

Bestimmung der Keimordnungszahl handelsüblicher photographischer Emulsionen

Von Klaus Kröber und Ewald Gerth

Mit 10 Abbildungen

Der Durchhang der Schwärzungskurve hat schon lange das Interesse der auf dem Gebiete der wissenschaftlichen Photographie tätigen Forscher auf sich gezogen.

Insbesondere haben BURTON und BERG [1] aus der Form des Durchhanges der Schwärzungskurve auf die Existenz von Subkeimen geschlossen, die erst durch eine hypersensibilisierende Vorbelichtung oder eine latensifizierende Nachbelichtung entwicklungsfähig werden. So läßt es sich zeigen, daß der kurze Durchhang mit kleinem Krümmungsradius einer wenig empfindlichen Emulsion durch eine vorher oder nachher zu der Hauptbelichtung erfolgende Zusatzbelichtung bzw. durch eine chemische Behandlung in einen weiter ausladenden Durchhang mit größerem Krümmungsradius übergeht.

Bei graphischer Darstellung der Schwärzung in linearer Abhängigkeit von der Intensität der Belichtung (*E*-Schwärzungskurve nach der in [2] vorgeschlagenen Terminologie) findet man, wie bereits von RENWICK [3] beschrieben, im allgemeinen einen anfänglichen Durchhang der Kurve, die nach einem kurzen quasilinearen Übergangsbereich mit weitauslaufender Schulter in die Sättigungsschwärzung einmündet (Abb. 1). Exponiert man die Schicht mit Röntgen- oder Kernstrahlung, so beginnt die *E*-Schwärzungskurve mit einem linearen Anstieg und weist keinen Durchhang auf (HODGSON [4], ALLEN und LAFY [5], BLOCH und RENWICK [6], WILSEY und PRITCHARD [7]).

Der Durchhang läßt sich besonders günstig erfassen, wenn man den Logarithmus der Schwärzung in Abhängigkeit vom Logarithmus der Intensität der Belichtung graphisch darstellt [8, 9, 10]. In dieser Darstellungsart ergibt sich für das Gebiet des Durchhanges eine Gerade (Abb. 2), die bei Exposition der Photoschicht mit Röntgen- oder Kernstrahlung den Anstieg 1 und für Exposition mit Licht einen Anstieg > 1 besitzt.

Von MEES [11] (Verfasser: P.C. BURTON) wird angegeben, daß man den Durchhang der Schwärzungskurve durch eine Gleichung²) von der Form

$$S = \text{const} \cdot E^n \tag{1}$$

¹Scanned from an original reprint of the article by the co-author E. Gerth in 2009.

Abstract: www.ewald-gerth.de/33abs.htm – attached at the end of this article (page 133).

²Die Bezeichnung der einzelnen Größen wurde an die in [10, 13, 14, 16] verwendeten Symbole angeglichen. Originalschreibweise von Burton: $D = KE^S$.

beschreiben könne, wobei n in einem Bereich von 1 bis 3 liege. Die Werte für n häufen sich in der Umgebung von 2.

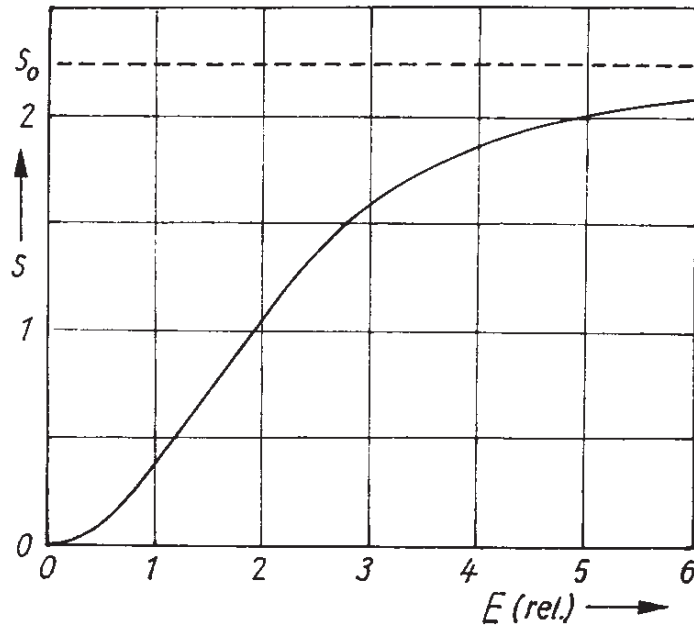


Abb. 1. Schwärzung einer photographischen Schicht in Abhängigkeit von der Intensität der Belichtung unter Verwendung eines linearen Koordinatensystems.
 E -Schwärzungskurve, konstruiert mit $n = 2$ nach Gl. (1)

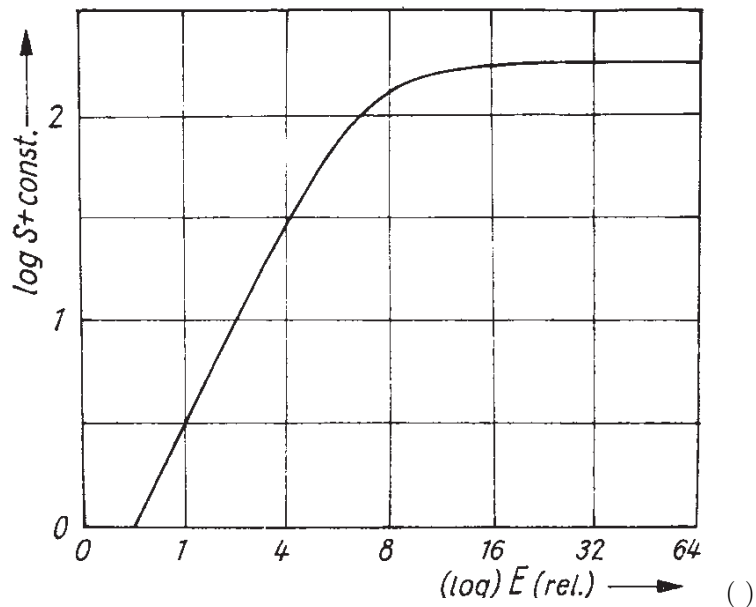


Abb. 2. Schwärzung einer photographischen Schicht in Abhängigkeit von der Intensität der Belichtung unter Verwendung eines doppeltlogarithmischen Koordinatensystems.
 Logarithmierte $\log E$ -Schwärzungskurve, konstruiert mit $n = 2$ nach Gl. (1)

Zur Erklärung der physikalischen Bedeutung des Exponenten n in Gl. (1) wird nach MEES [11] angenommen, daß n die kleinste Anzahl der Licht- bzw. Röntgenquanten angebe, durch die bei der Exposition ein Silberbromidkorn entwicklungsfähig wird. Dem steht allerdings entgegen, daß hiernach bereits weniger als 3 Lichtquanten zur Erzeugung eines entwickelbaren Keims ausreichen würden, was Ergebnissen von [12] widerspräche, wonach zur Erzeugung eines Entwicklungskeimes im Mittel etwa 100 Lichtquanten das Silberbromidkorn treffen müssen.

Weiterhin wurde auch nicht beobachtet, daß n eine Tendenz zur Ganzzahligkeit zeige.

Von GERTH [13, 14] wurde eine andere Deutung der Größe n versucht. Danach repräsentiert n nicht die Anzahl der auf das Silberbromidkorn treffenden Lichtquanten, sondern die *Anzahl der Stufen*, die beim Aufbau der Keime in einer kinetischen Reaktion von höchstens vierter Ordnung durchlaufen werden. Die Größe n hat somit die Bedeutung einer *Reaktionsordnungszahl* und wird darum hier als die „*Keimordnungszahl*“ bezeichnet.

Zur Ermittlung der Keimordnungszahl aus empirisch gegebenen $\lg E$ - Schwärzungskurven wird eine von GERTH [10] angegebene Beziehung benutzt, die die Schwärzungsfunktion im Gebiet des Durchhanges in guter Näherung richtig beschreibt:

$$S = \frac{S_0(1 - 10^{-nS_D})}{nS_D} (\varepsilon t^p)^n \cdot E^n. \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

E : Intensität der Belichtung

t : Zeit der Belichtung

p : SCHWARZSCHILD-Exponent

ε : Empfindlichkeitskoeffizient

n : Keimordnungszahl

S_0 : Sättigungsschwärzung

S_D : Schwärzung der unentwickelten Schicht

In der Funktion $S = f(E)$ sind alle aufgeführten Größen mit Ausnahme der unabhängigen Variablen E konstant, so daß damit Gl. (1) und Gl. (2) identisch sind.

Durch Logarithmieren von Gl. (1) erhält man die lineare Funktion

$$\lg S = n \lg E + \text{const}, \quad (3)$$

in der der Anstiegskoeffizient durch die Keimordnungszahl gegeben ist.

Durch die Ermittlung der Keimordnungszahl ergeben sich wichtige Aufschlüsse über die Kinetik der Keimbildung und damit über solche kennzeichnenden Eigenschaften der Emulsion wie die Empfindlichkeit, die Form der Schwärzungskurve, den SCHWARZSCHILD-Effekt. Diesbezüglich sei auf [10] und [13] verwiesen.

Nach der in [13] und [14] dargelegten Stufentheorie des Keimaufbaus könnte n nur innerhalb der Grenzen des Intervalls 1 bis 4 variieren; denn bei unsensibilisierten Emulsionen werden bis zur Entwicklungsfähigkeit der Keime 4 Keimstufen [13,14,15] durchlaufen. Die Anzahl der zu durchlaufenden Reaktionsstufen kann durch Bildung von Reaktionsstufen bis zur 3. Ordnung (beispielsweise durch Reifung der Emulsion, chemische Behandlung, Vorbelichtung) bis auf *e i n e* Stufe reduziert werden. Von der Belichtung braucht dann nur noch *die* Energie aufgebracht zu werden, die notwendig ist, um den Keim aus der dritten Reaktionsstufe auf die vierte zu bringen.

In einer gegebenen Emulsion sind im allgemeinen Keime verschiedener Ordnungsstufen statistisch verteilt. Dies hat zur Folge, daß auch nichtganzzahlige Keimordnungszahlen auftreten können. Die Konstanz der gebrochenen Keimordnungszahl über einen größeren Bereich der Schwärzungskurve läßt sich allerdings nicht erklären, wenn man annimmt, daß in der Emulsion ein Gemisch von Keimen verschiedener Ordnung verteilt sei, wovon jeder Anteil isoliert von dem anderen bis zur Entwicklungsfähigkeit weiterreagiere. Setzt man dagegen voraus, daß neben Hinreaktionen auch Rückreaktionen die Bruttoreaktion des Keimaufbaues bestimmen [13, 14], so folgt daraus unmittelbar, daß die Ordnung der Bruttoreaktion kleiner oder höchstens gleich der Summe der Einzelreaktionen sein muß.

Hochempfindliche Emulsionen werden im allgemeinen eine Keimordnungszahl nahe 1 aufweisen. Keime 4. Ordnung, die schon vor der Belichtung in der Schicht enthalten sind, kommen zum Nachweis der Belichtung nicht mehr in Betracht, da sie nur einen Beitrag S_s zum Schleier liefern, der in der graphischen Darstellung $\lg(S - S_s) = f(\lg E)$ zur Ermittlung von n subtrahiert wird. $n = 1$ ist somit ein Grenzwert, der nicht unterschritten werden kann. Bei der Exposition der Photoschicht mit Röntgen- oder Kernstrahlung führt jeder Treffer dieser energiereichen Quanten zu einer Überschwemmung des Kristallgitters mit Leitfähigkeitselektronen und damit zur Reduktion des gesamten Silberbromidkornes. Alle noch freien Ordnungsstufen werden ohne nennenswerte Rückreaktionen mit einem Schlage durchlaufen, so daß bei diesen Strahlenarten notwendigerweise $n = 1$ sein muß.

Ob mitunter eine Keimordnungszahl von $n = 4$ beobachtet werden kann, ist davon abhängig, inwieweit für diesbezügliche Untersuchungen nichtsensibilisierte Emulsionen zur Verfügung stehen, die völlig frei von Subkeimen im Sinne von BURTON und BERG [1] sind. Solche Emulsionen könnten aus handelsüblichen Photomaterialien eventuell durch eine chemische Spezialbehandlung hergestellt werden, bei der alle in der Schicht enthaltenen Sub- und Reifkeime zerstört werden. Eine Keimordnungszahl nahe 4 weisen einige unempfindliche Photomaterialien, z. B. supersteile phototechnische Filme, auf.

Um einen Überblick über die verschiedensten Emulsionen bezüglich ihrer Keimordnungszahl zu erhalten, wurden die Schwärzungskurven von etwa 200 Filmarten untersucht, die für diesen Zweck aus dem Archiv des VEB DEFA-Studio für Spielfilme, Babelsberg, zur Verfügung gestellt wurden.

In der folgenden Tabelle ist eine kleine Auswahl der Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengestellt.³

Tabelle 1

Material	ORWO-Gußnummer	Schleier-Schwärzung	γ -Wert	n
NP 27	2920	0,33	0,65	1,00
NP 20	3234	0,36	0,61	1,10
NP 15	8228	0,31	0,61	1,20
NP 7	5797	0,38	0,68	1,25
NP 5	4787	0,34	0,72	1,50
NP 3	54195	0,25	0,80	1,75
PF 2	735	0,04	2,60	1,75
TF 6	7994	0,23	3,20	3,0
FU 5	2907	0,04	3,80	4,0

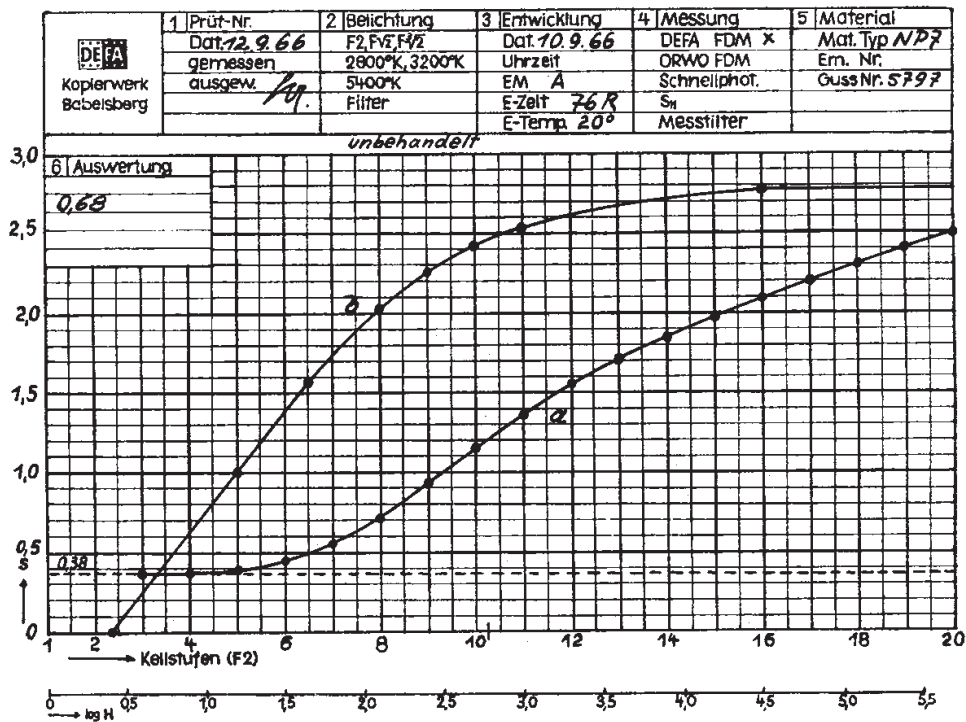


Abb. 3. Diagrammblatt mit log E -Schwärzungskurve (Kurve a) aus dem DEFA-Archiv. Kurve b stellt die in das gleiche Diagrammblatt eingetragene logarithmierte Schwärzungskurve dar. Anstieg des linearen Teils der Kurve b: 1,25

³Für die Zusammenstellung der Tabelle wurden aus der Fülle des zur Verfügung stehenden Materials nur einige typische Vertreter ausgewählt, die Durchschnittswerte der einzelnen Materialgruppen repräsentieren. Auf eine statistische Auswertung wurde wegen möglicher systematischer Fehler verzichtet.

Der Gang der Auswertung sei an Hand von Abb. 3 erläutert. Die mit dem Densitometer gemessenen Schwärzungswerte des durch einen Stufenkeil belichteten Filmmaterials werden in ein vorgefertigtes Koordinatensystem eingetragen und durch einen Kurvenzug miteinander verbunden, der die Schwärzungskurve des betreffenden Materials darstellt (Kurve a). Sodann werden die Schwärzungswerte abzüglich der Schleierschwärzung logarithmiert und die so erhaltenen Werte in das gleiche Koordinatensystem eingetragen (Kurve b). Der Anstieg des linearen Teils dieser Kurve liefert unmittelbar die Keimordnungszahl n .

Bei der Messung ist es von großer Wichtigkeit, den Schleierwert genau zu bestimmen, da der Anstieg der logarithmierten Schwärzungskurve (Kurve b) hiervon in starkem Maße abhängt.

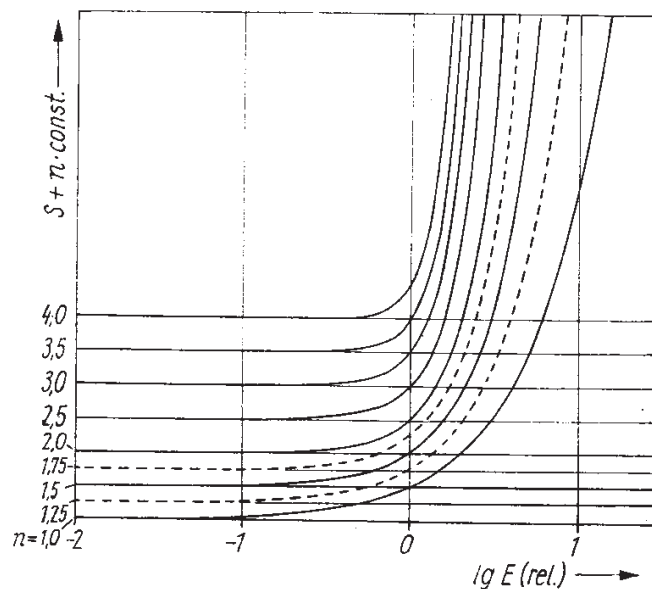


Abb. 4. Kurvenschablone zur Bestimmung der Keimordnungszahl aus der Krümmung des Durchganges der log E-Schwärzungskurve. Parameter der Kurvenschar: n ($n = 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,5; 3; 3,5; 4$). Kurven in Ordinateurichtung parallel zueinander proportional zum Betrag von n versetzt. Dekadenlänge: 1,667 cm

Das punktweise Übertragen der Schwärzungswerte in das logarithmische System ist sehr mühselig. Deshalb wurde von KRÖBER vorgeschlagen, die (bereits im DEFA-Archiv vorhandenen) Schwärzungskurven mit einer Kurvenschablone auszuwerten. Die Schablone (Abb. 4) enthält eine Anzahl von Kurvenverläufen, die nach einer Potenzfunktion entsprechend Gl. (1) berechnet und in einfach-logarithmische Koordinaten eingetragen wurden. Der konstante Faktor in Gl. (1) ist für die Form der Kurve gleichgültig, da er wegen der logarithmischen Teilung der Abszisse nur eine Parallelverschiebung der Kurve bewirkt. Die Kurvenform gilt demnach auch für Schwärzungskurven beliebiger Sättigungsschwärzung S_0 .

In Abb. 4 sind die einzelnen, zu den jeweiligen Werten von n gehörigen Kurven parallel versetzt eingetragen, um Überschneidungen der Kurven zu vermeiden.

Auf eine größere Anzahl von Kurven wurde im Interesse der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Schwärzungskurven lassen sich in die Schablone mit einer Unsicherheit von etwa $\Delta n = 0,05$ einpassen.

Die Dekadenlänge der Kurvenschablone hängt eng mit dem Exponenten n zusammen; sie ist durch den Abszissenabstand zweier Funktionswerte gegeben, die sich um den Faktor 10^n unterscheiden. Der Exponent n bewirkt eine proportionale Stauchung der Kurve in Abszissenrichtung.

Zur Bestimmung von n genügt im Prinzip eine Vergleichskurve, wenn es gelingt, die Kurve proportional in Abszissenrichtung zu stauchen. Eine Möglichkeit hierzu wäre eine optische Abbildung des Kurventrägers unter Ausnutzung der Schrägprojektion, wobei man dann die Größe von n aus dem Drehwinkel entnehmen könnte.

Wenn die Schwärzungswerte nicht in Kurvenform, sondern numerisch vorliegen, empfiehlt sich deren unmittelbare Eintragung in doppelt-logarithmische Koordinaten. Derartige Koordinatensysteme können in analoger Weise wie nach Abbildung 3 hergestellt werden.

Das Ergebnis der Untersuchung war, daß die Keimordnungszahl bei allen untersuchten Photomaterialien innerhalb der theoretisch gegebenen Grenzen liegt. Es konnte die Tendenz festgestellt werden, daß sich die Keimordnungszahl mit zunehmender Empfindlichkeit des Photomaterials verringert, dabei aber den Wert $n = 1$ nicht unterschreitet. Ungeachtet dessen traten aber bei den einzelnen Filmsorten sehr starke Schwankungen der Keimordnungszahlen für verschiedene Emulsionsgüsse auf. Auch der γ -Wert und die Schleierschwärzung weisen einen Gang mit der Empfindlichkeit auf.

Zur Erhärtung der aus [13, 14] folgenden Vermutung, daß $n = 1$ eine nicht unterschreitbare Grenze für die Keimordnungszahl einer Emulsion darstellt, wurden an einer supersteil arbeitenden Schicht, die eine Keimordnungszahl nahe $n = 4$ besitzt, Vorbelichtungen vorgenommen und so eine künstliche allgemeine Verschleierung erzeugt. Durch die Vorbelichtung werden gemäß der Subkeimtheorie [1] und der darauf aufbauenden Stufentheorie des latenten Bildes [10, 13, 14] neben vielen Schleierkeimen 4. Ordnung vornehmlich Subkeime 3. Ordnung erzeugt, so daß mit zunehmender Verschleierung die Keimordnungszahl gegen 1 strebt.

Abb. 5 zeigt analog zu Abb. 3 die $\log E$ -Schwärzungskurve in linearer Ordinatenenteilung (Kurve a) und in logarithmischer Ordinatenenteilung (Kurve b) des supersteilen Materials ORWO FU 5. Aus dem Anstieg der Kurve b entnimmt man die Keimordnungszahl $n = 3,95$. Zur Untersuchung des Einflusses der Vorbelichtung auf die Keimordnungszahl ist eine größere Anzahl von Schwärzungskurven auszuwerten, deren Parameter die Lichtmenge der Vorbelichtung ist. Subjektive und systematische Meßfehler, die mitunter auch während einer Meßreihe veränderlich sein können, müssen bei einer solchen Untersuchung nach Möglichkeit ausgeschlossen werden. Deshalb wurde für die im folgenden dargelegte Untersuchung der äquidensitometrischen Methode zur Aufnahme der Schwärzungskurven nach [2] gegenüber der photometrisch-densitometrischen der Vorzug gegeben.

Die äquidensitometrisch aufgenommene Schwärzungskurve des gleichen Materials wie in Abb. 5 zeigt Abb. 6.

Die Vorbelichtung mit dem Licht einer Glühlampe wurde nach einer geometrischen Progression von Aufnahme zu Aufnahme verändert. Die Variation der Belichtungszeit erstreckte sich von 0,5 s bis zu 64 s. Nach der für die gesamte Schichtfläche einheitlichen und homogenen Vorbelichtung wurde ein Graukeil aufkopiirt. Sämtliche Filme der Versuchsreihe wurden in einem gemeinsamen Entwicklungsbad entwickelt. Auf eine weitere einheitliche Verarbeitung der Photogramme wurde große Sorgfalt angewendet. In Abb. 7 sind alle Schwärzungskurven der Meßreihe zu einer Kurvenschar zusammenkopiert.

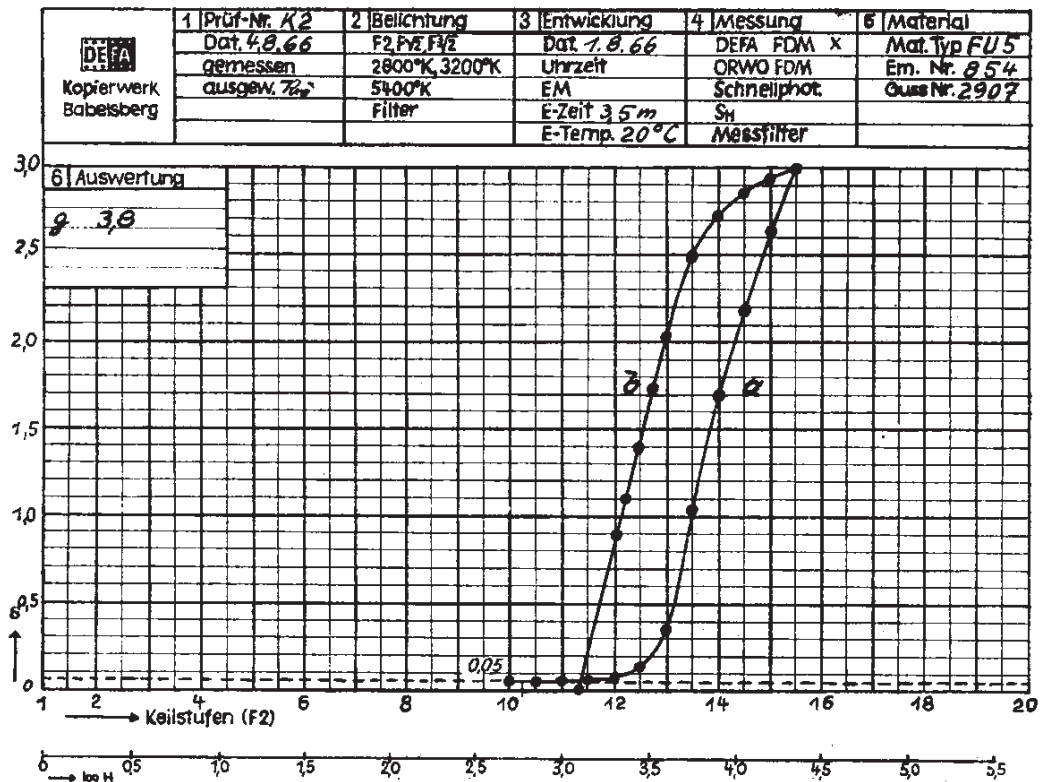


Abb. 5. Diagrammblatt mit log E-Schwärzungskurve (Kurve a) und logarithmierter Schwärzungskurve (Kurve b) aus dem DEFA-Archiv. Anstieg des linearen Teils der Kurve b: 4,0

Die Übertragung der Schwärzungskurven in logarithmische Koordinaten erfolgte auf graphischem Wege. Zur Gewährleistung einer besseren Auswertbarkeit wurden die einzelnen Kurven parallel gegeneinander versetzt, Abb. 8. Der Anstieg dieser Kurven ergibt noch nicht unmittelbar den Wert der Keimordnungszahl, da die beiden Koordinaten unterschiedliche Teilungen besitzen. Die Abszissenteilung ergibt sich durch die Keilkonstante des verwendeten Graukeils $D_{Abs} = D_{Grauk.}$, die unverändert übertragen wurde. Bei der graphischen Darstellung könnte selbstverständlich gleich eine Maßstabänderung vorgenommen werden.

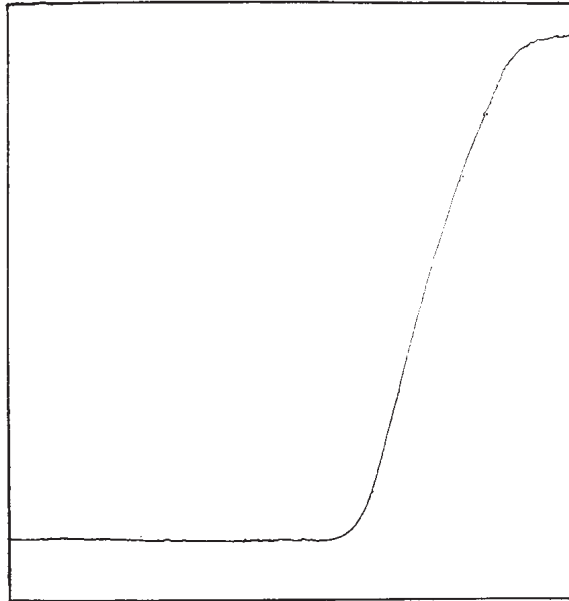


Abb. 6. Äquidensitometrisch aufgenommene log E-Schwärzungskurve des gleichen Materials wie in Abb. 5. Material: ORWO FU 5; Graukeilkonstante: $D = 0,573 \text{ cm}^{-1}$ (gemessen; Nennwert: $D = 0,602 \text{ cm}^{-1}$); Belichtungszeit: $t = 1 \text{ min}$; Rodinal-Entwickler; Entwicklungszeit: 3 min

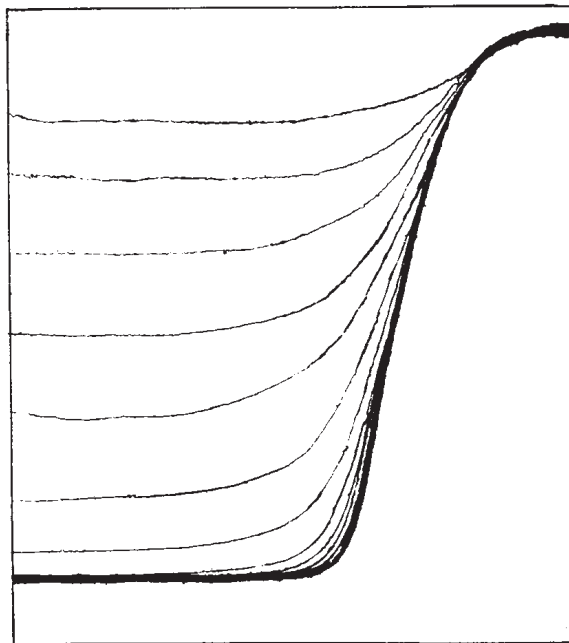


Abb. 7. Schar von log E-Schwärzungskurven gemäß Abb. 6 mit der Vorbelichtungszeit als Parameter. Folge der Belichtungszeiten in s: 0,5; 0,71; 1; 1,42; 2; 2,83; 4; 5,67; 11,28; 16; 22,3; 32; 45,4; 64. Material und Daten wie in Abb.6

Die Ordinatenenteilung wurde (willkürlich) so festgelegt, daß einer Dekade die Länge 5 cm entspricht. In Analogie zu der durch die Keilkonstante gegebenen Abszissenteilung kann auch die Ordinatenenteilung durch eine „Keilkonstante“ angegeben werden, die im vorliegenden Fall $D_{Ord.} = 0,2 \text{ cm}^{-1}$ betrug. Aus dem Anstieg a der Kurven in Abb. 8 berechnet man die Keimordnungszahl nach der Beziehung

$$n = \frac{D_{Ord.}}{D_{Abs.}} a. \quad (4)$$

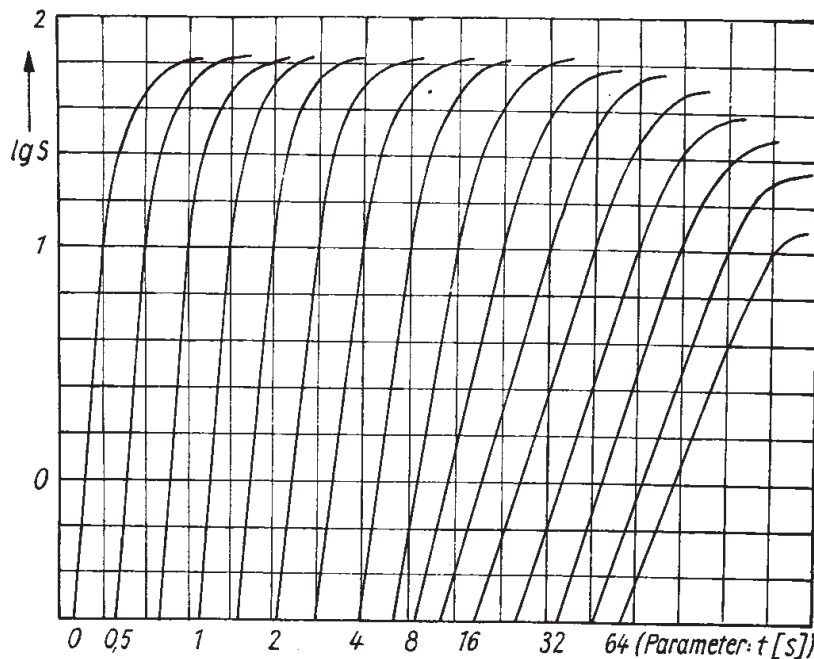


Abb. 8. Schar der logarithmierten $\log E$ -Schwärzungskurven zu Abb. 7. Einzelne Kurven parallel gegeneinander versetzt. Ermittlung von n aus dem Anstieg der Kurven erst nach Koordinatenentzerrung

Die Kurvenschar in Abb. 8 läßt eine deutliche Zunahme der Abflachung des linearen Teils der Kurve, der dem Durchhang der $\log E$ -Schwärzungskurve entspricht, mit wachsender Lichtmenge der Vorbelichtung erkennen. Bei größerer Vorbelichtung treten stärkere Schwankungen des Anstieges und damit der Keimordnungszahl auf. Dies ist – nach bisherigen Untersuchungen – darauf zurückzuführen, daß die gesamte Schwärzungskurve in das Gebiet hoher Schwärzungen, nahe der Sättigungsschwärzung, verlagert wird, in dem sich Inhomogenitäten der Photoschicht bezüglich ihrer sensitometrischen Eigenschaften besonders stark bemerkbar machen [16].

Die Bestimmung der Keimordnungszahl nach Gl. (4) erfordert eine genaue Kenntnis des Wertes der für die Abszissenteilung maßgeblichen Keilkonstante $D_{Abs.}$, die unter den gleichen Bedingungen wie bei dem durchzuführenden Experiment gemessen werden muß. Eine solche Messung ist erforderlich, selbst wenn vom Herstellerwerk die Keilkonstante des Graukeils angegeben wird, da die Schwärzung stets nur für eine bestimmte Meßgeometrie (CALLIER-Effekt) angegeben werden kann.

Von den Verfassern wurde die Keilkonstante eines vom VEB Carl Zeiss Jena bezogenen Graukeils mit dem Nennwert $D = 0,602 \text{ cm}^{-1}$ nach einer in [17] angegebenen äquidensitometrischen Methode zu $D = 0,573 \text{ cm}^{-1}$ ermittelt. Demzufolge gilt für die Berechnung der Keimordnungszahlen nach den Kurven in Abb. 8 Gl. (4) in der Form

$$n = 0,349a. \tag{5}$$

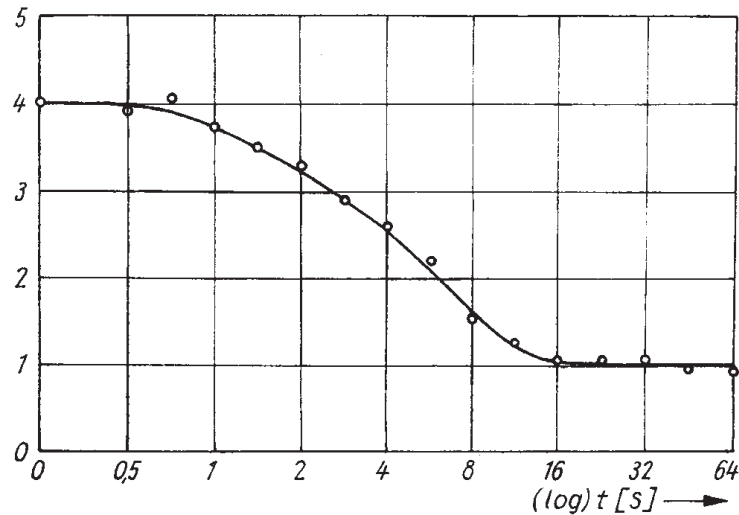


Abb. 9. Keimordnungszahl n in Abhängigkeit von der Vorbelichtungszeit. Knickstelle der Kurve bei $t = 12,5 \text{ s}$

Trägt man nun die Keimordnungszahlen in Abhängigkeit von der Vorbelichtung (z. B. Logarithmus der Vorbelichtungszeit) in ein Koordinatensystem ein, so zeigt sich gemäß Abb. 9 die Tendenz, daß höhere Keimordnungszahlen durch die Zusatzbelichtung niedriger werden und den Wert 1 anstreben, ohne diesen Wert – sofern die Meßgenauigkeit eine solche Aussage bereits an Hand der vorliegenden Ergebnisse eindeutig zuläßt – zu unterschreiten.

Die Kurve in Abb. 9 zeigt bei $t = 12,5 \text{ s}$ eine deutliche Knickstelle, die offensichtlich einen qualitativen Sprung kennzeichnet. Bei dieser Vorbelichtung sind gemäß der Stufentheorie des Keimaufbaus *alle* niedrigen Ordnungsstufen aufgefüllt, und es sind nur noch Keime 3. und höherer Ordnung vorhanden. Bei weiterhin vergrößerter Vorbelichtung werden nur noch Keime 3. Ordnung mit dem Sprung *einer* Ordnungsstufe (daher Keimordnungszahl 1) in Keime 4. Ordnung verwandelt, die lediglich zum Schleier beitragen.

Die Größe der Schleierschwärzung kann man aus der Kurvenschar in Abb. 7 entnehmen. Trägt man die Schleierschwärzung in Abhängigkeit von der Vorbelichtungszeit in einem einfach-logarithmischen Koordinatensystem auf, so erhält man die $\log t$ -Schwärzungskurve (Abb. 10, Kurve a), deren Neigung um den Schwarzschild-Exponenten p geringer als die Neigung der zugehörigen $\log E$ -Schwärzungskurve ist.

Ein unmittelbarer Vergleich der Neigungen der $\log E$ -Schwärzungskurve in Abb. 6 (oder 7) und der $\log t$ -Schwärzungskurve in Abb. 10 ist nur möglich, wenn das Verhältnis der Koordinatenteilungen in beiden Fällen gleich ist. Man entnimmt aus Abb. 6 den Wert $\gamma_E = 4,51$ und aus Abb. 10 $\gamma_t = 3,98$. Hieraus folgt der SCHWARZSCHILD-Exponent mit $p = \gamma_t/\gamma_E = 0,883$.

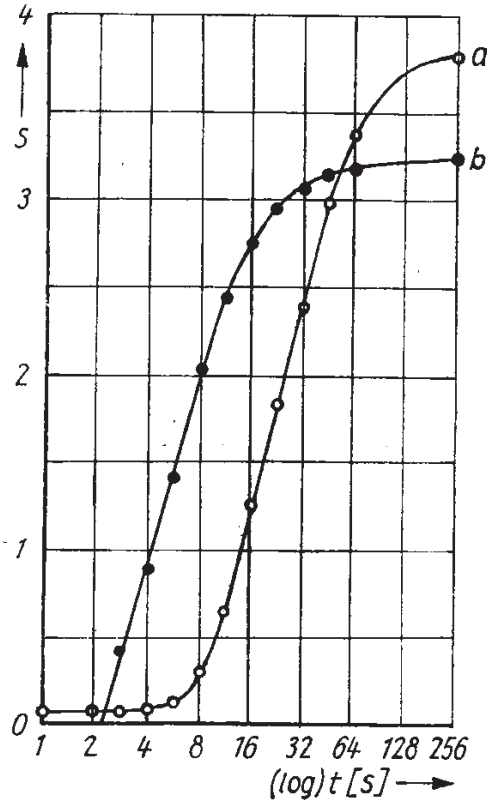


Abb. 10. $\log t$ -Schwärzungskurve (Kurve a), gezeichnet mit den Werten der Schleierschwärzungen (weiße Kreise) zu Abb. 7. Die Schleierschwärzungen wurden gesondert auf äquidensitometrischem Wege nach einem in [2] angegebenen Verfahren ermittelt. Koordinatenteilung - wie in Abb. 7 - gegeben durch die Keilkonstante $D = 0,573 \text{ cm}^{-1}$. Anstieg der Kurve a: $\gamma_t = 3,98$. Logarithmierte $\log t$ -Schwärzungskurve (Kurve b), gezeichnet mit den logarithmierten Werten der Schleierschwärzungen (schwarze Kreise) zu Abb. 7. Verwendung des gleichen Koordinatensystems wie für die Darstellung der $\log t$ -Schwärzungskurve. Anstieg der Kurve b: $pn = 3,54$

Die $\log t$ -Schwärzungskurve kann ebenfalls zur Bestimmung der Keimordnungszahl herangezogen werden. Die Neigung der logarithmischen Schwärzungskurve liefert aber nicht unmittelbar die Keimordnungszahl n , sondern das Produkt des SCHWARZSCHILD-Exponenten p und der Keimordnungszahl, also pn . Dies folgt direkt aus Gl. (2), wenn man die Schwärzung als Funktion der Zeit darstellt und die Gleichung $S = f(t)$ analog zu Gl. (3) logarithmiert,

$$\lg S = pn \lg t + \text{const.} \tag{6}$$

Der Anstieg der Kurve b in Abb. 10 beträgt 3,54. Dieses Ergebnis stimmt gut mit der aus Abb. 6 ermittelten Keimordnungszahl $n = 4,0$ überein, wonach $np = 4 \cdot 0,883 = 3,53$ ist.

An Hand der Kurve a in Abb. 10 ist weiterhin eine Aussage darüber möglich, zu welchem Wertepaar der Belichtung und Schwärzung die Knickstelle der Kurve in Abb. 9 gehört. Demzufolge liegt die Knickstelle nur wenig unterhalb des Wendepunktes der Schwärzungskurve, der (nach Schätzung) etwa bei $t = 16$ s liegt. Ob zwischen der Knickstelle und dem Wendepunkt ein Zusammenhang besteht, kann zur Zeit noch nicht eindeutig aus dem vorliegenden empirischen Material gefolgert werden. Solche Feststellungen bedürfen vor allem noch der theoretischen Untermauerung.

Die Untersuchung photographischer Emulsionen hinsichtlich ihrer Keimordnung befindet sich noch in den Anfängen. Es eröffnet sich ein weites Forschungsfeld, wenn man bedenkt, daß nicht nur die Art der Emulsion, sondern Vor- und Nachbelichtungen, Vor- und Nachbehandlungen, photographische Effekte, Verarbeitungsbedingungen usw. die Keimordnungszahl beeinflussen. Derartige Untersuchungen vermögen viel Material zum weiteren Ausbau der Theorie des photographischen Prozesses und insbesondere zur Kritik der Stufentheorie des latenten Bildes zu liefern, von der in der vorliegenden Arbeit ausgegangen wurde.

Zusammenfassung

Ausgehend von theoretischen Untersuchungen von BURTON und BERG sowie GERTH über die Entstehung entwickelbarer Vollkeime aus Subkeimen wird die von Mees für den Durchhang der Schwärzungskurve angegebene empirische Beziehung

$$S = \text{const} \cdot E^n$$

an Hand verschiedener Photomaterialien überprüft und stets für gültig befunden. Der in seiner physikalischen Bedeutung bisher noch nicht geklärte Exponent n wird als eine Reaktionsordnungszahl der kinetischen Reaktion eines sich über 4 Stufen erstreckenden Keimaufbaus gedeutet. Nach der Theorie kann diese als „Keimordnungszahl“ bezeichnete Reaktionsordnungszahl nur zwischen den Grenzen $n = 1$ und $n = 4$ variieren. Innerhalb dieser Grenzen lagen auch alle empirisch ermittelten Keimordnungszahlen.

Durch Beeinflussung des latenten Bildes wird im allgemeinen die Keimordnungszahl verändert. Als ein Beispiel hierfür wird der Einfluß der Vorbelichtung auf die Keimordnungszahl angeführt. Mit zunehmender Vorbelichtung verringert sich die Keimordnungszahl bis auf den Wert $n = 1$.

Schrifttum

1. Burton, P. C., und W. F. Berg, Phot. J. **86B**, 2 (1946), Comm. H - 1052. - 2. Gerth, E., Z. wiss. Phot. **62**, 65 (1968). - 3. Renwick, F. F., Phot. J. **53**, 127 (1913). - 4. Hodgson, M. B., Brit. J. Phot. **64**, 654 (1917), Comm. 63. - 5. Allen, N. C. B., und T. N. Lafy, Nature **103**, 177 (1919). - 6. Bloch, G., und F. F. Renwick, Trans. Farad. **15**, 40 (1920). - 7. Wilsey, R. B., und H. A. Pritchard, J.O.S.A. **12**, 661 (1926); Am. J. Roentgenol. **32**, 789 (1934); Radiology **56**, 229 (1951). - 8. Becker, K., Filmisometrie - Grundlagen und Methoden der photographischen Verfahren zur Strahlendosis-

messung, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1962.- 9. Golden, R., und E. Tochilin, *Health Physics* **2**, 199 (1959). - 10. Gerth, E., *Z. wiss. Phot.* **60**, 106 (1967). - 11. Mees, C. E., *The Theory of the Photographic Process*, New York 1954, S. 180. - 12. Joos, G., und E. Schopper, *Grundriß der Photographie und ihrer Anwendungen besonders in der Atomphysik*, Frankfurt/M. 1958, S. 7. - 13. Gerth, E., *Z. wiss. Phot.* **59**, 1 (1965). - 14. Gerth, E., *Wiss. Z. PH Potsdam* **10**, 399 (1966). - 15. Reinders, W., und L. Hamburger, *Z. wiss. Phot.* **31**, 32, 365 (1932). - 16. Kröber, K., und E. Gerth, *Z. wiss. Phot.* **61**, 66 (1967). - 17. Gerth, E., Dissertation, PH Potsdam 1965.

Bei der Redaktion eingegangen: 8. Februar 1969

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. Klaus Kröber, VEB DEFA Studio für Spielfilme, 1502 Potsdam-Babelsberg,
August-Bebel-Str. 26-53
Dr. Ewald Gerth, Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Institut für Stern-
physik, Astrophysikalisches Observatorium Potsdam, 15 Potsdam, Telegrafenberg

Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie
Jährlich erscheint ein Band mit 12 Heften. Bezugspreis je Band MDN 28.- zuzügl. Postgebühren
Buchdruckerei Richard Hahn (H. Otto), 705 Leipzig (HI/18/12). Printed in Germany. ZLN 1380

Anmerkung des Mitverfassers E. GERTH im Jahre 2009:

Der Artikel aus der *Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie* lag 2009 als alter vergilbter Sonderdruck vor. Es war das Ziel, die Schrift möglichst originalgetreu zu reproduzieren und in das INTERNET abrufbar über die Homepage www.ewald-gerth.de als pdf-Datei einzufügen. Das verwendete Textverarbeitungsprogramm LaTeX 2e ermöglichte das vorteilhafte Setzen von Formeln, machte aber auch Umbrüche erforderlich, so dass Abweichungen im Schriftbild und in der Anordnung der Abbildungen in Kauf genommen wurden. In den Formeln wurde die von dem Textprogramm favorisierte Schreibweise der Variablen in Kursiv (Italics) übernommen.

Die Arbeit ist weiterhin zitierfähig in Bezug auf den Originaldruck vom Jahre 1969. Das Zitat der Homepage www.ewald-gerth.de/33.pdf ist ebenfalls gestattet.

Comment of the co-author E. GERTH in 2009:

The article from the journal *Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie* is given presently (2008) in form of an old yellowed reprint. It was the aim to reproduce the paper as far as possible faithfully in order to include it into the INTERNET and to make it capable for call by the homepage www.ewald-gerth.de as a pdf-file. The used word processing program LaTeX 2e enabled the advantageous setting of formulae but required also word wrapping, so that it was to cope with deviations of the typeface and the arrangement of the figures. In the formulae the writing style of the variables in italics was taken over from the word processing program for it was favored by this.

The article may be quoted further on in relation to the original of the year 1969. Quoting the homepage by the address www.ewald-gerth.de/33.pdf is allowed, too.

Determination of the speck-order number of commercial photographic emulsions

Klaus Kröber and Ewald Gerth

Abstract

Going back to theoretical investigations of BURTON and BERG as well as those of GERTH on the creation of developable full-specks out of sub-specks the empirically by MEES set up relation of the density S in dependence on the exposure light intensity E for the toe of the characteristic curve

$$S = \text{const} \cdot E^n$$

is proved at hand of different photographic materials and has been found to be valid in every case. The exponent n , which hitherto has not been clarified concerning its meaning, is explained as a reaction order number of the kinetic build-up process of developing specks extended over 4 steps. According to the theory this reaction order number – called “speck-order number” – varies only between the limits $n = 1$ and $n = 4$. Indeed, within these limits all empirically determined speck-order numbers were found. The speck-order number will be changed generally by influence onto the latent image. As an example for this statement the influence of the pre-exposure onto this magnitude is referred. With increasing pre-exposure the speck-order number decreases down to the limiting value $n = 1$.

Institutions and addresses of the authors in 1969:

Dipl.-Ing. Klaus Kröber, VEB DEFA Studio für Spielfilme, 1502 Potsdam-Babelsberg,
August-Bebel-Str. 26-53

Dr. Ewald Gerth, Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Institut für Stern-
physik, Astrophysikalisches Observatorium Potsdam, 15 Potsdam, Telegrafenberg

Commemoration of Klaus Kröber

Dipl.-Ing. Klaus Kröber (born 1905, July 5th) died on Dec. 9th, 1988 at the age of 83. He was one of the leading engineers in the field of film techniques of the nationally owned movie-producing enterprise DEFA, engaged especially in the development of measuring and controlling methods for deriving quality standards of raw film materials.

The co-author E. Gerth is deeply indebted to him for a long and true friendship as well as for a fruitful scientific cooperation, giving among other things the incentive to investigate the properties of the photographic emulsion represented by the characteristic curve.

Ewald Gerth, Potsdam, July 5th, 2009