

W. Göpel/Chr. Ziegler

Einführung in die Materialwissenschaften:
Physikalisch-chemische
Grundlagen und Anwendungen

Einführung in die Materialwissenschaften: Physikalisch-chemische Grundlagen und Anwendungen

Von Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Göpel
und Dr. rer. nat. Christiane Ziegler
Universität Tübingen



B.G. Teubner Verlagsgesellschaft
Stuttgart · Leipzig 1996

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Göpel

Geboren 1943 in Weimar, Thüringen. Physikstudium und Habilitation in Physikalischer Chemie an der Universität Hannover. In den Jahren 1978 bis 1981 Gastwissenschaftler beim Xerox Palo Alto Research Center und Stanford Synchrotron Radiation Center (CA, USA), Xerox Webster Research Center (NY, USA) und IBM T.J. Watson Research Center (NY, USA). Von 1981 bis 1983 Full Professor of Physics und Leiter des „Center of Surface Science and Submicron Analysis“ (MT, USA). Seit 1983 Direktor des Instituts für Physikalische und Theoretische Chemie an der Universität Tübingen.

Dr. rer. nat. Christiane Ziegler

Geboren 1964 in Tübingen, Baden-Württemberg. Studium der Chemie in Tübingen, Promotion in Physikalischer Chemie in Tübingen. 1992 Gastwissenschaftlerin in Linköping, Schweden, 1994 Gastwissenschaftlerin im Riken Institut, Japan. Von 1991 bis 1994 Wissenschaftliche Assistentin, seit 1995 Akademische Rätin im Institut für Physikalische und Theoretische Chemie an der Universität Tübingen.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Göpel, Wolfgang:

Einführung in die Materialwissenschaften :
physikalisch-chemische Grundlagen und Anwendungen /
von Wolfgang Göpel und Christiane Ziegler. –
Stuttgart ; Leipzig : Teubner, 1996

ISBN 978-3-8154-2111-6 ISBN 978-3-322-93440-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-93440-6

NE: Ziegler, Christiane:

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1996

Satz: Schreibdienst Henning Heinze, Nürnberg

Vorwort

„Interdisziplinäre Ausbildung und Forschung“ gilt als zeitgemäß. In den Naturwissenschaften lösen sich traditionelle Grenzen zwischen Physik, Chemie, Biologie und Ingenieurwissenschaften insbesondere dann auf, wenn es sich um die Entwicklung, Charakterisierung und Optimierung „neuer Materialien“ handelt. Die Entwicklung wohlgeordneter Strukturen von Materialien mit besonderen Eigenschaften wird beispielsweise mit modischen Stichwörtern wie Hochleistungskeramiken, Nanostrukturen, intelligente Materialien („smart materials“) oder Mikrosystemtechnik charakterisiert. In diesen Bereichen sollten interdisziplinär arbeitende „Materialwissenschaftler“ über Grundlagen der klassischen Studiengänge der Physik, Chemie, Biologie und Ingenieurwissenschaften verfügen. Nur so lassen sich beispielsweise die praktischen und theoretischen Aufgaben lösen beim Herstellen neuer Materialien mit extremen thermischen, mechanischen, elektrischen, dielektrischen, optischen oder magnetischen Eigenschaften, beim Miniaturisieren von elektronischen und optischen Bauelementen („Top-down Approach“), beim Synthetisieren neuer organischer Strukturen („Bottom-up Approach“), beim Simulieren biomolekularer Funktionseinheiten oder beim Aufbau von Hybridsystemen in Mikro- oder Nanometerdimensionen mit einer Kombination aus Halbleiter-Bauelementen und organischen oder biologischen Funktionseinheiten.

Im Gegensatz zu den USA, wo es schon lange eigene Lehrstühle und Studiengänge für Materialwissenschaften gibt, werden in Deutschland die Studenten mit Interesse an diesem Gebiet überwiegend in einem der o.g. klassischen Studiengänge ausgebildet.

Die physikalisch-chemische Grundausbildung deckt dabei i.allg. den für das Grundlagenverständnis zentralen Bereich ab, Spezialvorlesungen konzentrieren sich auf Teilaspekte.

Aus der Idee, erstmalig einen systematischen Einstieg in die Materialwissenschaften mit einem Schwerpunkt auf den physikalisch-chemischen Grundlagen in Buchform zu veröffentlichen, entstanden zwei aufeinander abgestimmte Monographien.

6 Vorwort

- In der ersten Monographie werden die klassischen physikalisch-chemischen Themenbereiche „Aufbau der Materie“ und „Mikroskopie und Spektroskopie“ in sich geschlossen behandelt. Sie kann als Lehrbuch und Grundlage beispielsweise in der Ausbildung der Chemiker oder Physiker eingesetzt werden.
- Die hier vorliegende zweite Monographie mit dem Titel „Einführung in die Materialwissenschaften: physikalisch-chemische Grundlagen und Anwendungen“ behandelt phänomenologische thermische, mechanische, elektrische, dielektrische, optische und magnetische Eigenschaften. Dazu werden zahlreiche ausgewählte Anwendungsbeispiele vorgestellt, in denen diese Eigenschaften entweder empirisch oder auf mikroskopischer Ebene systematisch optimiert werden. Dieser Stoff kann v.a. auch in der Ingenieurausbildung eingesetzt oder als Vertiefung der ersten Monographie für Spezialvorlesungen oder Wahlpflichtfächer verwendet werden. Beide Bände können sowohl als Lehrbücher als auch als Nachschlagewerke eingesetzt werden und geben gemeinsam einen systematischen Einstieg in die heutigen Materialwissenschaften mit dem Schwerpunkt auf ihrem atomistischen Verständnis als wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung „neuer Materialien“. Dieser methodische Zugang charakterisiert einen deutlichen Trend: Die für den Praktiker wichtigen phänomenologischen Eigenschaften von Materialien werden nicht mehr rein empirisch optimiert, sondern oft über die Kontrolle atomarer Strukturen „ingenieurgemäß“ (über „atomic engineering“) ganz gezielt eingestellt.

Die vorliegende Stoffauswahl ist aus zahlreichen Vorlesungs- und Seminarunterlagen entstanden, die unter sehr verschiedenen Randbedingungen erarbeitet wurden: Dazu gehören Skripten von Fortbildungskursen im Rahmen der Gesellschaft Deutscher Chemiker, des Verbands Deutscher Ingenieure oder verschiedener Technischer Akademien, Skripten von Vorlesungen im Rahmen der Weiterbildung von Chemikern, Physikern und Ingenieuren an einem Forschungszentrum (Center of Surface Science and Submicron Analysis, Montana State University, USA), Skripten von Vorlesungen im Rahmen der physikalisch-chemischen Grundausbildung von Chemikern, Physikern und Biochemikern an Hochschulen (Universitäten Hannover und Tübingen) sowie Skripten zu Vorlesungen im Rahmen der wissenschaftlichen Weiterbildung mit dem Ziel eines europäischen Diploms in "Materials Science" (ERASMUS-Kurse seit 1990).

Die Erfahrungen bei diesen unterschiedlichen Veranstaltungen zeigten, daß Teilbereiche der Materialwissenschaften als Stoff von Grundvorlesungen in

unterschiedlichen Studiengängen häufig ohne Querverweise angeboten werden. So besteht ein großer Bedarf für eine zusammenfassende Monographie, um diese Querbezüge unterschiedlicher methodischer Ansätze der Materialwissenschaften kennenzulernen, um interdisziplinäre Probleme lösen zu lernen und um dieses Wissen an Beispielen zur Lösung neuer Aufgaben zu trainieren.

Keine Monographie ist auf Anhieb perfekt, v.a. wenn sie ein weites Gebiet umfaßt. Wir sind deshalb dankbar für jede Hilfe, Kritik, Anregung und Korrektur.

Zum Schluß möchten wir uns für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen bei Kollegen, Mitarbeitern und Studenten bedanken. Dies gilt insbesondere für Prof. Alan Chadwick, Canterbury, der uns Material über Punktdefekte und Einkristallzucht zur Verfügung stellte, sowie den anderen europäischen Kollegen des „Materials Science“-ERASMUS-Konsortiums. Danken für kritische Durchsicht, Anregungen, Ergänzungen möchten wir auch den Dozenten der Physikalischen Chemie an der Universität Tübingen: Prof. Günther Gauglitz, Prof. Volker Hoffmann, Prof. Heinz Oberhammer, Prof. Dieter Oelkrug, Priv.Doiz. Dines Christen und Prof. Hans-Dieter Wiemhöfer (jetzt Münster). Danken möchten wir schließlich den unentbehrlichen Helfern beim Abfassen des umfangreichen Manuskripts: Dr. Christine Stadler-Scipioni und Christine Schierbaum.

Tübingen, Februar 1995

Wolfgang Göpel
Christiane Ziegler

Inhalt

	Symbolverzeichnis	11
0	Einleitung	17
1	Aufbau der Materie	25
1.1	Teilchen-Welle-Dualismus	25
1.2	Quantenmechanik	31
1.3	Atome	38
1.4	Mehrteilchensysteme und chemische Gleichgewichte	47
1.4.1	Erlaubte Energieniveaus in Idealgasen	49
1.4.2	Systematik der Bindungstypen bei inner- und intermolekularen Wechselwirkungen	50
1.5	Festkörper	59
1.5.1	Systematik der Bindungstypen	59
1.5.2	Geometrie und elektronische Bandstruktur	61
1.6	Oberflächen und Grenzflächen	67
1.7	Energiezustände und Temperatur	72
1.7.1	Teilchendefinitionen	74
1.7.2	Temperatur als Verteilungsmodul für Besetzungswahrscheinlichkeiten	76
1.7.3	Allgemeine thermodynamische Funktionen und statistische Thermodynamik	78
2	Phänomenologische Eigenschaften	80
2.1	Thermische und chemische Eigenschaften	89
2.1.1	Wärmekapazität	89
2.1.2	Wärmeleitfähigkeit	96
2.1.3	Thermische Ausdehnung	99
2.1.4	Phasendiagramme	101
2.1.5	Thermodynamik	112

3	Neue Materialien und ihre Anwendungen	256
3.1	Dünne Schichten zur Kontrolle von Korrosion, Verschleiß und Reibung	257
3.2	Klebstoffe	259
3.3	Verbundwerkstoffe	262
3.4	Metalle und Legierungen	268
3.5	Keramiken und Gläser	270
3.6	Nanokristalle	284
3.7	Heterogene Katalyse	286
3.8	Chemische Sensorik	291
3.8.1	Sensoren und chemische Analytik	291
3.8.2	Elementarschritte der molekularen Detektion	295
3.8.3	Sensorarrays und „elektronische Nasen“	308
3.9	Brennstoffzellen	313
3.10	Anorganische Materialien der Mikroelektronik und Photonik .	317
3.11	Organische Materialien der molekularen Elektronik und Optik	335
3.12	Polymere	343
3.13	Supramolekulare Strukturen	352
3.14	Membranen	356
3.15	Biokompatible Materialien und biohybride Systeme	360
4	Präparation definierter Materialien und Strukturen	368
4.1	Zucht von Einkristallen	370
4.2	Herstellung dünner Schichten	373
4.2.1	Molekularstrahlepitaxie	374
4.2.2	Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)	377
4.2.3	Selbstorganisierte Schichten	379
4.2.4	Modifizierung	382
4.3	Strukturierung	383
4.3.1	Ätzverfahren	384
4.3.2	Lithographie	387
4.3.3	Nanostrukturierung mit STM und SFM	390
4.4	Mikrosystemtechnik	396
4.4.1	Herstellung von Si-Wafern	398
4.4.2	Fertigungstechnologien der Mikroelektronik	399
4.4.3	Mikrostrukturtechnik	412
5	Literatur	417

10 Inhalt

6	Anhang	426
6.1	Schrödingergleichung	426
6.2	Phänomenologische Thermodynamik	431
6.2.1	Definitionen	431
6.2.2	Zustandsfunktionen	432
6.2.3	Hauptsätze	434
6.2.4	Fundamentalgleichungen	436
6.2.5	Gleichgewichtsbedingungen	441
6.3	Tabellen	443
	Sachverzeichnis	462

Symbolverzeichnis

a	Gitterkonstante	D	Diffusionskonstante für molare Konzentrationen
a	Absorptionskoeffizient	D	Duktilität
a	Länge eines eindimensionalen Potentialtopfs	D	Debyelänge
a	Aktivität	$D(x)$	Zustandsdichte von „x“-Zuständen
a^{YX}	Transportkoeffizient	\underline{e}	piezoelektrischer Modul
\tilde{A}	Admittanz	e	Elektron
A	freie Energie, Helmholtzenergie	e	Elementarladung
A	polare Achse	$e\Delta V_s$	Bandverbiegung
A	Fläche, auch A_{\square}	\underline{E}	el. Feldstärke
A_{\square}	Fläche (bei Verwechslungsgefahr mit freier Energie, sonst A)	E	Energie
		E	Elastizitätsmodul, Dehnungsmodul
\underline{b}	Burgersvektor	E	elektromotorische Kraft (EMK)
\underline{B}	magnetische Induktion	E^0	Standard-EMK
B	Rotationskonstante	E_A	Aktivierungsenergie
B_R	Remanenz	E_b	Bindungsenergie
c	Lichtgeschwindigkeit	E_C	Energie an der Leitungsbandunterkante
c	Konzentration	E_C	Coulomb-Energie
C	Krümmung der Oberfläche	E_F	Fermi-Energie
C	Kapazität	E_g	Energie der Bandlücke
C	Wärmekapazität	E_{kin}	kinetische Energie, gleichbedeutend mit T
C_p	Wärmekapazität bei konstantem Druck	E_p	Energie des Pumpniveaus bei Lasern
C_p^*	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	E_{pot}	potentielle Energie, gleichbedeutend mit V
C_V	Wärmekapazität bei konstantem Volumen	E_V	Energie an der Valenzbandoberkante
\underline{d}	piezoelektrischer Koeffizient	E_{vac}	Energie des Vakuumniveaus
d	Abstand		
\underline{D}	dielektrische Verschiebung		
D'	Diffusionskonstante für Teilchenkonzentrationen		

12 Symbolverzeichnis

E_N	Elektronegativität	K	Zahl der Komponenten
f	Aktivitätskoeffizient	K	Gleichgewichtskonstante
\underline{F}	Kraft	l	Länge
\underline{F}_C	Coulombkraft	l	Drehimpulsquantenzahl eines Eielektronensystems
\underline{F}_L	Lorentzkraft	L	Induktivität
\underline{F}_N	Normalkraft	L	phänomenologischer (Diffusions-) Koeffizient
\underline{F}_R	Reibungskraft	m	Masse
\underline{F}_T	Tangentialkraft	m	Reaktionsordnung
F	Faradaysche Konstante	m_i	magnetische Quantenzahl bezüglich der Quantenzahl i
F	Zahl der Freiheitsgrade	$\underline{M}_{(v)}$	Magnetisierung
g	Gewichtsprozent	$M_{(v)R}$	Remanenz
g	Entartungsgrad	$M_{(v)S}$	Sättigungsmagnetisierung
G^*	Sensoreigenschaft	\underline{n}	Normalenvektor
G	freie Enthalpie, Gibbsenergie	n	Brechungsindex
G	Schermodul, Schubmodul, Torsionsmodul	n	Hauptquantenzahl
h	Loch	n	Quantenzahl der Translation
h	Plancksches Wirkungsquantum	n	Molzahl
\hbar	$h/2\pi$	N	Anzahl von Teilchen
\hat{H}	Hamiltonoperator	N_L	Avogadrokonstante, Loschmidtzahl
\underline{H}	Magnetfeld	\underline{p}	Impuls
\underline{H}_C	Koerzitivfeldstärke	p	Druck
H	Enthalpie	\underline{P}	Polarisation
i	imaginäre Einheit	P	Zahl der Phasen
I	Stromstärke	P	Wahrscheinlichkeit
I	Intensität	P_O	Orientierungspolarisation
I	Ionisierungsenergie	P_V	Verschiebungspolarisation
\underline{j}	Stromdichte	q	Ladung eines Teilchens
\underline{j}_\square	Flächenstromdichte	q	Streuquerschnitt, Wirkungsquerschnitt
\underline{J}	Fluß	Q	Ladung
J	Rotationsquantenzahl	Q	Wärmemenge
\underline{k}	Wellenvektor	Q	Kapazität eines nicht-idealen Kondensators
k	Betrag Wellen(zahl)vektor	$Q_{(s)ss}$	Oberflächenladungsdichte
k	Boltzmannkonstante	$Q_{(s)sc}$	Ladungsdichte in der Raumladungsschicht
k	Kraftkonstante	\underline{r}	elektrooptischer Koeffizient
k	Geschwindigkeitskonstante	r	Radius
k^0	Arrheniusfaktor		
$k(\lambda)$	molarer Absorptionskoeffizient		

r	Abstand zwischen Ladungen	v	Quantenzahl der Vibration
R	Reflektivität	V	Volumen
R	Rate	V	potentielle Energie, gleichbedeutend mit E_{pot} , vor allem in quantenmechanischen Gleichungen verwendet
R	Atomabstand	V	Spannung, gleichbedeutend mit U
R	elektrischer Widerstand	V	Leerstelle
R	Dämpfungskonstante	V_{Bias}	Biasspannung
R	allgemeine Gaskonstante	W	Arbeit
R	Zahl unabhängiger Reaktionen	x	Ortskoordinate
R_H^*	Hallkonstante	x	Molenbruch
R_{ads}	Adsorptionsrate	x_i	Meßgröße der Komponente „i“
R_{des}	Desorptionsrate	y	Ortskoordinate
R_H	Rydbergkonstante	z	Ortskoordinate
s	Spinquantenzahl eines Elektronensystems	z	Zahl von Elementarladungen
s	Elastizitätskoeffizient	z	Wertigkeit eines Atoms, Kernladung, Ordnungszahl
s	Abstand	z	Abstand von der Oberfläche
\underline{S}	Pointingvektor	\tilde{Z}	Impedanz
S	Schwerpunkt	\tilde{Z}_C	kapazitiver Widerstand
S	Haftkoeffizient	\tilde{Z}_{CPE}	konstantes Phasenelement
S	Entropie	\tilde{Z}_L	induktiver Widerstand
S	Schmelze	\tilde{Z}_R	ohmscher Widerstand
t	Zeit	\tilde{Z}_W	Warburgimpedanz
T	absolute Temperatur	Z	Zustandssumme
T	kinetische Energie, gleichbedeutend mit E_{kin} , vor allem in quantenmechanischen Gleichungen verwendet	$Z_{(s)}$	Stoßzahl
T_c	Sprungtemperatur bei Supraleitern	$\underline{\alpha}$	Polarisierbarkeit
T_C	Curie-Temperatur	$\bar{\alpha}$	Polarisierbarkeitsvolumen
T_g	Glastemperatur	α	Winkel
T_m	Schmelztemperatur	α	Madelung-Konstante
T_N	Neél-Temperatur	α	Ausdehnungskoeffizient
\underline{u}	Beweglichkeit	α	Bezeichnung einer Phase
U	Spannung, gleichbedeutend mit V	β	Winkel
U	innere Energie	β	Bezeichnung einer Phase
U_{Bias}	Biasspannung	γ'	Praktischer Aktivitätskoeffizient bei Teilchenkonzentrationen
U_H	Hallspannung		
\underline{v}	Geschwindigkeit		

14 Symbolverzeichnis

γ	Praktischer Aktivitätskoeffizient bei molaren Konzentrationen	μ	reduzierte Masse
γ	Winkel	μ	chemisches Potential
γ	Grenzflächenenergiedichte, Grenzflächenspannung, Oberflächenspannung	μ	Reibungskoeffizient
γ	Koeffizient eines Sensorarrays	μ_0	magnetische Feldkonstante
δ	Partiellladung	μ_r	relative Permeabilitätszahl
δ_{mn}	Kroneckerdelta	$\tilde{\nu}$	Wellenzahl
Δ	Laplace-Operator	ν	Frequenz
Δ	Differenz	ν	Stöchiometriefaktor
ΔG_R	freie Reaktionsenthalpie	ν	Poissonzahl
ΔG_{reakt}	Aktivierungsbarriere einer (Teil-) Reaktion	ξ	Reaktionslaufzahl
$\underline{\underline{\varepsilon}}$	Dielektrizitätskonstante	π	Zahl pi
$\tilde{\varepsilon}_r$	relative Dielektrizitätskonstante	ρ	Ladungsdichte
ε	Dehnung	ρ_{el}	spezifischer Widerstand
ε_0	el. Feldkonstante	ρ	Dichte
ε'_r	Realteil von $\tilde{\varepsilon}_r$	$\underline{\sigma}$	spezifische Leitfähigkeit
ε''_r	Imaginärteil von $\tilde{\varepsilon}_r$	σ	mechanische Spannung
η	Viskositätszahl	σ	Haftwahrscheinlichkeit
η_e	elektrochemisches Potential	σ_{\square}	Flächenleitfähigkeit
θ	Winkel	τ	Zeitkonstante
θ	Benetzungswinkel	τ	Lebensdauer, Relaxationszeit
Θ	Bedeckungsgrad	τ	Scherkraft
Θ	Winkel	φ	Spreitungsdruck, zweidimensionaler Druck
Θ	reduzierte Temperatur	φ	Phase einer Welle
κ	Kompressibilität, Kompressionsmodul	φ	elektrisches Potential
λ	Wellenlänge	φ	Winkel
λ	Wärmeleitungskoeffizient	φ	Fugazitätskoeffizient
Λ	mittlere freie Weglänge	φ	Funktion
Λ_M	Maxwellsche mittlere freie Weglänge	φ_i	inneres elektrisches Potential, Galvanipotential
$\underline{\underline{\mu}}$	Permeabilitätskonstante	ϕ	Zustandsfunktion
$\underline{\underline{\mu}}$	Dipolmoment	Φ	Austrittsarbeit
$\underline{\underline{\mu}}_{\text{el}}$	elektrisches Dipolmoment	$\underline{\underline{\chi}}_{\text{el}}$	dielektrische Suszeptibilität
$\underline{\underline{\mu}}_m$	magnetisches Dipolmoment	$\underline{\underline{\chi}}_m$	magnetische Suszeptibilität
μ	Absorptionskoeffizient	χ	Elektronenaffinität
		χ_2	dielektrische Suszeptibilität 2. Ordnung
		χ_3	dielektrische Suszeptibilität 3. Ordnung
		χ^{YX}	Responsefunktion

Ψ^*	komplex konjugierte Funktion zur Wellenfunktion Ψ	X_{chem}	Chemisorptions-
Ψ	Wellenfunktion	X^{chem}	Größe der Chemisorptionsphase
Ψ_0	Wellenamplitude	X_C	Coulomb-
ω	Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz	X_C	Kollektor-
ω	Elektrostriktion	X_C	Kapazitäts-
\square	freier Platz	X_{des}	Desorptions-
∇	Nabla-Operator	X_{diff}	Diffusions-
(111)	Bezeichnung einer Fläche	X_{diss}	Dissoziations-
[111]	Bezeichnung einer Normalen	X^{diss}	Größe im dissoziierten Zustand
$\langle X \rangle$	Erwartungswert	X_D	Drain-
\underline{X}	Matrix oder Tensor	X_D	Debye-
$\underline{\underline{X}}$	vektorielle Größe	X_e	Elektronen-
\tilde{X}	komplexe Zahl	X_e	Gleichgewichts-
\hat{X}	Operator	X_{el}	elektrisch
\bar{X}	Mittelwert bzw. Erwartungswert	X^{exc}	Exzeß-
X^{\cdot}	positiv geladener Punktdefekt	X_{ext}	äußere Größe
X'	negativ geladener Punktdefekt	X_E	Emitter-
X^{\times}	neutraler Punktdefekt	X_E	Eck-
X^{\neq}	Größe im Übergangszustand	X_E	Einstein-
X^0	Standardwert, manchmal auch X_0	X_f	Endzustands-
X_0	Ausgangswert, Grundwert oder Standardwert, letzteres auch X^0	X_f	Bruch-
X_{∞}	Größe im Unendlichen	X_f	Bildungs-
$ \text{Im}\tilde{X} $	Imaginärteil von \tilde{X}	$X_{F.E.}$	pro Formeleinheit
$ \text{Re}\tilde{X} $	Realteil von \tilde{X}	X_{FE}	Feldefekt-
X^{ad}	Größe der Adsorptionsphase	X^g	Größe der Gasphase
$X_{\text{adhäs}}$	Adhäsions-	X_g	Glas-
X_{ads}	Adsorptions-	X_{ges}	Gesamt-
X_{attr}	Anziehungs-	X_{grenz}	Grenz-
X_A	Absorptions-	X_h	Löcher-
X_A	Anionen-	X_H	Halbzellen-
X_b	Volumen-, auch X_V	X_{HL}	Halbleiter-
X^b	Größe der Volumenphase	X_i	Anfangszustands-
X_B	Basis-	X_i	Zwischengitter-
X_{Bias}	Bias-	X_i	innen
X_c	kritische Größe	X_{in}	innere Größe
		X_{in}	influenziert
		X_{ind}	induziert
		X_{ion}	Ionen-

16 Symbolverzeichnis

X_{kin}	kinetisch	X_R	Reaktions-
$X_{\text{kohäs}}$	Kohäsions-	X_R	Reflexions-
X_{kond}	Kondensations-	X_R	ohmsch
X_K	Kanten-	X^s	Größe der festen Phase
X_K	Kationen-	X_s	Spin-
X^l	Größe der flüssigen Phase	X_s	Oberflächen-
X_l	linear	X_{seg}	Segregations-
X_{loc}	lokale Größe	X_{stat}	statisch
X^{OF}	an der Oberfläche	$X_{(s)}$	auf die Oberfläche bezogene Größe X/A
X_m	Schmelz-	X_S	Schwerpunkts-
X_m	magnetisch	X_t	Übergangs-
X_m	molare Größe	X_{tot}	Gesamt-
X_{max}	maximal	X^{tot}	Größe des Gesamtsystems
X_{min}	minimal	X_{trans}	Translations-
X_{Me}	Metall-	X_T	Transmissions-
X_n	Kern-	X_{vac}	Vakuum-
X_{nach}	Größe nachher	X_{verd}	Verdampfungs-
X_{ox}	oxidiert	X_{vib}	Vibrations-
X^{phys}	Größe der Physisorptionspha- se	X_{vor}	Größe vorher
X_{pot}	potentiell	$X_{(v)}$	auf das Volumen bezogene Größe X/V
X_{real}	reale Größe	X_V	Volumen-, auch X_b
X_{red}	reduziert	X_z	Größe in z -Richtung
X_{rep}	Abstoßungs-	$X^{\alpha(\beta)}$	Größe der α - bzw. β -Phase
X_{rev}	reversible Größe		
X_{rot}	Rotations-		