aus, um sich eine Vorstellung von der Gestalt des dazugehörigen Schwärzungsreliefs zu verschaffen. Bei unübersichtlichen Äquidensitogrammen wird von RAKOW [13] empfohlen, die einzelnen Äquidensiten einzufärben. Hiermit nähert man sich bereits der in der Kartographie gebräuchlichen Kennzeichnung der Höhe der Bodenoberfläche über dem Meeresspiegel durch verschiedene Farbtönungen. Dieses Prinzip könnte auch bei nicht zu vielen Äquidensiten des Äquidensitogramms eingehalten werden, indem man den Äquidensiten unterschiedliche, mit der durch sie bezeichneten Schwärzung progressive Grauwerte gibt. Übersichtlicher ist in diesem Falle die Auffüllung der Flächen zwischen zwei benachbarten Äquidensiten durch Graufelder (Abb.15).

Ein derartiges Äquidensitogramm besitzt das Aussehen eines Photogramms mit schollenartiger Überschichtung der geschwärzten Flächen. Die Zuordnung der Schwärzungen ist daher besonders einfach. Die Randlinien zwischen den verschiedenen Graufeldern sind die Äquidensiten. Bezüglich der Durchführung dieses als „Isohelie“ bekannten Bildtransformationsverfahrens sei auf das Schrifttum [14 bis 19] verwiesen.

Jedes Photogramm ist im übrigen – Ebenheit und Homogenität der Schicht vorausgesetzt – ein reales Schwärzungsrelief. Durch den von der Belichtung abhängigen, in den einzelnen Bildpartien unterschiedlichen Silberverlust nach dem Fixieren tritt eine mehr oder weniger starke Schrumpfung der Schichtdicke ein, die mit einem Interferenzmikroskop zur Aufnahme von Äquidensitenscharen in Gestalt von Interferenzstreifen benutzt werden kann.

Dieses von LAU, KRUG u. Mitarb. [20,10] entwickelte „Schwärzungsplastik-Verfahren“ bleibt im wesentlichen auf Flächen von höchstens 1 cm^2 beschränkt, da eine Zuordnung der Interferenz-Äquidensiten zu bestimmten Schwärzungen nur bei ebenen Schichten möglich ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Veranschaulichung des Schwärzungsreliefs eines Photogramms ist durch die „Stereo-Äquidensiten“ gegeben. Die Erschließung der dritten Dimension zur übersichtlichen Darstellung von Schwärzungsverteilungen dürfte besonders bei komplizierten Photogrammen vorteilhaft sein, da beispielsweise Schwärzungsmaxima und -minima gleichartige Äquidensitenbilder ergeben. Überdies ist es mit dem Rot-Grün-Anaglyphenverfahren möglich, unmittelbare Messungen an dem Schwärzungsrelief vorzunehmen [12].

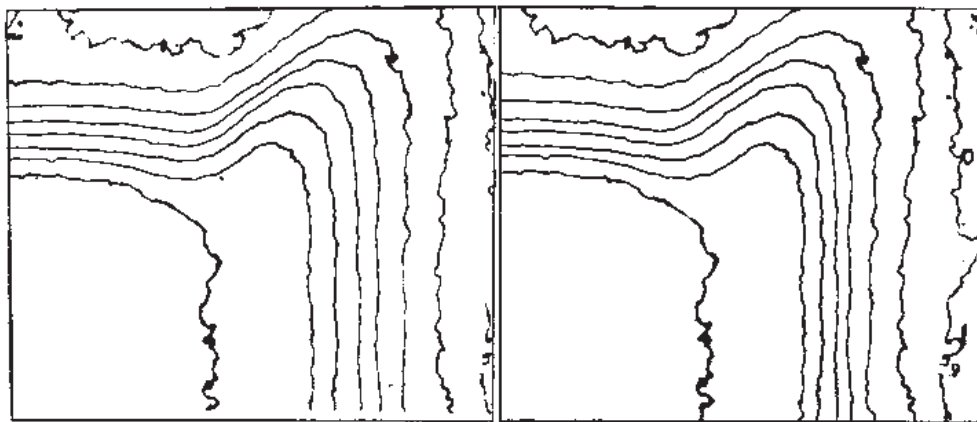


Abb. 16. Stereoäquidensitogramm zu Abb. 2
Linkes Partialbild: durch eine Aufnahmeserie gewonnenes (unverschobenes) Äquidensitogramm (Abb. 2e); rechtes Partialbild: seitliche Verschiebung der Äquidensiten proportional zu der durch sie angegebenen Schwärzung

Die stereoskopische Darstellung einer Fläche im Raum verlangt eine Aufgliederung der Fläche in eine möglichst große Zahl von Strukturelementen. Bei einem natürlichen Stereobild ist diese Aufgliederung allein schon durch die Linienführung der abgebildeten Gegenstände gegeben.

Als Strukturelemente der Oberfläche des Schwärzungsreliefs kommen alle Linien auf eben dieser Fläche in Betracht, also beispielsweise die Projektion des zweiparametrischen Koordinatennetzes auf die darüber gewölbte Fläche, aber auch die Äquidensiten, die in ihrer richtigen Höhenlage wiedergegeben werden. Die alleinige Verwendung des Koordinatennetzes zur Strukturierung des Stereobildes ist ungünstig, da wegen der Gleichartigkeit der Strukturelemente bei der Stereobetrachtung Zuordnungsschwierigkeiten auftreten und falsche Verschmelzungen der Partialbilder entstehen. Verwendet man dagegen die Äquidensiten als Strukturelemente des Stereobildes, so ist wegen der im allgemeinen individuellen Gestalt der einzelnen Äquidensiten die Zuordnung und Verschmelzung eindeutig – selbst für den ungeübten Betrachter.

Gibt man den Äquidensiten des Photogramms jeweils eine der entsprechenden Schwärzung proportionale seitliche Verschiebung, so ordnen sich die Äquidensitenstrukturen wie die Isohypsen einer Stereolandkarte [21, 22, 23] im Räume an (Abb. 16).

Die proportional zu der jeweiligen Schwärzung vorgenommene seitliche Verschiebung der Äquidensiten eines Partialbildes (die auch auf beide Partialbilder aufgeteilt werden kann) wird als „Parallelperspektive“ bezeichnet. Sie reicht im allgemeinen aus, um die Staffelung der Äquidensiten im Stereo-Äquidensitogramm zu verdeutlichen. Die Höhenlage ist aber – besonders bei den Äquidensiten größerer Schwärzung – mehr oder weniger verzerrt; denn die seitliche Verschiebung der Äquidensiten folgt nach dem Strahlensatz der Funktion

$$s = \frac{B}{\frac{a}{h} - 1}, \quad (18)$$

in der s der Betrag der Verschiebung, B die Stereobasis (Abstand der Augen voneinander), a der Abstand der Augenverbindungsline vom betrachteten Äquidensitogramm und h die in dem Raum zwischen Äquidensitogramm und Augen darzustellende Höhe der Äquidensite ist. Unter Berücksichtigung von (18) ist ein unmittelbares Ablesen der Schwärzung des Photogramms als Höhe des Schwärzungsreliefs aus dem Stereo-Äquidensitogramm möglich. Dies ist besonders leicht bei übereinandergedruckten Rot-Grün-Anaglyphenbildern zu erreichen, bei denen man die einzelnen Höhen sogar mit einem Stechzirkel abgreifen kann³.

Zur Gewinnung von Abb. 16 wurde die Parallelperspektive angewendet. Für nicht zu große Höhen des Schwärzungsreliefs kann die Höhenverzerrung vernachlässigt werden.

Die Vorzüge der Stereo-Äquidensitometrie kommen besonders bei der Analyse von komplizierten Photogrammen zur Geltung, die sehr verworrene Äquidensitogramme ergeben [24]. Als Beispiel hierfür sei ein Photogramm des Orionnebels (Abb. 17a) und das dazugehörige Äquidensitogramm (Abb. 17b) gezeigt.

Abb. 17c wurde mit einem Graukeil bei gleichzeitiger Belichtungsfolge wie zur Herstellung von Abb. 17 b gewonnen und gibt damit eine Eichbeziehung für die Schwärzung der darin enthaltenen Äquidensiten an.

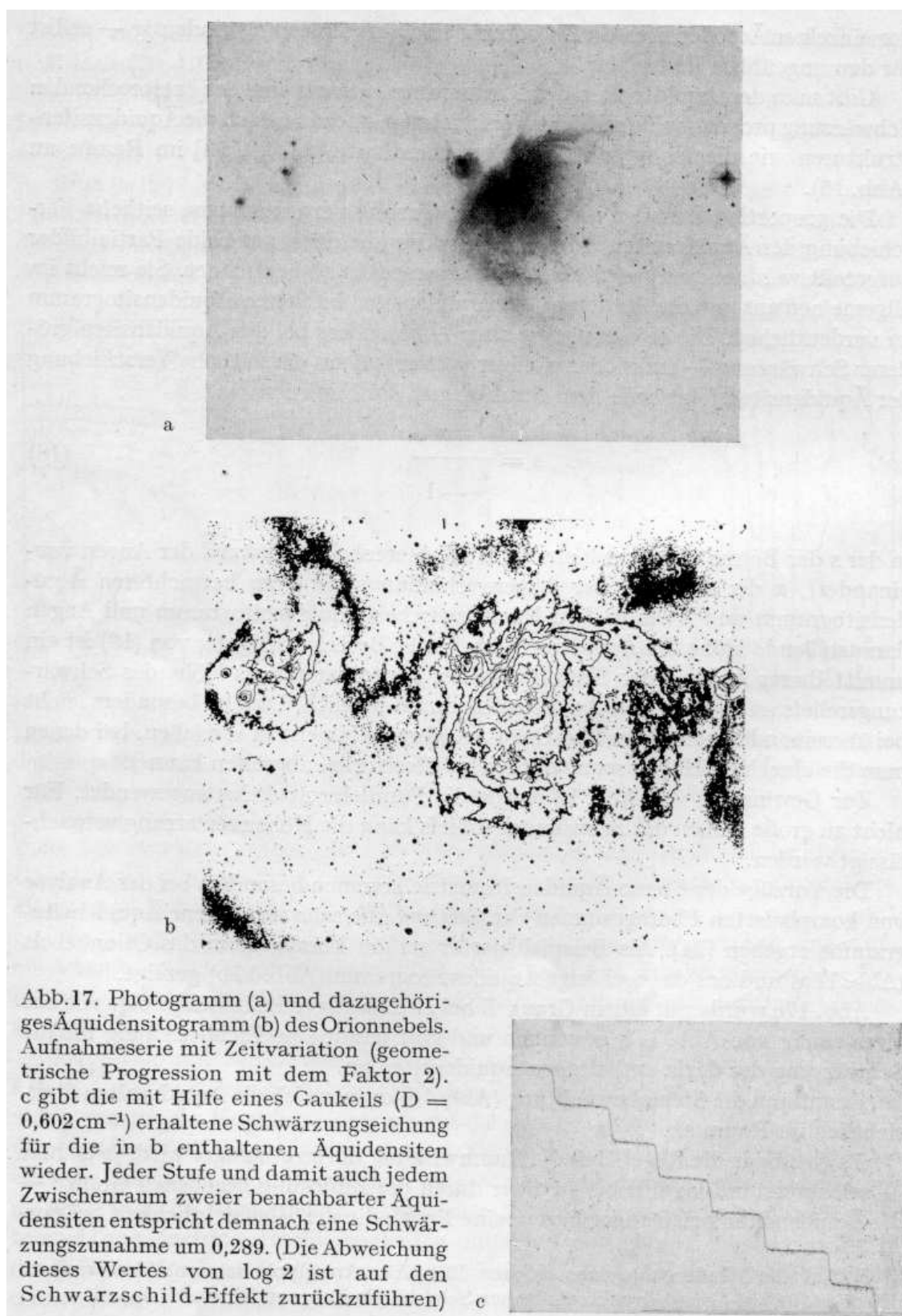
Erst durch die Stereobetrachtung (Abb. 18) ordnen sich die Äquidensiten übersichtlich im Raum an.

Es gilt sogar die Regel, dass die Raumwirkung um so günstiger wird, je dichter – selbstverständlich nur bis zu einer durch die Auflösung gegebenen Grenze – die Äquidensiten beieinander liegen, eine Regel, die der Übersichtlichkeit bei normalen (flachen) Äquidensiten direkt widerspricht. Mit Hilfe der Stereo-Äquidensitometrie lässt sich die Auflösung eines Photogrammes in Äquidensiten bis zur äußersten Grenze treiben.

10. Schwärzungsräume und -hyperräume

Mitunter ist es erforderlich, die Schwärzung der Photoschicht in Abhängigkeit von 3 und mehr unabhängigen Variablen zu erfassen. Werden nur drei Parameter der Schwärzungsfunktion variiert, so kann zu ihrer Darstellung ein räumliches Koordinatensystem verwendet werden. Jedem Raumpunkt wäre dann eine bestimmte Schwärzung zugeordnet.

³Auf die Wiedergabe eines solchen Rot-Grün-Anaglyphenstereobildes wird an dieser Stelle auf Grund drucktechnischer Schwierigkeiten verzichtet.



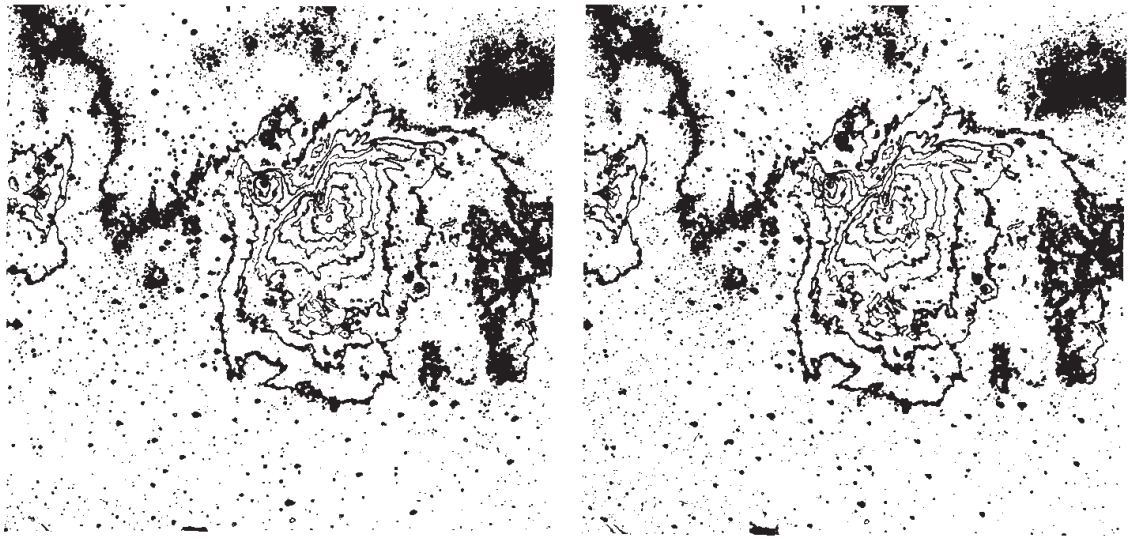


Abb. 18. Stereoäquidensitogramm zu Abb. 17. Die seitliche Verschiebung der Äquidensiten wurde auf beide Partialbilder aufgeteilt

In logischer Erweiterung der oben eingeführten Terminologie könnte man ohne weiteres von „mehrpametrischen Schwärzungsräumen“ sprechen. Solche Schwärzungsräume existieren aber in der Realität nicht – und zwar auf Grund der Definition der Schwärzung, die ja ein Maß für die Schwächung des Lichtes ist, das eine Schichtfläche durchsetzt. Die Dicke dieser Schicht ist für die Größe der Schwärzung belanglos, denn nach der Nuttingschen Schwärzungsformel (12) wird die Schwärzung allein von der Anzahl der je Flächeneinheit in der Schicht enthaltenen Pigmente und deren mittlerer Projektionsfläche bestimmt. Damit erweist sich die Fläche mit ihren zwei Dimensionen als der natürliche Darstellungsraum für die Schwärzung.

Von der Darstellung eines „dreiparametrischen Schwärzungsraumes“ könnte man sprechen, wenn man eine größere Anzahl von Photoschichten, die zweiparametrische Schwärzungsflächen gleicher Koordinatenzuordnung enthalten, spielkartenartig übereinanderschichtet, wobei dann die Variation des dritten Parameters der Höhe des Stapels von Photoschichten zugeordnet wird. Mit anderen Worten besagt dies, dass man über eine Schar von zweiparametrischen Schwärzungsflächen verfügt, deren Parameter die dritte Variable der zu erfassenden Schwärzungsfunktion ist.

Die Analyse eines solchen Schwärzungsraumes ist wiederum nur möglich, wenn man eine Zerlegung des Raumes in einzelne Schichten vornimmt. Um zu zeigen, dass diese Überlegungen durchaus nicht abwegig sind, sei erwähnt, dass in der Kernphysik (insbesondere bei der Erforschung der kosmischen Strahlung) ganze Pakete von Kernspuremulsionen eingesetzt wurden [25, 26, 27], die nach der Exposition in Schichten zerlegt und dann einzeln entwickelt usw. sowie ausgewertet wurden.

Es wäre beispielsweise möglich, die Fläche der photographischen Schicht für die Variation der Parameter Zeit und Wellenlänge zu verwenden. Die Schichttiefe stünde dann für die Variation der Intensität zur Verfügung. Infolge der Opaleszenz der Emulsionsschicht nimmt nach dem LAMBERTSchen Gesetz die Intensität des Lichtes mit der Tiefe der bestrahlten Schicht nach einer Exponentialfunktion ab, d.h., dass die betreffende Koordinate des Schwärzungsraumes mit „ $\log E$ –“ zu bezeichnen wäre. Bei ebenfalls logarithmischer Variation der Zeit könnte man so einen „ $\log t$ – $\log E$ – λ –Schwärzungsraum“ erhalten. Dies setzt aber voraus, dass das Schichtvolumen zur Messung der Schwärzung in viele sehr dünne Schichten zerlegt wird und dass die Wellenlängenabhängigkeit der Extinktion der Schicht vernachlässigt werden kann.

Durch die Zerlegung des Schichtvolumens in Einzelschichten gelangt man zwangsläufig auf die „spezifische Schwärzung“

$$S_{sp} = \frac{dS}{dx}, \quad (19)$$

bei der die Schwärzung S jeweils von der Oberfläche der Schicht aus bis zu der Schichttiefe x gemessen wird.

Die spezifische Schwärzung gibt an, wie groß die Schwärzungszunahme je Längenelement der Schichttiefe ist.

Somit ist das angeführte Beispiel des „Schwärzungsraumes“ richtiger und zutreffender als ein „spezifischer Schwärzungsraum“ zu bezeichnen.

Bei der Zerlegung eines Schwärzungsraumes ist es im Grunde gleichgültig, in welcher Richtung zum Koordinatenkreuz die äquidistanten parallelen Schnitte gelegt werden. Die „spezifische Schwärzung“ ist nämlich auch ein Maß für die „Pigmentdichte“ des Schichtvolumens. Dies ist so zu verstehen: Nach der NUTTINGSchen Schwärzungsformel (12) ist die Schwärzung als die Anzahl der je Flächeneinheit in der Schicht enthaltenen Pigmente definiert. Von dem Faktor $f \lg e$, der hierin die Bedeutung eines Proportionalitätsfaktors hat, soll dabei abgesehen werden. Bei der „spezifischen Schwärzung“ wird die Anzahl der Körner nicht nur auf das Flächenelement der Schichtfläche dF , sondern auch auf das Längenelement der Schichttiefe dx bezogen, d. h. auf das Volumenelement $dF \cdot dx = dV$.

Der terminus „spezifische Schwärzung“ ist aber nicht synonym auch für die „Pigmentdichte“ bzw. die „Pigmentkonzentration“ zu gebrauchen. Letztere geben die Anzahl der Pigmente in der Volumeneinheit an, während die „spezifische Schwärzung“ noch die Größe der Pigmente in Gestalt der mittleren Projektionsfläche f berücksichtigt,

$$S_{sp} = \frac{dN}{dx} f \lg e. \quad (20)$$

In einem solchen „spezifischen Schwärzungsraum“ ist der geometrische Ort konstanter spezifischer Schwärzung im allgemeinen eine Raumfläche, die hier als „Raumflächenäquidensite“ bezeichnet werden soll. Bei geeigneter Strukturierung lässt sich eine Raumflächenäquidensite stereoskopisch veranschaulichen [12].

Während sich für die Darstellung der Schwärzung in Abhängigkeit von drei zu variierenden Parametern die spezifische Schwärzung als die geeignete physikalische Größe erwies, fehlt für mehrdimensionale „Schwärzungshyperräume“ jede reale physikalische Zuordnung. Dennoch soll bei der Terminologisierung auch an die Möglichkeit solcher Hyperräume zur Darstellung der Schwärzungsfunktion gedacht werden, denn diese können mitunter die Bedeutung von vereinfachenden Denkmodellen besitzen. Die Informationen dieser Schwärzungshyperräume müssen stets auf entsprechende Scharen physikalisch realer Schwärzungsräume zurückgeführt werden.

Zusammenfassung

Nach einigen kritischen Bemerkungen über den historisch entstandenen Begriffs- und Wortschatz der Sensitometrie, der sich zur Beschreibung vieler sensitometrischer Erscheinungen und Zusammenhänge – insbesondere aus der Sicht der Äquidensitometrie – als unzulänglich erweist, werden Vorschläge zur Neufassung des sensitometrischen Begriffssystems gemacht. Hierbei wird die alte Terminologie in die neue miteinbezogen und gegebenenfalls durch geeignete, kurze Erweiterungen präzisiert.

Die Zweckmäßigkeit der vorgeschlagenen Terminologie wird an Hand einer Anzahl von Beispielen sensitometrischer Grundbegriffe belegt, die sich sinngemäß in das folgende Schema einordnen lassen:

Photogramm	Äquidensitogramm
Schwärzungspunkt	Schwärzungsstrecke
Schwärzungslinie	Schwärzungskurve
Schwärzungsfläche	Schwärzungsrelief
Schwärzungsraum	Raumflächenäquidensitogramm

Den Herren Prof. Dr. LAU, Prof. Dr. WEMPE, Dr. KRUG, Dr. MELCHER und Dipl.-Ing. KRÖBER sei für Diskussionen über den Inhalt des vorliegenden Aufsatzes (verkürzter und umgestalteter Auszug aus der Dissertation) sowie die kritische Durchsicht des Manuskriptes gedankt. Des weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. WEMPE für die leihweise Überlassung von photographischen Aufnahmen des Orion- und des Andromedanebels.

Schrifttum

1. Arens, H., Agfa-Veröff. 1, 11 (1930); 4, 15 (1935). – 2. Hurter, F., und V. C. Driffield, Journ. Soc. Chem. Ind. 9, 455 (1890). – 3. Kirsch, W., Bild und Ton 9, 232, 265, 296 (1956). – 4. Nutting, P. G., Phil. Mag. 26, 423 (1913). – 5. Arens, H., J. Eggert und E. Heisenberg, Z. wiss. Phot. 28, 356 (1931). – 6. Gallier, C., Phot. J. 49, 200 (1909); Z. wiss. Phot. 7, 257 (1909); Proc. V congr. Internat. phot., Brüssel 1910, S. 44. – 7. Frieser, H., und J. Eggers, Agfa-Veröff. Leverkusen/München I, 76 (1955); Z. wiss. Phot. 50 II, 405 (1955). – 8. Kröber, K., und E. Gerth, Bild und Ton 17, 98, 130 (1964). – 9. Goldberg, E., R. Luther und F. Weigert, Z. wiss. Phot. 9, 323 (1911); B. J. P. 57, 664 (1910). – 10. Lau, E., und W. Krug, Die Äquidensitometrie. Akademie-Verlag, Berlin 1957. – 11. Maeder, D., P. Huber und A. Stebler, Helv. Phys. Acta 20, 139, 230 (1947). – 12. Gerth, E., Eine einfache Methode der Sensitometrie mit Hilfe der Äquidensiten und ihre Anwendung insbesondere für Probleme der Doppelbelichtung; Pädagogische Hochschule Potsdam 1965, Dissertation. – 13. Rakow, A., und K. Zapf, Mikroskopie 17, 217 (1962). – 14. Romer, W., Camera (Luzern) 10, 291 (1932); 16, 2 (1938). – 15. Heymer, G., Agfa-Veröff. Wolfen 6, 239 (1939). – 16. Wedewarth, H., Photo-Mag. 12, 51 (1958). – 17. Greif, H., Technik 16, 602 (1961); Lichttechnik 13, 403 (1961); Bild und Ton 14, 112 (1961); 15, 162 (1962); 16, 194 (1963). – 18. Callender, R. M., Lichttechnik 13, 403 (1961). – 19. Mutter, E., Kompendium der Photographie, Bd. II, S. 285–288. Berlin-Borsigwalde 1962. – 20. Lau, E., J. Rienitz und G. Roose, Feingerätetechnik 2, 101, 497 (1953). – 21. Carlberg, B., P. L. M. 89, 302 (1943). Justus Perthes, Gotha. – 22. Graf, U., Petermanns geogr. Mitt. 89, 1 (1943). – 23. Breetz.E., Z. f. Erdkundeunterricht 18, 413 (1966). – 24. Richter, N., und W. Högner, Mber. Dtsch. Akad. Wiss. 5, 603 (1963); Jenaer Rundschau 9, 187 (1964); 11, 3 (1966). – 25. Davies, J., und C. Franzinetti, Nuovo Cim. IX. Suppl. 2 XII, 480 (1954). – 26. Teucher, M., Erg. exakt. Naturwiss. 28, 407 (1955). 27. Joos, G., und E. Schopper, Grundriß der Photographie und ihrer Anwendungen besonders in der Atomphysik. Frankfurt a. M. 1958, S. 324 und 334.

Bei der Redaktion eingegangen: 11. 10. 1967

Dienstanschrift des Verfassers: Dr. Ewald Gerth, Deutsche Akademie
der Wissenschaften zu Berlin, Institut für Sternphysik,
15 Potsdam, Telegrafenberg,
Astrophysikalisches Observatorium