

Ewald Gerth

Analytische Darstellung
der Kinetik des Keimaufbaus
beim fotografischen Prozess



Herbert Utz Verlag · München

Physik

Umschlagabbildung: © Mshake | Dreamstime.com



Dresden, Techn. Univ., 1971

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere
die der Übersetzung, des Nachdrucks, der
Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe
auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege
und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser
Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2013

ISBN 978-3-8316-4299-1

Printed in EC
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Analytische Darstellung der Kinetik des Keimaufbaus beim photographischen Prozess

Dissertation (B)
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Wissenschaften
(Dr. sc. nat.)

Verfasst von
Dr. rer. nat. Ewald Gerth

Eingereicht bei der Sektion Physik
der Technischen Universität Dresden

Potsdam, Juli 1971

Wortgetreue Neuauflage im Jahre 2012 durch den Verfasser
zum Zwecke der Einstellung in das Internet
unter der Adresse www.ewald-gerth.de/40dissertation-b.pdf

Die Neuauflage
der als Monographie herausgegebenen Habilitationsschrift

**Analytische Darstellung
der Kinetik des Keimaufbaus
beim photographischen Prozess**

widme ich meinem verehrten Lehrer, Berater und Förderer
Herrn Professor Dr. Dr. habil. Horst Melcher
zu seinem 86. Geburtstag am 22. März 2013
in Dankbarkeit und mit den besten Wünschen
für sein weiteres Leben und wissenschaftliches Wirken.

Dr. habil. Ewald Gerth
Potsdam, im März 2013

Der persönliche Dank des Verfassers:

Herrn Prof. Dr. REUTHER sei für sein förderndes Interesse an der Arbeit, zahlreiche Hinweise zu ihrer Gestaltung, kritische Diskussionen und die Unterstützung des Habilitationsverfahrens gedankt.

Herrn Prof. Dr. MELCHER, mit welchem mich eine langjährige freundschaftliche Zusammenarbeit verbindet, danke ich für tiefgehende Problemdiskussionen und die Ermunterung zur Fertigstellung dieser Arbeit.

In tiefer Dankbarkeit gedenke ich der Beratung und Hilfe, die mir von Herrn Prof. Dr. THOMAS † gewährt wurde.

Für eine grundlegende und wegweisende Diskussion über mathematische Probleme der vorliegenden Arbeit spreche ich Frau Dr. SCHÜTTE meinen Dank aus.

Herrn Dipl.-Ing. KRÖBER danke ich für viele gemeinsame Arbeiten, die dazu beitragen, die experimentellen Voraussetzungen für die in dieser Schrift dargelegte Theorie zu schaffen.

Des weiteren danke ich Herrn Dipl.-Phys. DOMKE für eine Reihe von Diskussionen zur Matrizentheorie.

Mein Dank gilt aber auch allen, die den Fortgang der Arbeit mit Interesse verfolgt und mich damit zu intensiver Leistung angespornt haben. An erster Stelle seien hier Herr Prof. Dr. h.c. GRIMMER und Herr Prof. Dr. LAU genannt, die durch ihre Persönlichkeit den menschlichen und wissenschaftlichen Weg das Verfassers mit geprägt haben.

Zu großem Dank bin ich auch Herrn Prof. Dr. WEMPE und Herrn Prof. Dr. RICHTER verpflichtet, die mein Vorhaben nicht nur mit Interesse verfolgt, sondern mich auch darin bestärkt und viel Verständnis für besondere Umstände aufgebracht haben.

Nicht zuletzt möchte ich aber auch meiner Frau danken, ohne deren aufopferungsvolle Hilfe die Fertigstellung der Arbeit zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich geworden wäre.

Potsdam, den 1. Oktober 1971

E. Gerth

Vorwort

Die hiermit vorgelegte Schrift ist das Ergebnis einer mehrjährigen Studie über Möglichkeiten zur analytischen Darstellung der Schwärzungskurve, die im Jahre 1963 im Zusammenhang mit Arbeiten an der Dissertation angeregt wurde.

Die Dissertation des Verfassers [30] bezog sich auf äquidensitometrische Verfahren zur Erfassung der Wirkungen von Doppelbelichtungen, die mit Hilfe von Schwärzungskurven und Schwärzungsfächern dargestellt wurden. Dabei entstand der Wunsch, die erhaltenen empirischen Ergebnisse in einheitlicher Form analytisch zu formulieren. Die bis dahin bekannten Darstellungsarten der Schwärzungsfunktion erwiesen sich aber als für diesen Zweck unzureichend. Deshalb wurde bereits in der Dissertation ein einfaches analytisches Verfahren zur Beschreibung der Schwärzungskurve angegeben, das auf der Keimstufenhypothese beruhte (auszugsweise veröffentlicht in [31]). Mit dieser Hypothese war es möglich, den SCHWARZSCHILD-Effekt und weitere photographische Effekte zumindest qualitativ zu beschreiben. Die analytische Darstellung war aber unbefriedigend, da die ihr zugrundeliegende Theorie noch nicht genügend ausgearbeitet war.

Nach dem Abschluss der Promotion (1965) verfolgte der Verfasser weiterhin das Ziel einer geschlossenen analytischen Darstellung der Schwärzungsfunktion [32, 33, 34]. Dabei zeigte es sich aber bald, dass die Problematik der photographischen Schwärzungsfunktion außerordentlich komplex ist.

Selbst bei einer Beschränkung auf rein physikalische Phänomene wäre es kaum möglich, im Rahmen des begrenzten Umfanges einer Habilitationsschrift (Dissertation B) die Zusammenhänge zwischen Belichtung und Schwärzung der photographischen Schicht mit der erforderlichen Gründlichkeit darzulegen.

Der Gegenstand der vorliegenden Schrift bezieht sich deshalb im wesentlichen nur auf ein Teilproblem der analytischen Darstellung der Schwärzungsfunktion: die Erfassung des funktionalen Zusammenhangs zwischen der Belichtung und der daraus im Silberhalogenidkristall resultierenden Konzentration an Entwicklungskeimen.

(Vorwort aus der Originalfassung der Dissertation B vom Jahre 1971)

Vorwort zur Neuauflage durch den Verfasser im Jahre 2012

Mit der öffentlichen Verteidigung einer Dissertation und ihrer Beurteilung durch die Prüfungskommission sowie der Abgabe der Pflichtexemplare ist üblicherweise ein Promotionsverfahren abgeschlossen. Es bestand zwar immer die Möglichkeit der Ausleihe oder der Anfertigung von Kopien, wovon aber selten Gebrauch gemacht wurde. Dazu kam dann häufig noch der schlechte Zustand der Exemplare, die mit Hilfe verschiedener Hektoigraphieverfahren hergestellt worden waren. Die vorliegende Dissertation B wurde im ORMIC-Verfahren vervielfältigt. Die violette Schrift auf dem vergilbten Papier verblasst vom Rande der Seiten her. Die Exemplare sind kaum noch ausleihbar.

In den vergangenen 40 Jahren seit der Originalausgabe der Schrift hat aber die Technik der Text- und der Informationsverarbeitung sowie der Medienverbreitung derartige Fortschritte gemacht, dass alte Formen daneben nicht mehr standhalten können. Darum entschloss sich der Verfasser, die gesamte Arbeit zu digitalisieren und in das Internet einzufügen unter der Adresse: www.ewald-gerth.de/40dissertation-b.pdf

Bei der Bearbeitung wurde streng darauf geachtet, dass die Neuauflage den Originaltext wortgetreu wiedergibt. Allerdings wurden die Rechtschreibung und die Symbolik der Formelzeichen der gegenwärtig geltenden Norm angepasst. So werden jetzt **fett**-gedruckte **Sans-serif**-Buchstaben für Vektoren und Matrizen anstatt der im Original enthaltenen, hand-eingetragenen **SÜTTERLIN**-Buchstaben verwendet.

Problematisch für die korrekte Reproduktion der Dissertation B in der Neuauflage war der im Original enthaltene Anhang, der als Beleg für die durchgeführten numerischen Rechnungen mit der seinerzeit noch neuartigen und den Gutachtern nicht geläufigen Programmierung auf elektronischen Rechenautomaten angefügt wurde. Der moderne, computerkundige Leser würde diesen Teil der Arbeit als antiquiert und überflüssig ansehen. Vielleicht interessiert er sich aber für alte (archaische) Programmsprachen und für die verwendeten Algorithmen. Als „salomonische“ Lösung wurde hier die Aufrufbarkeit von Teilen des Anhangs in der dokumentarischen Faksimile-Wiedergabe mit im Inhaltsverzeichnis und in Fußnoten angegebenen Internet-Adressen ermöglicht.

Den Abschluss der Promotion B bildete die Verteidigung an der Technischen Universität Dresden am 26. 04. 1972. An die zu erwartenden Opponenten wurden vorher von der Universität Thesen verteilt: www.ewald-gerth.de/40thesen.pdf

Der im Archiv des Verfassers aufbewahrte Verteidigungsvortrag ist wiedergegeben mit Kommentar unter der Internet-Adresse: www.ewald-gerth.de/40verteidigung.pdf

Die Promotion B wurde 1972 durch www.ewald-gerth.de/40urkunde-prom-b.pdf beurkundet und 1991 nach den gesetzlichen Bestimmungen des Einigungsvertrages in die Habilitation gewandelt: www.ewald-gerth.de/40urkunde-habil.pdf

In allen Phasen der Bearbeitung der Schrift als Buch stand mir meine Frau Gisela Gerth beratend, mit Verständnis und liebevoller Geduld bei. Ihr gilt mein großer Dank!

Potsdam, im März 2013

Dr. rer. nat. habil. Ewald Gerth

Inhaltsverzeichnis

0. Einleitung	1
Zielstellung der Arbeit	
1. Übersicht über bisherige reaktionskinetische Darstellungen zum photographischen Prozess	2
1.1. Die Schwärzung als Ergebnis einer photochemischen Reaktion des Silberhalogenids	2
1.2. Die Entstehung von Entwicklungskeimen als Ergebnis eines physikalischen Prozesses im Kristallgitter des Silberhalogenids	3
1.3. Neuere Modelle zum Reaktionsmechanismus der Keimbildung	4
2. Physikalische Grundlagen der Keimstufentheorie	5
2.1. Die Theorie des photographischen Prozesses in der Darstellung nach MITCHELL	5
2.2. Zur analytischen Behandlung der Reaktionskinetik des Keimaufbaus nach der MITCHELLSchen Theorie	7
3. Die Belichtung	9
4. Das Reaktionssystem der Elektronen- und Defektelektronenkonzentration	9
4.1. Reaktionskinetische Folgerungen aus dem Bändermodell	9
4.2. Aufstellung des Differentialgleichungssystems der Reaktion	10
4.3. Ansatz zu einer allgemeinen Lösung des Differentialgleichungssystems	11
4.4. Die Sättigungskonzentration der Elektronen und Defektelektronen	12
4.5. Die Kopplung zwischen den Reaktionssystemen der Elektronen und der Defektelektronen	13
4.6. Die Lösung der speziellen Riccatischen Differentialgleichung	14
4.7. Näherungslösung des nichtlinearen Differentialgleichungssystems durch Iteration	15
4.8. Die Zeitfunktionen der Elektronenkonzentration	15
4.9. Das Zeitintegral der Elektronenkonzentration	17
4.9.1. Vereinfachte Lösung für den Bereich niedriger Intensitäten	17
4.9.2. Allgemeine Lösung für den gesamten Intensitätsbereich	18
4.9.3. Folgerungen aus dem asymptotischen Verhalten der allgemeinen Lösung. Die „Zusatzzeit“	19

4.9.4. Das Reziprozitätsverhalten des Zeitintegrals der Elektronenkonzentration	20
5. Das Reaktionssystem der Keimkonzentrationen	23
5.1. Reaktionskinetische Folgerungen aus der Keimstufenhypothese	23
5.2. Das Reaktionsschema des Keimaufbaus	24
5.3. Die Übergangskoeffizienten	24
5.3.1. Die Hinreaktionskoeffizienten	25
5.3.2. Die Rückreaktionskoeffizienten	26
5.3.3. Einige Bemerkungen zu der Größenordnung der Koeffizienten	26
5.4. Das System der Reaktionsgleichungen	27
5.4.1. Die Struktur des Gleichungssystems	27
5.4.2. Die Matrizen-Differentialgleichung	27
5.4.3. Die Struktur der Koeffizientenmatrix	28
5.4.4. Die funktionale Abhängigkeit der Koeffizientenmatrix von den Belichtungsparametern und der Zeitvariablen	29
5.5. Die analytische Lösung des Systems der Reaktionsgleichungen	29
5.5.1. Die Überführung der Matrizen-Differentialgleichung in die äquivalente Matrizen-Integralgleichung	30
5.5.2. Die Lösung der VOLTERRASchen Integralgleichung	32
5.5.3. Die Belichtungsmatrix	33
5.5.4. Der Belichtungsmatrizant	34
5.5.5. Einige Grundeigenschaften der Belichtungsmatrix	35
5.6. Spezielle Lösungen	36
5.6.1. Näherungslösung für kleine Zeitintervalle	36
5.6.2. Infinitesimalkalkül und Produktintegral der Belichtungsmatrizen	37
5.6.3. Die Matrix-Exponentialfunktion	38
5.6.4. Die reziproke Belichtungsmatrix	39
5.7. Die Lösung des D'ALEMBERTSchen Differentialgleichungssystems mit Hilfe der LAPLACE-Transformation	40
5.8. Bedeutung und Geltungsbereich der Lösung für konstante Koeffizientenmatrizen	42
5.8.1. Separierung einer nichtkonstanten Koeffizientenmatrix in einen zeitabhängigen Skalarfaktor und einen zeitunabhängigen Matrixfaktor	43
5.8.2. Näherungsdarstellung der Lösung durch eine Matrix-Exponentialfunktion	44

5.8.3. Störungsrechnung	44
5.8.4. Abschließende Wertung der Lösung	45
5.9. Die analytische Struktur der Belichtungsmatrix	46
5.9.1. Das Eigenwertproblem	46
5.9.2. Die transponierte Adjunktenmatrix	47
5.9.3. Die Rücktransformation in den Originalraum	49
5.9.4. Reihenentwicklung der Elemente der Belichtungsmatrix	51
5.10. Vereinfachung des Eigenwertproblems durch Spezialisierung des Reaktionssystems	52
5.10.1. Physikalische Voraussetzungen für die Vereinfachung der Koeffizientenmatrix	52
5.10.2. Die Dreiecksmatrizen der Folgereaktionen	53
5.10.3. Teilweise Umwandlung von Gleichgewichtsreaktionen in Folgereaktionen	55
5.10.4. Folgereaktionen mit gleichartigen Übergangskoeffizienten	56
5.11. Die Kommutation der Belichtungsmatrizen	57
5.11.1. Die Vertauschungsrelation	57
5.11.2. Die Abweichung von der Kommutativität	60
5.11.3. Störungsrechnung	60
6. Die photographische Wirkung	62
6.1. Die Entwicklungskeimkonzentration	62
6.2. Die Reduktionswahrscheinlichkeitsfunktion	64
6.3. Die Schwärzungsfunktion	65
6.4. Die Ermittlung der Koeffizientenmatrix der kinetischen Reaktion des Keimaufbaus aus der Schwärzungsfunktion	66
7. Die reaktionskinetische Deutung der photographischen Belichtungseffekte	67
7.1. Das Reziprozitätsgesetz und der SCHWARZSCHILD-Effekt	67
7.1.1. Das Reziprozitätsgesetz bei niedrigen Belichtungsintensitäten und bei Kernstrahlung	68
7.1.2. Herleitung des SCHWARZSCHILD-Gesetzes	69
7.1.3. Numerische Berechnung	74
7.1.4. Theoretische Schlussfolgerungen	77
7.2. Doppelbelichtungseffekte	77
7.2.1. Der WEINLAND-Effekt	77
7.2.2. Der HERSCHEL-Effekt und die Regression	79

7.2.3. Der CLAYDEN-Effekt, der VILLARD-Effekt und der physikalische SABATTIER-Partialeffekt	80
7.3. Der Intermittenzeffekt	81
7.4. Der Solarisationseffekt	81
8. Zusammenfassung	84
Literaturverzeichnis	87
Symbolverzeichnis	96
Anhang	99
A.1. Die transponierten Adjunktenmatrizen der Ordnung 2, 4 und 5	99
A.2. Die numerische Ausführung der Rechnung mit Hilfe eines elektronischen Rechenautomaten (Faksimile-Wiedergabe aus der Originalschrift der Dissertation B)	101
A.2.1. – Die numerische Berechnung der reaktionskinetischen Prozesse des Keimaufbaus Internet-Adresse: www.ewald-gerth.de/40anhang-a.pdf	IN
A.2.2. – Berechnung des Zeitintegrals der Elektronenkonzentration Internet-Adresse: www.ewald-gerth.de/40anhang-b.pdf	IN
A.2.3. – Programm zur Berechnung der Belichtungsmatrix, der Keimkonzentration und der Reduktionswahrscheinlichkeit Internet-Adresse: www.ewald-gerth.de/40anhang-c.pdf	IN
A.2.4. – Programm zur Berechnung der Belichtungsmatrix, der Keimkonzentration und der Reduktionswahrscheinlichkeit Internet-Adresse: www.ewald-gerth.de/40anhang-c.pdf (Beschreibung) www.ewald-gerth.de/40anhang-d.pdf (Programm)	IN
A.2.5. – Die Eingabedaten Internet-Adresse: www.ewald-gerth.de/40anhang-e.pdf	IN
A.2.6. – Programm zur Berechnung von Doppel- und Mehrfachbelichtungen Internet-Adresse: www.ewald-gerth.de/40anhang-f.pdf	IN
Eidesstattliche Versicherung (Faksimile aus dem Original der Dissertation B)	102

0. Einleitung¹ – Zielstellung der Arbeit

Nach dem heutigen Stande des Wissens auf dem Gebiete der wissenschaftlichen Photographie und insbesondere der Photophysik darf es als sicher gelten, dass die Keimbildung beim photographischen Prozess eine mehrstufige kinetische Reaktion ist, deren Aufbauprozesse auf Umladungs- und Koagulationsvorgängen im Kristallgitter des Silberhalogenids beruhen, an denen freie Elektronen und Zwischengitter-Silberionen beteiligt sind, und deren Abbauprozesse auf die thermisch bedingte Instabilität der Keime zurückzuführen sind.

Für eine analytische Formulierung der Reaktionsvorgänge im Kristallgitter des Silberhalogenids liegen bisher nur einige Ansätze vor, die wegen der bei der Lösung der Reaktionsgleichungen auftretenden mathematischen Schwierigkeiten auf die einfachsten Fälle beschränkt sind und somit nicht das gesamte Reaktionssystem umfassen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, auf der Grundlage der heutigen Erkenntnis über die physikalischen Vorgänge beim photographischen Prozess durch geeignete mathematische Methoden eine analytische Formulierung für die von der Belichtung im Kristallgitter des Silberhalogenids ausgelöste photochemische Reaktionswirkung zu finden, die möglichst alle photographischen Belichtungssphänomene umfasst. Die analytische Formulierung der Belichtungseffekte – insbesondere des SCHWARZSCHILD-Effektes – gilt hierbei als Prüfstein für die prinzipielle Richtigkeit der Ansätze, Herleitungen und Ergebnisse.

Die analytische Darstellung hat drei wesentliche Aufgaben:

1. Sie bietet die Grundlage für eine von den Zufälligkeiten des Objektes weitgehend abstrahierende Erkenntnis der reaktionskinetischen Zusammenhänge beim photographischen Prozess.
2. Nach den analytischen Beziehungen kann die photographische Schwärzungsfunktion numerisch berechnet werden.
3. Durch Vergleich der analytischen und numerischen Ergebnisse mit dem Experiment und daraus gezogene Schlussfolgerungen wird ein Rückwirkungskreis geschlossen, der zur weiteren Vervollkommnung der Theorie des photographischen Prozesses dient.

¹Anmerkung des Verfassers im Jahre 2012:

Die Einleitung bezieht sich auf die Originalfassung der Schrift aus dem Jahre 1971. Bei der Bearbeitung des Textes zur Einstellung in das INTERNET empfahl es sich, einige aus der Sicht der Gegenwart (2012) schwer verständliche Darlegungen zu erläutern, ohne dies in den dokumentarisch integer gehaltenen Originaltext einzufügen. Außerdem sollte auch noch auf weiterführende Arbeiten verwiesen werden. Alle Bemerkungen aus der Zeit der Bearbeitung werden als Fußnoten mit Angabe der Jahreszahl beigefügt – wie auch im Falle dieser Fußnote. Ohne die Jahresangabe handelt es sich um Fußnoten, die auch schon in der Originalfassung der Schrift vorhanden waren. Die fortlaufende Numerierung aller Fußnoten ist durch das verwendete Textverarbeitungsprogramm (LaTeX 2e) vorgegeben.

1. Übersicht über bisherige reaktionskinetische Darstellungen zum photographischen Prozess

1.1. Die Schwärzung als Ergebnis einer photochemischen Reaktion des Siberhalogenids

Zum Ende des 19. Jahrhunderts hatte die physikalische Chemie einen bedeutenden Aufschwung erfahren. Mit Hilfe der insbesondere von VAN'T HOFF [84] entwickelten Lehre von der Reaktionskinetik war die analytische Beschreibung der Dynamik einer großen Zahl chemischer Prozesse möglich geworden. Es lag nahe, diese Gedankengänge auch auf den photographischen Prozess zu übertragen. Ein Versuch, die Entstehung der Schwärzung in der Photoschicht mit Hilfe zweier Reaktionsgleichungen zu beschreiben, wurde bereits 1894 von ELDER [30] (referiert bei ODENCRANTS [84]) unternommen; er führte aber zu keinem befriedigenden Ergebnis. Dagegen sind die Versuche von TRIVELLI und SCHAUM zur Deutung der speziellen Gestalt der Schwärzungskurve als eine frühe Erkenntnis in einer Zeit anzusehen, die für deren Erfassung und Anerkennung noch nicht reif war.

TRIVELLI [70] hatte 1908 die Hypothese aufgestellt, dass der Aufbau des latenten Bildes durch eine dreistufige Kette von Folgereaktionen darstellbar sei. Dabei wurde das einzelne Silberhalogenidkorn als ein homogenes Reaktionssystem angesehen. Mit dem bekannten zeitlichen Funktionsverlauf der Reaktionspartnerkonzentrationen konnte die Form der normalen Schwärzungskurve und auch der Solarisationsschwärzungskurve qualitativ gedeutet werden. Wenn auch die von TRIVELLI entwickelten Theorien heute nur noch historisches Interesse finden können, so muss doch festgestellt werden, dass von ihm der Gedanke der kinetischen Folgereaktion in bezug auf den photographischen Prozess zuerst ausgesprochen wurde. Allerdings wurden von TRIVELLI nicht die dazugehörigen Reaktionsgleichungen aufgestellt.

Aufbauend auf den Ergebnissen von TRIVELLI erweiterte SCHAUM das Reaktionsschema, indem er nicht nur Folgereaktionen, sondern Hin- und Rückreaktionen, also Gleichgewichtsreaktionen zwischen je zwei benachbarten Stufen, annahm. Die Rückreaktionen wurden dabei auf die Wirkung des HERSCHEL-Effektes zurückgeführt.

SCHAUM stellte aber nur die Reaktionsgleichungen für die Folgereaktionen auf, ohne weitere analytische Schlussfolgerungen daraus zu ziehen. Nur wenige Forscher haben die TRIVELLI-SCHAUMSche Hypothese der reaktionskinetischen Entstehung des latenten Bildes für weiterführende Arbeiten benutzt. Einen Niederschlag findet sie lediglich in einigen Arbeiten TRIVELLIS [71, 72, 73] und in einer Arbeit von VOLMER und SCHAUM [74], in der eine Reihe photographischer Effekte (HERSCHEL-Effekt, CLAYDEN-Effekt, Solarisation) mit Hilfe einer dreigliedrigen Kette von Gleichgewichtsreaktionen gedeutet werden. In diesen Arbeiten wird aber keine analytische Behandlung des Problems angegeben.

Physik

Ewald Gerth: **Analytische Darstellung der Kinetik des Keimaufbaus beim fotografischen Prozess**
2013 · 120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4299-1

Steffen Frank Straub: **Time Dependent Phenomena**
2001 · 131 Seiten · ISBN 978-3-8316-0060-1

Sara Romer: **Aggregation and Gelation of Concentrated Colloidal Suspensions**
2001 · 123 Seiten · ISBN 978-3-8316-0010-6

Carsten Zerbs: **Modelling the effective binaural signal processing in the auditory system**
2000 · 110 Seiten · ISBN 978-3-89675-821-7

Imke H. Libon: **THz-Spektroskopie an Halbleitern und Flüssigkeiten**
2000 · 176 Seiten · ISBN 978-3-89675-799-9

Arthur Andree: **Thermische Desorption von Ar-, Kr-, Xe-Mono- und Multilagen auf Ru(001): Energie-Winkelkorrelation**
2000 · 244 Seiten · ISBN 978-3-89675-736-4

Ahmet Ilhan Sen: **Moderne Physik in türkischen Schulen** · Entwicklung und Evaluation einer neuen Unterrichtskonzeption zur Quantenphysik in der gymnasialen Oberstufe
2000 · 249 Seiten · ISBN 978-3-89675-728-9

Alexander Metz: **Spektroskopie von $[sup]106[/sup]$ Au und das Konzept der Supersymmetrie im Modell wechselwirkender Bosonen (IBM)** · Spectroscopy of $[sup]106[/sup]$ Au and the Concept of Supersymmetry in the Interacting Boson Model
2000 · 163 Seiten · ISBN 978-3-89675-695-4

Thomas Herzog: **Untersuchungen zum Verhalten selbstorganisierter metallischer Nanoteilchen**
2000 · 214 Seiten · ISBN 978-3-89675-685-5

Dirk Welge-Lüßen: **Untersuchungen mit dem Laser-Rastertunnelmikroskop am System Methanol auf Silizium**
1999 · 152 Seiten · ISBN 978-3-89675-654-1

Robert E.W. Pfund: **Inelastische Prozesse in ultra-kurzer Laser-Materie-Wechselwirkung**
1999 · 165 Seiten · ISBN 978-3-89675-650-3

Antero Albersdörfer: **Über das Quellverhalten und die viskoelastischen Eigenschaften ultradünner, festkörperfester Polyelektrolytfilme** · Eine Untersuchung mittels Ellipsometrie und kolloidaler Sondentechnik
1999 · 124 Seiten · ISBN 978-3-89675-593-3

Klaus Neumaier: **Entwicklung und Anwendung eines Ellipsometrischen Mikroskops zur lokalen Dickenmessung ultradünner, mikrostrukturierter Adsorbatfilme auf Festkörperoberflächen**
1999 · 119 Seiten · ISBN 978-3-89675-573-5

Peter Schlagheck: **Das Drei-Körper-Coulomproblem unter periodischem Antrieb**
1999 · 166 Seiten · ISBN 978-3-89675-569-8

Markus B. Raschke: **Elementary Surface Reactions of Hydrogen and Oxygen on Silicon: An Optical Second-Harmonic Investigation**

1999 · 200 Seiten · ISBN 978-3-89675-564-3

Thomas Rosleff Bækmark: **Polymers at Interfaces: An Experimental Study of the Phase Behavior of Block Copolymers and Lipopolymers at the Air-Water Interface**

1999 · 156 Seiten · ISBN 978-3-89675-535-3

Ajay Pratap Singh: **Dynamik eines linearen Probemoleküls in einer glasigen Flüssigkeit**

2006 · 114 Seiten · ISBN 978-3-89675-527-8

Markus Nauroth: **Die Dynamik von normalen und unterkühlten Flüssigkeiten: Ein Vergleich von analytischen Theorien mit Computersimulation**

1999 · 240 Seiten · ISBN 978-3-89675-510-0

Rolf Schmidt: **Bestimmung der Nukleonendichte in der Kernperipherie mit antiprotonischen Atomen**

1999 · 120 Seiten · ISBN 978-3-89675-503-2

Doris A. Simson: **Entwicklung und Charakterisierung einer neuen mikromechanischen Methode zur Untersuchung der kraftinduzierten Dissoziation von einzelnen, spezifischen Bindungen zwischen Biomolekülen**

1999 · 107 Seiten · ISBN 978-3-89675-498-1

Andreas Saemann: **Erzeugung eines heißen Plasmas bei Festkörperflicht durch Einstrahlung von 150fs langen Laserpulsen**

1999 · 138 Seiten · ISBN 978-3-89675-491-2

Johannes Nardi: **Non-Equilibrium Phenomena of Free and Bound Vesicles: Modelling Cell Adhesion and Vesicle Transport**

1999 · 152 Seiten · ISBN 978-3-89675-490-5

Bernhard Ketzer: **Laserspektroskopie von metastabilem antiprotonischen Helium unter dem Einfluß von Fremdgasbeimischungen**

1999 · 228 Seiten · ISBN 978-3-89675-474-5

Anja Schlicht: **Normalleitende und supraleitende Eigenschaften von Farbstoff-Einlagerungsverbindungen des Wirtgitters 2H-TaS₂**

1999 · 132 Seiten · ISBN 978-3-89675-473-8

Heinrich Baldauf: **Aufbau einer linearen Quadrupolfalle zur Beobachtung von Quantenphänomenen gespeicherter Ionen**

1998 · 145 Seiten · ISBN 978-3-89675-453-0

Erhältlich im Buchhandel oder direkt beim Verlag:

Herbert Utz Verlag GmbH, München

089-277791-00 · info@utzverlag.de

Gesamtverzeichnis mit mehr als 3000 lieferbaren Titeln: www.utzverlag.de