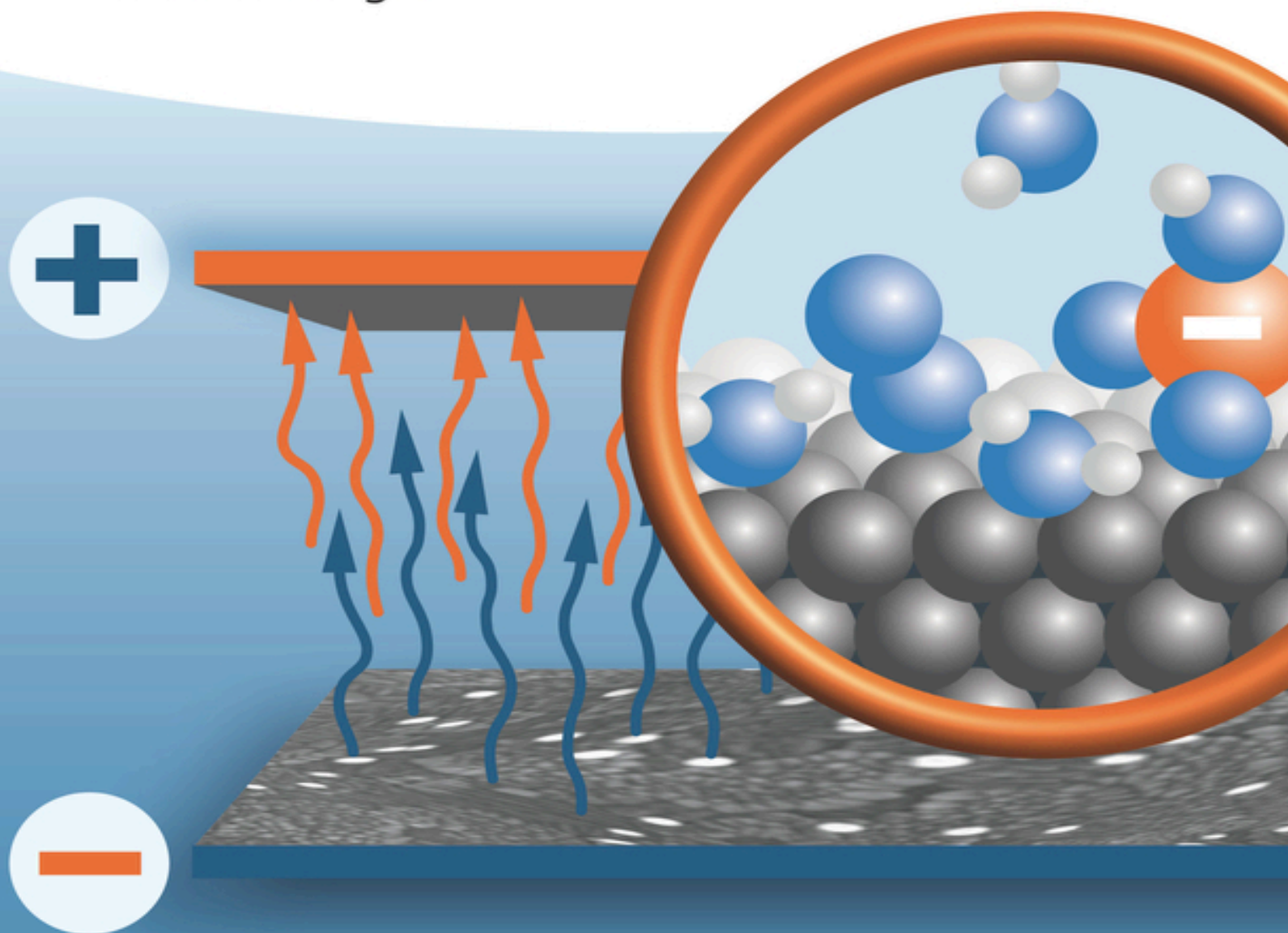


Gunther Wittstock

Lehrbuch der Elektrochemie

Grundlagen, Methoden, Materialien,
Anwendungen



Lehrbuch der Elektrochemie

Lehrbuch der Elektrochemie

Grundlagen, Methoden, Materialien, Anwendungen

Gunther Wittstock

unter Mitarbeit von Bernd Speiser und Julia Witt

Autor

Gunther Wittstock
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
Institut für Chemie
26111 Oldenburg
Germany

Titelbild Oleg Sklyar und Gunther Wittstock

Zusatzmaterial für Studierende und Dozierende finden Sie unter www.wiley-vch.de/
ISBN9783527327843

Alle Bücher von WILEY-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

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.

© 2023 Wiley-VCH GmbH, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN: 978-3-527-32784-3

ePDF ISBN: 978-3-527-80454-2

ePub ISBN: 978-3-527-80451-1

Umschlaggestaltung: Formgeber, Mannheim

Satz: Straive, Chennai, India

Druck und Bindung

Inhalt

Symbole für physikochemische Größen in diesem Buch xvii

Abkürzungen in diesem Buch xxvii

Noch ein Lehrbuch der Elektrochemie, muss das wirklich sein? 1

Elektrochemie – schon lange etabliert, aber immer noch kompliziert? 1

Was dürfen Sie nun von dem Fachgebiet und dem Buch erwarten? 2

Historische und aktuelle Lehrbücher 4

Danksagung 5

Bildquellen 6

Teil I Grundlagen 9

1 Die Elektrodenreaktion – der Kern der Elektrochemie 11

1.1 Stromfluss und Stoffumsatz in elektrochemischen Zellen 11

1.2 Elektroden und Ionen 13

1.3 Welche quantitative Beziehung besteht zwischen Stoffumsatz und Ladung? 16

1.4 Welche Beziehung besteht zwischen Stromfluss und Reaktionsgeschwindigkeit? 17

1.5 Galvanische Zellen und Elektrolysezellen 20

Zusammenfassung 22

Kontroll- und Übungsaufgaben 22

Weiterführende Literatur 23

2 Die Thermodynamik elektrochemischer Reaktionen 25

2.1 Von der Zellspannung zum Elektrodenpotential 25

2.1.1 Die Definition der Zellspannung 25

2.1.2 Elektrochemische Spannungsreihe 26

2.2 Welcher Zusammenhang besteht zwischen Zellspannung und thermodynamischen Potentialen? 28

2.2.1 Das elektrochemische Potential 28

2.2.2 Die Nernst'sche Gleichung 33

2.2.3 Aktivitäten sind effektive Konzentrationsgrößen 39

2.2.4 Berechnung der Standardzellspannung 41

2.2.5 Abhängigkeit der Gleichgewichtszellspannung von Zustandsgrößen 43

2.3 Zellspannungen entstehen durch Ladungstrennungen an Grenzflächen – die Galvani-Spannung 47

2.3.1 Die Galvani-Spannung an Ionenelektroden 48

2.3.2 Die Galvani-Spannung an Redoxelektroden 49

2.3.3	Ladungstrennung und Galvani-Spannungen ohne Elektroden	50
2.3.4	Die Kombination von Galvani-Spannungen zur Zellspannung	54
2.3.5	Elektroden mit Mischpotentialbildung	57
2.4	Anwendung von Zellspannungsmessungen und die Nutzung galvanischer Zellen	57
2.4.1	Referenzelektroden	57
2.4.2	Ermittlung thermodynamischer Größen	66
2.4.3	Gehaltsbestimmungen mit Potentiometrie	68
2.4.4	Überblick über elektrochemische Energiewandlungssysteme	69
	Zusammenfassung	80
	Kontroll- und Übungsaufgaben	80
	Weiterführende Literatur	82

3 Die elektrochemische Kinetik – Homogene und heterogene Prozesse 85

3.1	Kopplung von Massentransfer und Grenzflächenreaktion	85
3.1.1	Welche Teilschritte treten bei Elektrodenreaktionen an Ionen- und Redoxelektroden auf?	86
3.1.2	Elektrodenreaktionen sind Mehrschrittreaktionen	88
3.2	Kinetik des Ladungstransferschrittes	90
3.2.1	Repetitorium: Homogene Gleichgewichtsreaktionen und Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit	90
3.2.2	Ableitung der Butler-Volmer-Gleichung	92
3.2.3	Welche inhaltliche Bedeutung besitzen die Symbole in der Butler-Volmer-Gleichung?	97
3.2.4	Was bedeutet der Transferkoeffizient α ?	101
3.2.5	Welche Grenzfälle ergeben sich aus der Butler-Volmer-Gleichung?	102
3.2.6	Wie sieht die Butler-Volmer-Gleichung aus, wenn die Elektrodenreaktion selber aus mehreren Elementarschritten besteht?	106
3.2.7	Reagieren mehrere Redoxpaare an einer Elektrode, bildet sich ein Mischpotential aus	107
3.2.8	Wo stößt der Butler-Volmer-Formalismus an seine Grenzen?	108
	Zusammenfassung	110
	Kontroll- und Übungsaufgaben	111
	Weiterführende Literatur	113

4 Massentransport und Randschichten 115

4.1	Überblick und Begriffe	116
4.2	Migration	117
4.2.1	Struktur der Elektrolytphase und Ionenbeweglichkeit	117
4.2.2	Elektrische Größen zur Charakterisierung der Ladungsträgerbewegung	120
4.2.3	Zwischen Ionenbeweglichkeit und Leitfähigkeit besteht ein definierter Zusammenhang	124
4.2.4	Warum sind molare Leitfähigkeiten starker Elektrolyte konzentrationsabhängig?	126
4.2.5	Das Gesetz der unabhängigen Ionenbewegung	126
4.2.6	Warum ist die molare Leitfähigkeit von schwachen Elektrolyten so viel stärker von der Konzentration abhängig als bei starken Elektrolyten?	127
4.2.7	Überführungszahlen beschreiben den Anteil einer Ionensorte am Gesamtstrom	131
4.2.8	Interionische Wechselwirkungen	136

4.2.9	Aktivitätskoeffizienten	140
4.2.10	Leitfähigkeitskoeffizienten	143
4.3	Die elektrische Doppelschicht	145
4.3.1	Die elektrischen Eigenschaften der Doppelschicht	145
4.3.2	Die molekulare Struktur der elektrischen Doppelschicht	147
4.3.3	Wie verändert die Adsorption von Ionen und Molekülen die Struktur und die Eigenschaften der elektrischen Doppelschicht?	149
4.4	Diffusion	154
4.4.1	Zufallsbewegung eines Teilchens	155
4.4.2	Massentransport durch Diffusion – das erste Fick'sche Gesetz	158
4.5	Diffusionsschichten	161
4.5.1	Zeitliche Veränderung von Konzentrationsprofilen – das zweite Fick'sche Gesetz	161
4.5.2	Stromverlauf und Konzentrationsprofile bei Potentialsprungexperimenten (Chronoamperometrie)	162
4.6	Kombinierte Transportprozesse bei der Elektrophorese	169
4.6.1	Grundprinzip	169
4.6.2	Varianten der Elektrophorese von Proteinen	171
4.6.3	Kapillarelektrophorese	175
4.7	Zusammenfassung der Transportmechanismen in der Nernst-Planck-Transportgleichung	182
	Kontroll- und Übungsaufgaben	185
	Weiterführende Literatur	186

Teil II Untersuchungsmethoden der Elektrochemie 189

5	Elektroanalytische Methoden und elektrochemische Sensoren	191
5.1	Stammbaum elektroanalytischer Methoden	191
5.2	Potentiometrie	193
5.2.1	Wann ist eine Ruhezellspannung selektiv für eine Ionensorte?	193
5.2.2	Membranelektroden	194
5.2.3	Glaselektroden	196
5.2.4	Selektivität und Nachweisgrenzen von ISE	198
5.2.5	Festkörpermembran-Elektroden	201
5.2.6	Flüssigmembranelektroden	202
5.2.7	Potentiometrische Sensoren	205
5.2.8	Die Lambda-Sonde	207
5.2.9	Zusammenfassung Potentiometrie	209
5.3	Dynamische elektrochemische Methoden	210
5.3.1	Potentiostaten und Galvanostaten	210
5.3.2	Elektroden für voltammetrische Untersuchungen	212
5.3.3	Elektrolytlösungen für voltammetrische Untersuchungen	217
5.3.4	Zellgefäße für voltammetrische Untersuchungen	218
5.3.5	Cyclovoltammetrie	219
5.3.6	Moderne Quecksilberelektroden und Pulsprogramme	232
5.3.7	Differenzpuls-Voltammetrie	233
5.3.8	Square Wave-Voltammetrie	235
5.3.9	Übersicht über weitere Signalformen und ihre Anwendung	238
5.3.10	Verfahren mit integrierter Anreicherung (Stripping-Verfahren)	242
5.3.11	Einsatz der Standardadditionstechnik zur Verringerung von Matrixeffekten	245
5.3.12	Speziation mit voltammetrischen Verfahren	246

5.4	Amperometrische Sensoren	248
5.4.1	Amperometrische Detektion in Fließsystemen	249
5.4.2	Amperometrische Endpunktanzeige bei Titrationsen	250
5.4.3	Die Clark-Elektrode	251
5.5	Voltammetrie bei besonderen Massentransportbedingungen – immobilisierte Redoxsysteme	252
5.6	Voltammetrie bei besonderen Massentransportbedingungen – Mikroelektrode	256
5.6.1	Stationäre Ströme	256
5.6.2	Warum entstehen stationäre Ströme?	257
5.6.3	Wie ändert sich der Strom vor der Einstellung des stationären Stroms?	261
5.6.4	Cyclovoltammetrie an Mikroscheibenelektroden	264
5.6.5	Analytische Eigenschaften und Einsatzgebiete von Mikroelektroden	269
5.6.6	Arrays aus Mikroelektroden	274
5.7	Instrumentelle Grundlagen von elektrochemischen Messgeräten	278
5.7.1	Aufbau moderner voltammetrischer Arbeitsplätze	278
5.7.2	Fehlersuche und Fehlerbeseitigung in potentiostatischen Versuchsaufbauten	283
	Kontroll- und Übungsaufgaben	285
	Weiterführende Literatur	290
6	Aufklärung elektrochemischer Reaktionsmechanismen in flüssigen Elektrolyten	297
6.1	Kombination von Reaktionsschritten zur Elektrodenreaktion	298
6.1.1	Welche Fragen müssen wir untersuchen?	298
6.1.2	Nomenklatur für Mechanismen von Elektrodenreaktionen	300
6.2	Von der Messkurve zum Modellmechanismus	300
6.2.1	Wie sollten Experimente durchgeführt werden?	300
6.2.2	Wie läuft eine Messreihe ab?	302
6.2.3	Woran erkennen wir einen bestimmten Mechanismus?	303
6.2.4	Diagnostische Kriterien als Hinweis auf Bausteine elektrochemischer Modellmechanismen	306
6.2.5	Zonendiagramme	309
6.3	Wann ist ein Modellmechanismus plausibel?	312
6.3.1	Simulation (Modellierung)	312
6.3.2	Isolierung und Charakterisierung von Zwischenstufen und Produkten	319
6.4	Wichtige mechanistische Modelle in der molekularen Elektrochemie in flüssigen Phasen	319
6.4.1	Ein-Elektronen-Transferreaktionen ohne separate chemische Schritte	320
6.4.2	Mehr-Elektronen-Transferreaktionen ohne separate chemische Schritte	322
6.4.3	Gekoppelte chemische Reaktionen	325
6.4.4	ECE-Varianten	328
6.4.5	Das Quadratschema und seine Varianten	331
6.4.6	Katalyse durch Elektronentransfer	332
6.4.7	Spezielle Effekte	334
6.5	Wie bestimmen wir Reaktionsparameter?	336
6.5.1	Das Auswertungsproblem in der mechanistischen Elektrochemie	337
6.5.2	Direkte Auswertungsmethoden	337
6.5.3	Datentransformation: Linearisierung und Semiintegration	338
6.5.4	Nutzung von Arbeitskurven	340
6.5.5	Globale Anpassung an Messkurven	341
6.5.6	Wie optimieren wir die Qualität voltammetrischer Messungen?	344

- 6.5.7 Ausblenden und Modifizieren von Reaktionsschritten 347
- 6.6 Ergänzende Techniken 351
- 6.6.1 Elektrolyse und Coulometrie 351
- 6.6.2 Wie lassen sich die Reaktionsladungszahl n und der Diffusionskoeffizient D bestimmen? 354
- 6.6.3 Spektroelektrochemie 357
 - Zusammenfassung 362
 - Kontroll- und Übungsaufgaben 362
 - Weiterführende Literatur 363

7 Elektrochemische Impedanzspektroskopie 371

- 7.1 Ohm'sche Widerstände und ideale Kondensatoren im Wechselstromkreis 373
- 7.2 Impedanzmessung an elektrochemischen Zellen 375
 - 7.2.1 Instrumentierung 375
 - 7.2.2 Vorgehen bei Impedanzmessungen 377
- 7.3 Ersatzschaltbilder typischer Elektroden und Zellen 378
 - 7.3.1 Impedanz einer elektrochemischen Zelle ohne Stoffumsatz 378
 - 7.3.2 Elektrode mit Stoffumsatz ohne Begrenzung durch Diffusion 380
 - 7.3.3 Elektrode mit Stoffumsatz unter Berücksichtigung der Diffusion 382
- 7.4 Entwicklung von Ersatzschaltbildern 385
 - 7.4.1 Partiiell blockierte Elektrode 386
 - 7.4.2 Elektrode mit poröser Deckschicht 387
 - 7.4.3 Poröse Elektrode 387
 - 7.4.4 Konstant-Phasen-Elemente (CPE, *constant phase elements*) 389
 - Zusammenfassung 392
 - Kontroll- und Übungsaufgaben 392
 - Weiterführende Literatur 393

8 Untersuchung von Grenzflächenstrukturen 395

- 8.1 Überblick und Systematik 395
- 8.2 Schwingungsspektroskopie an Oberflächen 397
 - 8.2.1 Infrarot-Reflexions-Absorptionsspektroskopie (IRRAS) 398
 - 8.2.2 Raman-Spektroskopie 404
 - 8.2.3 Ausnutzung nichtlinearer optischer Effekte 406
 - 8.2.4 Elektronenenergie-Verlustspektroskopie (EELS) 407
- 8.3 Ellipsometrie 407
- 8.4 Oberflächenplasmonenresonanz 411
- 8.5 Spektroskopie innerer Elektronen 413
 - 8.5.1 Primär- und Sekundärprozesse 413
 - 8.5.2 Elektronenspektroskopie 415
 - 8.5.3 Röntgenabsorptionsspektroskopie 428
- 8.6 Röntgendiffraktion 432
- 8.7 Massenspektrometrie 433
- 8.8 Elektrochemische Quarzkristall-Mikrowaage 433
 - 8.8.1 Piezoelektrischer Effekt und Quarzmikrowaage 434
 - 8.8.2 Beeinflussung der mechanischen Resonanzfrequenz 436
 - 8.8.3 Typische Anwendungen 437
- 8.9 Einkristallelektroden 441
 - 8.9.1 Struktur von Metallkristallen und ihre idealen Oberflächen 442
 - 8.9.2 Was verstehen wir unter Oberflächenrekonstruktion? 445
 - 8.9.3 Welche Defekte existieren an Oberflächen? 445
 - 8.9.4 Wie lassen sich Einkristallelektroden präparieren? 446

8.9.5	Wie werden Einkristallelektroden charakterisiert?	448
8.9.6	Was sind Überstrukturen?	450
8.9.7	Überstrukturen aus spezifisch adsorbierten Anionen	453
8.9.8	Überstrukturen aus Metallatomen nach Unterpotential-Abscheidung	453
8.10	Ein zweiter Blick auf die elektrochemische Doppelschicht	455
8.10.1	Grenzphase und Exzessgrößen	457
8.10.2	Ladungsüberschuss an Elektroden	459
8.10.3	Das Nullladungspotential	462
8.10.4	Grenzflächenüberschuss und Adsorptionsisotherme	465
8.10.5	Vergleich experimenteller Daten mit den Doppelschichtmodellen	468
8.10.6	Wie beeinflusst die Struktur der elektrischen Doppelschicht die Reaktionsgeschwindigkeit?	471
8.11	Elektrochemische Rastertunnelmikroskopie (ECSTM) und elektrochemische Rasterkraftmikroskopie (ECSFM)	473
8.11.1	Mikroskopie jenseits des Beugungslimits	473
8.11.2	Prinzip der Rastertunnelmikroskopie	477
8.11.3	Elektrochemische Rastertunnelmikroskopie (ECSTM)	479
8.11.4	Grundprinzipien der Rasterkraftmikroskopie	482
8.11.5	Arbeitsmodi der Rasterkraftmikroskopie	484
8.11.6	Kraft-Abstandskurven	488
8.11.7	Anwendungen der ECSFM	489
8.11.8	Artefakte, Bildauflösung und Probenmanipulation in STM- und SFM-Experimenten	490
8.12	Elektrochemische Rastermikroskopie (SECM)	491
8.12.1	Instrumentierung und Überblick	491
8.12.2	Der Feedback-Modus	492
8.12.3	Oberflächentitrationsmodus	498
8.12.4	Generator-Kollektor-Modus	500
8.12.5	Redoxkonkurrenzmodus	501
8.12.6	Direktmodus	501
8.12.7	Nutzung homogener Reaktionen	502
8.12.8	Möglichkeiten zur Verbesserung der lateralen Auflösung	504
8.12.9	Anwendungen der elektrochemischen Rastermikroskopie	505
8.13	Weitere Rastersondenmikroskopien	507
8.13.1	Photoelektrochemische Rastermikroskopie	507
8.13.2	Raster-Ionenleitfähigkeits-Mikroskopie	508
8.13.3	Rasterzellmikroskopie	510
8.13.4	Raster-Referenz-Elektroden-Technik, vibrierende Rasterelektroden-Technik, lokalisierte Impedanzmessung und Ohm'sche Mikroskopie	512
8.13.5	Raster-Kelvin-Sonde	513
	Kontroll- und Übungsaufgaben	515
	Weiterführende Literatur	518

Teil III Materialien von und für Elektrochemie 533

9 Elektrochemische Materialabscheidung 535

9.1	Mit welchen Methoden lassen sich Materialien elektrochemisch abscheiden?	536
9.1.1	Galvanische Abscheidung	536
9.1.2	Immersionsabscheidung	537

9.1.3	Autokatalytische Metallabscheidung	537
9.1.4	Abscheidung von Halbleitern	538
9.2	Wachstumsformen bei Metallabscheidungen	539
9.2.1	Wachstum dünner Metallschichten auf Fremdunterlagen	539
9.2.2	Thermodynamik der Keimbildung	540
9.2.3	Kinetik der Keimbildung	542
9.2.4	Wachstum der Keime	544
9.2.5	Vom Keim zu geschlossenen Filmen	545
9.2.6	Die Entwicklung der Mikrostruktur	547
9.3	Wie beeinflusst die Stromdichte die Abscheidung?	549
9.3.1	Welcher Zusammenhang besteht zwischen Stromdichte und Mikrostruktur?	549
9.3.2	Wodurch entstehen Stromdichteverteilungen?	551
9.3.3	Die Wagner-Zahl – Welche Stromdichteverteilung ist die entscheidende?	552
9.3.4	Pulsabscheidungen	553
9.3.5	Einfluss der Badtemperatur	554
9.4	Welche Zusammensetzung weisen galvanische Bäder auf?	554
9.4.1	Grundtypen galvanischer Bäder	554
9.4.2	Welche Funktion erfüllen Komplexbildner?	555
9.4.3	Welche Funktionen erfüllen Glanzbildner, Einebner, Aktivatoren und Netzmittel?	556
9.5	Abscheidung komplexer Materialien	560
9.5.1	Direkte Legierungsabscheidung	560
9.5.2	Unter welchen Bedingungen können Legierungen abgeschieden werden?	562
9.5.3	Abscheidung von Multischichten und Kompositen	563
9.6	Elektrochemie an bipolaren Elektroden	564
9.6.1	Grundlagen	564
9.6.2	Zellkonfigurationen mit bipolaren Elektroden und ihre Anwendung	565
	Kontroll- und Übungsaufgaben	567
	Weiterführende Literatur	568
10	Halbleiterelektrochemie	571
10.1	Struktur und Bindung in Halbleitern	571
10.1.1	Kristallstrukturen der Halbleiter	571
10.1.2	Elektronische Struktur der Halbleiter	572
10.1.3	Das Fermi-Niveau	580
10.1.4	Dotierung von Halbleitern	584
10.1.5	Die Quasi-Fermi-Niveaus	587
10.2	Halbleiterelektroden	587
10.2.1	Halbleitergrenzflächen und Raumladungszone	587
10.2.2	Das Flachband-Potential	593
10.2.3	Strom-Spannungskurven an Halbleiterelektroden im Dunkeln	595
10.2.4	Photoströme an Halbleiterelektroden	597
10.2.5	Experimentelle Besonderheiten	598
10.2.6	Spezielle Untersuchungsmethoden für photoelektrochemische Reaktionen an Halbleiterelektroden	600
10.3	Anwendungen der Halbleiterelektrochemie	602
10.3.1	Mineralisierung organischer Stoffe in Abwasser	603

- 10.3.2 Farbstoffsensibilisierte Solarzellen als Beispiel für photovoltaische Zellen 605
- Kontroll- und Übungsaufgaben 609
- Weiterführende Literatur 611

11 Festkörperelektrolyte und andere unkonventionelle Elektrolytsysteme 615

- 11.1 Warum enthalten kristalline Festkörper Defekte? 616
 - 11.1.1 Bezeichnung der Punktdefekte 616
 - 11.1.2 Defekte in Festkörpern als Verallgemeinerung der Chemie von Elektrolytlösungen und der Elektronenstruktur von Halbleitern 618
 - 11.1.3 Wechselwirkungen mit Nachbarphasen 620
 - 11.1.4 Komplexe Defektstrukturen 622
 - 11.1.5 Thermodynamik der Punktdefekte 623
- 11.2 Ionenleitfähigkeit in Festkörpern 625
 - 11.2.1 Mechanismen der Ionenleitung in Festkörpern 625
 - 11.2.2 Messung der Leitfähigkeit in Festkörpern 627
 - 11.2.3 Wichtige ionenleitende Festkörper 628
- 11.3 Randschichten in Festelektrolyten 632
 - 11.3.1 Wie lassen sich die Erkenntnisse zur elektrischen Doppelschicht und Raumladungszone verallgemeinern? 632
 - 11.3.2 Erhöhung der Leitfähigkeit in nanokristallinen Festkörpern 634
- 11.4 Elektrochemie in Salzschnmelzen und ionischen Flüssigkeiten 635
 - 11.4.1 Alkalimetall-halogenide 635
 - 11.4.2 Ionische Flüssigkeiten 637
 - 11.4.3 Stark eutektische Lösungsmittel 640
- 11.5 Leitfähigkeit in Gläsern 641
- 11.6 Leitfähigkeit in Polymeren 642
 - 11.6.1 Polymerelektrolyte und Gel-Elektrolyte 642
 - 11.6.2 Polyelektrolyte 643
- Kontroll- und Übungsaufgaben 645
- Weiterführende Literatur 647

12 Elektrokatalyse 651

- 12.1 Konzept und Definitionen 652
 - 12.1.1 Katalyse und Elektrokatalyse 652
 - 12.1.2 Aktivität und Selektivität 654
 - 12.1.3 Wichtige Elementarschritte unter Beteiligung adsorbierter Intermediate 656
- 12.2 Theoretische Behandlung von Elektronentransferreaktionen 657
 - 12.2.1 Tunnelprozesse von Elektronen 657
 - 12.2.2 Elektronentransferreaktionen folgen dem Franck-Condon-Prinzip – Die Marcus-Theorie 658
 - 12.2.3 Von der Reorganisationsenergie zu Geschwindigkeitskonstanten 661
 - 12.2.4 Welche Vorhersagen macht die Marcus-Theorie? 662
 - 12.2.5 Welche Rolle spielt das Elektrodenmaterial für die Geschwindigkeit der Elektrodenreaktion? 663
- 12.3 Die Rolle von Intermediaten für die Elektrokatalyse 664
 - 12.3.1 Ein-Elektronen-Transfer ohne Intermediat 664
 - 12.3.2 Zwei-Elektronen-Transfer mit einem Intermediat 664

- 12.3.3 Transfer von mehr als zwei Elektronen unter Beteiligung von mehr als einem adsorbierten Intermediat 667
- 12.3.4 Wie lassen sich die unterschiedlichen Adsorptionsenergien der Intermediate auf Übergangsmetallen erklären? 670
- 12.4 Messmethoden zur Untersuchung elektrokatalytischer Reaktionen 672
 - 12.4.1 Wie bestimmen wir die wirksame Oberfläche? 672
 - 12.4.2 Bestimmung der Aktivität mit der rotierenden Scheiben-Elektrode 675
 - 12.4.3 Bestimmung der Selektivität mit der rotierenden Ring-Scheiben-Elektrode 679
 - 12.4.4 Elektrochemische Charakterisierungsverfahren für Elektrokatalysatoren mit verbessertem Massentransfer 680
 - 12.4.5 Wie arbeitet die differentielle elektrochemische Massenspektrometrie (DEMS)? 681
- 12.5 Wichtige elektrokatalytische Reaktionen 684
 - 12.5.1 Die Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) und die Sauerstoffentwicklungsreaktion (OER) 684
 - 12.5.2 Oxidation von Kohlenstoffmonoxid, Ameisensäure, Methanol und anderen Alkoholen 687
 - 12.5.3 Kohlenstoffdioxid-Reduktionsreaktion 688
 - 12.5.4 Chlorentwicklungsreaktion 688
 - Kontroll- und Übungsaufgaben 689
 - Weiterführende Literatur 690

13 Modifizierte Elektroden 697

- 13.1 Monolagensystem 698
 - 13.1.1 Selbstassemblierte Monolagen 698
 - 13.1.2 Alkanthiolate auf Au und Ag 699
 - 13.1.3 Silane auf oxidischen Oberflächen 705
 - 13.1.4 Reduktion von Aryldiazoniumsalzen 706
 - 13.1.5 Einstellung von Oberflächeneigenschaften mit SAMs 706
 - 13.1.6 Langmuir-Schichten 709
 - 13.1.7 Filmtransfer-Techniken 713
- 13.2 Polymerschichten auf Elektroden 716
 - 13.2.1 Schicht-um-Schicht-Abscheidung von Polyelektrolyten 716
 - 13.2.2 Isolierende Polymere 717
 - 13.2.3 Ionenaustauscher und Redoxpolymere 718
 - 13.2.4 Intrinsisch leitfähige Polymere 718
- 13.3 Filme aus organisch-anorganischen Hybridmaterialien 725
 - 13.3.1 Ionenaustauscher und Oxidfilme 725
 - 13.3.2 Polyoxometallate, Polycyanometallate, leitfähige Koordinationsnetzwerkverbindungen 725
- 13.4 Voltammetrie modifizierter Elektroden 726
 - 13.4.1 Überblick 726
 - 13.4.2 Wie ändert sich die Thermodynamik der Redoxreaktionen, wenn Redoxzentren in einen Film eingebettet werden? 728
 - 13.4.3 Elektrodenkinetik immobilisierter Redoxsysteme 730
 - 13.4.4 Wie beeinflussen Adsorbat-Adsorbat-Wechselwirkungen die Voltammogramme? 733
 - 13.4.5 Elektronentransport in dicken Filmen 734
 - 13.4.6 Reaktionen an blockierten Elektroden 735
 - 13.4.7 Reaktionen an einer Elektrode mit permeablem Film 736
 - 13.4.8 Umsetzung an einer Elektrode mit einem katalytisch aktiven Film 737

- 13.4.9 Elektrochemisch ausgelöste Filmmodifikationen 738
- Kontroll- und Übungsaufgaben 739
- Weiterführende Literatur 740

Teil IV Anwendungen 747

14 Korrosion und Korrosionsschutz 749

- 14.1 Was ist Korrosion? 750
- 14.2 Das Pourbaix-Diagramm – Die Thermodynamik der Korrosion 754
- 14.3 Kinetik von Korrosionsprozessen und Passivität 760
 - 14.3.1 Evans-Diagramme für gleichmäßige Flächenkorrosion 760
 - 14.3.2 Passivität 767
- 14.4 Grundsätzliche Möglichkeiten für den Korrosionsschutz 769
- 14.5 Wichtige und typische Korrosionsszenarien 771
 - 14.5.1 Gleichmäßige Flächenkorrosion 772
 - 14.5.2 Flächenkorrosion in Salzlösungen – ein Beispiel für den Übergang zu lokalen Korrosionsformen 774
 - 14.5.3 Lochfraßkorrosion 776
 - 14.5.4 Kontaktkorrosion 780
 - 14.5.5 Mikrobiologisch induzierte Korrosion 780
 - 14.5.6 Spannungsrisskorrosion 781
 - 14.5.7 Korrosion von Legierungen und Entlegierung 781
- 14.6 Gezielte Metallauflösung 787
 - 14.6.1 Herstellung nanoporöser Metalloxidschichten 787
 - 14.6.2 Elektrochemisches Abtragen 791
- Kontroll- und Übungsaufgaben 795
- Weiterführende Literatur 796

15 Batterien 801

- 15.1 Überblick über elektrochemische Energiewandlungssysteme 802
- 15.2 Kenngrößen von Batterien 805
 - 15.2.1 Kapazität und Energie 805
 - 15.2.2 Leistung und Ragone-Diagramm 808
 - 15.2.3 Effizienz von Energiespeichern 810
 - 15.2.4 Weitere Kenngrößen 812
- 15.3 Klassifizierung von Batterien 814
 - 15.3.1 Einteilung nach dem Typ des Aktivmaterials 814
 - 15.3.2 Primäre und sekundäre Zellen 819
 - 15.3.3 Einteilung nach Formfaktoren und Anschlussparametern 819
 - 15.3.4 Verteilung der Stromdichte in Batterien 825
- 15.4 Zink-Mangan-Batterien als Beispiele für Primärzellen 825
- 15.5 Bleiakkumulator als wiederaufladbare Batterie mit wässrigem Elektrolyt 828
 - 15.5.1 Überblick 828
 - 15.5.2 Fluch und Segen der Nebenreaktionen 829
 - 15.5.3 Ausgewählte Details der technischen Umsetzung 831
- 15.6 Lithium-Ionen-Batterien 834
 - 15.6.1 Prinzipieller Aufbau 835
 - 15.6.2 Die negative Elektrode 836
 - 15.6.3 Der Elektrolyt und die Solid-Electrolyte-Interphase 842
 - 15.6.4 Positive Elektrodenmaterialien 848

15.6.5	Alterung von Lithium-Ionen-Batterien	851
15.7	Metall-Luft-Batterien	852
15.8	Vanadium-Redox-Flussbatterie	854
	Kontroll- und Übungsaufgaben	855
	Weiterführende Literatur	856
16	Brennstoffzellen	861
16.1	Überblick	861
16.2	Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)	863
16.2.1	Membran	863
16.2.2	Elektroden und Bipolarplatte	864
16.2.3	Arbeitskurve einer Brennstoffzelle	865
16.2.4	Alterung von Brennstoffzellen	869
16.3	Varianten der Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzellen	871
16.3.1	Direktmethanol-Brennstoffzelle und Direktethanol-Brennstoffzelle	871
16.3.2	Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle	872
16.3.3	Edelmetallfreie PEMFC	873
16.4	Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)	873
16.4.1	Festkörperoxid-Membran	874
16.4.2	SOFC-Kathodenmaterialien	875
16.4.3	SOFC-Anodenmaterialien	876
16.4.4	Von Membran-Elektroden-Einheiten zu SOFC-Zellen und -Systemen	877
16.5	Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle	879
16.6	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	881
16.7	Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	882
16.8	Wasserelektrolyse	886
16.8.1	Technische Realisierung der Wasserelektrolyse	887
16.8.2	Betriebsführung einer Wasserelektrolyse	888
	Kontroll- und Übungsaufgaben	889
	Weiterführende Literatur	890
17	Elektrosynthesen in Labor und Industrie	895
17.1	Was sind die Besonderheiten elektrosynthetischer Reaktionen?	896
17.1.1	Vergleich zu konventionellen chemischen Prozessen	896
17.1.2	Spannungsquelle und Reaktionsführung	898
17.1.3	Wie sind Laborzellen aufgebaut?	900
17.1.4	Mit welchen Reaktoren lassen sich industrielle Elektrolysen optimal durchführen?	903
17.1.5	Elektrodenmaterialien	905
17.1.6	Elektrolytlösungen	911
17.2	Überblick über organische Elektrosynthesen	913
17.3	Direkte Umsetzungen	915
17.3.1	Kolbe-Elektrolyse	915
17.3.2	Nicht-Kolbe-Elektrolysen	917
17.3.3	Reduktive Kupplungsreaktionen	919
17.4	Indirekte Umsetzungen	922
17.4.1	Welche Varianten gibt es für indirekte Elektrolysen?	922
17.4.2	Welche Mediatoren kommen zum Einsatz?	924
17.5	Beispiele für elektroorganische Synthesen mit komplexer Reaktionsführung	927
17.5.1	Kation-Pool-Methode	927
17.5.2	Gepaarte Elektrolyse	928

17.5.3	Redox-Tags und elektrochemisch initiierte Ringschlussreaktionen	930
	Kontroll- und Übungsaufgaben	931
	Weiterführende Literatur	932
18	Bioelektrochemie	939
18.1	Die Kopplung von Ionentransfer- und Elektronentransfer-Prozessen bei der Photosynthese und der Zellatmung	940
18.1.1	Die Biomembranen – Abgrenzung, „Steckbrett“ für Baueinheiten und Kurzzeitergiespeicher in einem	940
18.1.2	Wie wird die protonenmotorische Kraft bei der Zellatmung aufgebaut?	944
18.1.3	Wie wird die protonenmotorische Kraft bei der Photosynthese aufgebaut?	945
18.1.4	Wie wird der Gradient der Protonenaktivität zur ATP-Synthese genutzt?	947
18.2	Die elektrochemische Charakterisierung von Biomolekülen	948
18.2.1	Niedermolekulare Elektronenüberträger	948
18.2.2	Metallhaltige Redoxzentren	950
18.2.3	Schwierigkeiten bei der elektrochemischen Charakterisierung von Proteinen	951
18.2.4	Bestimmung des Formalpotentials durch potentiometrische Redox titration an optisch transparenten Dünnschichtelektroden	954
18.2.5	Mediierter Elektronentransfer mit katalytischem Umsatz an gelösten Enzymen	955
18.2.6	Direkter Elektronentransfer zu immobilisierten Proteinen	957
18.3	Elektrochemische Bioanalytik	959
18.3.1	Elektrochemische Biosensoren, Biochips und Assays	960
18.3.2	Immobilisierung der Enzyme oder der biologischen Erkennungselemente	961
18.3.3	Amperometrische Enzymelektroden für die Detektion von Glucose	962
18.3.4	Enzymatische Hemmstoffsensoren	969
18.3.5	Biobrennstoffzellen	970
18.3.6	Elektrochemische Immunoassays	971
18.3.7	Elektrochemische DNA-Assays and DNA-Chips	976
18.4	Untersuchung von Ionenströmen an Membranen	979
18.4.1	Untersuchung von einzelnen Ionenkanälen mit der Patch clamp-Technik	979
18.4.2	Nutzung künstlicher Nanoporen in elektroanalytischen Methoden	983
18.5	Rückblick und Ausblick	985
	Kontroll- und Übungsaufgaben	985
	Weiterführende Literatur	987

Anhang 995

Index 1019

Symbole für physikochemische Größen in diesem Buch

Lateinische Symbole (Auswahl)

A	Fläche der Elektroden [m^2 , cm^2] ohne Berücksichtigung der Elektrodenrauigkeit
A	Relaxationskonstante [$\text{L}^{1/2} \text{mol}^{-1/2}$]
A	präexponentieller Faktor (Frequenzfaktor) in der Arrhenius-Gleichung [s^{-1}]
A_{ECSA}	elektrochemisch aktive Oberfläche
A'	Fläche der Elektroden [m^2 , cm^2] unter Berücksichtigung der Elektrodenrauigkeit
A'	Flächenbedarf pro Molekül (Kap. 13) [m^2]
A'	modifizierter Frequenzfaktor [cm s^{-1}]
a	allgemeine Aktivität
a_c	Konzentrationsaktivität [mol L^{-1}], auch angegeben durch Summenformel in geschweiften Klammern
a_m	Molalitätsaktivität [mol kg^{-1}]
a_x	Molenbruchaktivität [einheitenlos]
a°	Standardaktivität, z. B. $a_c^\circ = 1 \text{ mol L}^{-1}$, $a_m^\circ = 1 \text{ mol kg}^{-1}$, $a_x = 1$
$a_i^{\circ\alpha}$, a_i^α	Standardaktivität/Aktivität des i -ten Stoffes in der Phase α
$a_\pm$	mittlere Aktivität [einheitenlos]
a_{XY}	lateraler Wechselwirkungsparameter zwischen den Adsorbaten X und Y
B	elektrophoretische Konstante [$\text{S cm}^2 \text{mol}^{-3/2} \text{L}^{1/2}$]
b_i	Molalität des Stoffes i [mol kg^{-1}]
b_i	Adsorptionskoeffizient des Stoffes i [L cm^{-2}]
C	Kapazität [C V^{-1} , As V^{-1}]
C_{dl}	Doppelschichtkapazität [As V^{-1}]
$C_{\text{dl},A}$	flächenbezogene Doppelschichtkapazität [$\mu\text{F cm}^{-2} = \text{As V}^{-1} \text{cm}^{-2}$]
$C_{\text{dl},A}^{\text{d}}$	differentielle, flächenbezogene Doppelschichtkapazität [$\mu\text{F cm}^{-2} = \text{As V}^{-1} \text{cm}^{-2}$]
$C_{\text{dl},A}^{\text{i}}$	integrale, flächenbezogene Doppelschichtkapazität [$\mu\text{F cm}^{-2} = \text{As V}^{-1} \text{cm}^{-2}$]
$C_{\text{N},m}$	spezifische Kapazität, $1 [\text{As g}^{-1}] = 0.278 [\text{mAh g}^{-1}] = 0.278 [\text{Ah kg}^{-1}]$
$C_{\text{N},V}$	volumenbezogene Kapazität („Ladungsdichte“) [As cm^{-3}], [mAh cm^{-3}] = [Ah L^{-1}]
C_r	C-Rate [$\text{A/Ah} = [\text{h}^{-1}]$]
$C_{\text{sc},A}$	flächenbezogene Kapazität der Raumladungszone [$\text{As V}^{-1} \text{cm}^{-2}$]
C_s	Reihenkapazität [C] (<i>serial</i>)

C_s	Kompressionsmodul [N m^{-1}]
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (in der Spektroskopie), $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
c	(Stoffmengen-)Konzentration [mol L^{-1} , mol cm^{-3}], auch angegeben durch Summenformel in eckigen Klammern
c^*	(Stoffmengen-)Konzentration [mol L^{-1} , mol cm^{-3}] in der Volumenphase der Lösung, auch angegeben durch Summenformel in eckigen Klammern mit Asterisk
$c_{\pm}$	mittlere Konzentration [mol L^{-1} , mol cm^{-3}]
D	Diffusionskoeffizient [$\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$]
$D(E)$	Zustandsdichte, Zahl der Zustände in einem Energiebereich [$\text{cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$]
D_+ , D_-	Diffusionskoeffizienten für Kationen und Anionen [$\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$]
D_f	Diffusionskoeffizient in einem Film [$\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$]
D_s	Zustandsdichte [cm^{-3}]
d	Durchmesser, Abstand [m]
E	Elektrodenpotential [V]
$\dot{E}$	momentanes Elektrodenpotential [V]
$\mathbf{E}$	Feldstärke [V m^{-1}]
$\mathbf{E}_p$	elektrische Feldkomponente eines Photons in der Einfallsebene (parallel) [V m^{-1}]
$\mathbf{E}_s$	elektrische Feldkomponente eines Photons senkrecht zur Einfallsebene [V m^{-1}]
e	Elementarladung, Ladung eines Elektrons, $e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ As}$
E°	Standardelektrodenpotential [V]
$E^{\circ'}$	Formalpotential der Elektrode/des Redoxpaares [V] (<i>formal potential</i>)
$E_{\text{ads}}^{\circ'}$	Formalpotential eines immobilisierten/adsorbierten Redoxsystems [V]
E_A	Aktivierungsenergie
E_{cor}	Korrosionspotential [V]
E_{eff}	Effektivwert [V]
E_F	Fermi-Energie, Fermi-Niveau [eV]
$E_{F,n}$	Quasi-Fermi-Niveau [eV]
E_{fb}	Flachbandpotential [V]
E_g	Bandlücke [V]
E_{NF}	Nernst-Faktor [V], $E_{\text{NF}} = RT/nF = 0.0257 \text{ V}$ (bei $T = 298 \text{ K}$)
E_{OCP}	Ruhepotential [V]
E_p	elektrostatische Wechselwirkungsenergie [kJ mol^{-1}]
$E_p, E_{\text{pa}}, E_{\text{pc}}$	Peakpotential in der Voltammetrie; anodisches, kathodisches Peakpotential [V]
E_p	Lochfraßpotential [V] (<i>pitting</i>)
$E_{P,n}$	Potential für stabile Nukleation von Lochfraßgruben [V]
$E_{P,I}$	Potential für Inhibition des Lochfraßes [V]
$E_{P,n}$	Potential für stabile Nukleation von Lochfraßgruben [V]
$E_{P,r}$	Potential für Repassivierung von Lochfraßgruben [V]
E_{pas}	Passivierungspotential [V]
E_{pztc}	Potential ohne Gesamtladungsüberschuss [V] (<i>point of zero total charge</i>)
E_{pzc}	Nullladungspotential [V] (<i>point of zero charge</i>)

E_{start}	Startpotential in der Voltammetrie [V]
E_{v}	Schwingungsenergie des harmonischen Oszillators [eV]
E_{λ}	Umschaltpotential in der Voltammetrie [V]
F	Schwingungsterm, $F = E/hc$ [cm^{-1}]
F	molare freie Energie (als intensive Größe) [kJ mol^{-1}]
F	Faraday-Konstante, $F = N_{\text{A}} \cdot e = 96485 \text{ As mol}^{-1} \approx 100\,000 \text{ As mol}^{-1}$
F	mechanische Kraft (Betrag) [N]
$\mathbf{F}_{\text{E}}$	Beschleunigungskraft im elektrischen Feld [N]
$\mathbf{F}_{\text{R}}$	Reibungskraft [N]
f	freie Energie (als extensive Größe) [kJ]
f_{c}	(Konzentrations-)Aktivitätskoeffizient [einheitenlos]
$f_{\pm}$	mittlerer Aktivitätskoeffizient [einheitenlos]
f_{m}	Molalitätsaktivitätskoeffizient [einheitenlos]
f_{x}	Molenbruchaktivitätskoeffizient [einheitenlos]
f_{λ}	Leitfähigkeitskoeffizient [einheitenlos]
G	Gewichtskraft [N]
G	molare freie Enthalpie (als intensive Größe) [kJ mol^{-1}]
$G^{\#}$	molare freie Aktivierungsenthalpie (als intensive Größe) [kJ mol^{-1}]
g	freie Enthalpie (als extensive Größe) [kJ], (Gibbs-Enthalpie)
g	Fallbeschleunigung, $g = 9.81 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
g	kombinierter Wechselwirkungsparameter in der Frumkin-Isotherme [einheitenlos]
H	molare Enthalpie (als intensive Größe) [kJ mol^{-1}]
$H^{\#}$	molare Aktivierungsenthalpie (als intensive Größe) [kJ mol^{-1}]
h	Enthalpie (als extensive Größe) [kJ]
h	Plank'sches Wirkungsquantum, $h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ J s}$
$\hbar$	modifiziertes Plank'sches Wirkungsquantum, $\hbar = h/2\pi$
i	komplexe Einheit
i	Index der Ionenart i
I	Strom(stärke) [A]
$\dot{I}$	momentane(r) Strom(stärke) [A]
I_0	Austauschstrom(stärke) [A]
$I_{\text{a}}, I_{\text{c}}$	Strom(stärke) für die anodische und kathodische Teilreaktion [A]
I_{AC}	Wechselstrom(anteil) [A]
I_{c}	Ionenstärke auf der Basis von Konzentrationen [mol L^{-1}]
I_{C}	kapazitiver Strom [A]
I_{cat}	katalytischer Strom [A]
I_{d}	mittlere Stromstärke [A]
I_{D}	Strom an der Scheibenelektrode einer RDE [A]
I_{DC}	Gleichstrom(anteil) [A]
$I_{\text{d}}, I_{\text{c}}$	Entlade- und Ladestrom [A]
I_{F}	Faraday'scher Strom [A]
I_{f}	Vorwärtsstrom in der SQWV [A]

I_K	kinetisch limitierter Strom [A]
I_L	Levich-Strom, transportlimitierter Strom an einer RDE [A]
I_m	Ionenstärke auf der Basis von Molalitäten [mol kg ⁻¹]
I_p, I_{pa}, I_{pc}	Peakstrom in der Voltammetrie; anodischer, kathodischer Peakstrom [A]
I_p	Pulsstromstärke [A]
I_{pas}	Passivierungsstromstärke [A]
$I_{P,max}$	Strom am Punkt maximaler Leistungsabgabe
I_r	Rückwärtsstrom in der SQWV [A]
I_R	Strom an der Ringelektrode einer RDE [A]
I_{SC}	Kurzschlussstrom (<i>short circuit</i>) [A]
I_T	Sondenstrom (SECM, ECSTM) [A]
$I_{T,\infty}$	Sondenstrom in der Volumenphase der Lösung (SECM) [A]
I_{tot}	Gesamtstrom [A]
j	Index der Ionenart j
J	Stoffmengenfluss [mol cm ⁻² s ⁻¹]
J	Keimbildungsgeschwindigkeit (Kap. 9) [cm ⁻² s ⁻¹]
j	Stromdichte [A cm ⁻²]
j_0	Austauschstromdichte [A cm ⁻²]
j_a, j_c	Stromdichte für die anodische bzw. kathodische Teilreaktion [A cm ⁻²]
j_{cor}	Korrosionsstromdichte [A m ⁻²]
j_{pas}	Passivierungsstromdichte [A cm ⁻²]
k	Geschwindigkeitskonstante; die Einheit hängt von der Reaktionsordnung ab und davon, ob eine homogene oder heterogene Reaktion vorliegt, Indizes geben die Nummer der Reaktion an
K	Gleichgewichtskonstante; Einheit je nach Massenwirkungsgesetz verschieden
K_a	Säurekonstante [mol L ⁻¹]
K_W	Gleichgewichtskonstante für die Autoprotolyse des Wassers [mol ² L ⁻²]
K_L	Löslichkeitsprodukt; Einheit hängt von Stöchiometrie ab, z. B. [mol ² L ⁻²]
K_M	Michaelis-Menten-Konstante [mol L ⁻¹]
K'_M	scheinbare Michaelis-Menten-Konstante [mol L ⁻¹]
k_0	Kraftkonstante [N m ⁻¹]
$\mathbf{k}$	Wellenzahlvektor [cm ⁻¹]
k°	heterogene Standardreaktionsgeschwindigkeitskonstante [cm s ⁻¹]
k_a, k_c	heterogene Geschwindigkeitskonstante für die anodische bzw. kathodische Teilreaktion [cm s ⁻¹]
k_B	Boltzmann-Konstante, $k_B = R/N_A = 1.381 \times 10^{-23}$ J K ⁻¹
k_F	Kraftkonstante [N m ⁻¹]
k_n	Geschwindigkeitskonstante für die Keimbildung [s ⁻¹] (<i>nucleation</i>)
k_s°	Standardgeschwindigkeitskonstante eines immobilisierten Redoxsystems [s ⁻¹] (<i>surface</i>)
L	Leitfähigkeit [S, Ω^{-1}]
l	Länge/Abstand [cm, m]
Δl_p	Länge des Porensegments [cm]

m	Massentransportkoeffizient
m_e	Masse des Elektrons in Ruhe [kg]
m_i	Molenbruch des i -ten Stoffes [mol kg ⁻¹]
m_i	Masse des i -ten Stoffes
M_i	molare Masse des i -ten Stoffes
m_{solv}	Masse des Lösungsmittels [kg]
m_{ls}	Masse der Lösung [kg]
m_r	reduzierte Masse (Schwingungsspektroskopie) [kg]
m_t	Massentransportkoeffizient [cm s ⁻¹]
n	Reaktionsladungszahl, Zahl der bei einem Formelumsatz übertragenen Elektronen (Ladungen)
n_{crit}	Zahl der Metallatome in einem Keim kritischer Größe [einheitenlos]
n_{nucl}	Zahl der wachstumsfähigen Keime [einheitenlos]
n_{solv}	Zahl der durch ein Adsorbatmolekül von der Grenzfläche verdrängten Solvensmoleküle [einheitenlos]
N	Objektmenge [mol]
N_A	Avogadro-Konstante, Anzahl in einem Mol, $N_A = 6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
N_C	Zahl der chemischen Komponenten im Reaktionssystem
N_i	Stoffmenge i -ten Stoffes [mol]
N_e	Zahl der Elektronen als Objektmenge [mol]
N_F	Zahl der Freiheitsgrade (p , T , U)
N_p	Porenzahl, Anzahl der Strompulse [einheitenlos]
N_p	Zahl der Phasen [einheitenlos]
N^α	Stoffmenge in der Phase α
P	Leistung [W] = [J s ⁻¹] = [VA]
P'	flächenbezogene Leistung [W cm ⁻²]
P''	volumenbezogene Leistung, Leistungsdichte [W cm ⁻³ , W L ⁻¹]
p	Druck [Pa = N m ⁻²]
$\mathbf{p}$	Impulsvektor
p°	Standarddruck, 100 000 Pa; in älterer Literatur 101 325 Pa = 760 Torr
p_i	Partialdruck des i -ten Gases [Pa]
$\text{p}K_a$	negativer dekadischer Logarithmus der normierten Säurekonstante
P/m	spezifische Leistung [W kg ⁻¹]
pmf	protonenmotorische Kraft (<i>proton-motive force</i>) [V]
Q	Ladung [C] = [As]
Q	Q -Faktor eines Resonators (<i>quality factor</i>) [einheitenlos]
Q_{CPE}	Parameter des Konstant-Phasen-Elements (CPE) [s $^\gamma$ A V ⁻¹], γ ist ein weiterer Parameter des CPE
$Q_{\text{CPE},A}$	flächenbezogener Parameter des Konstant-Phasen-Elements (CPE) [s $^\gamma$ A V ⁻¹ cm ⁻²], γ ist ein weiterer Parameter des CPE
Q_d, Q_c	Ladung für das Entladen (Index d von <i>discharge</i>) bzw. das Laden (Index c für <i>charge</i>) [As], [Ah]
Q_{dl}	Ladung der Doppelschicht [As]
$Q_{\text{dl},A}$	flächenbezogene Ladung der Doppelschicht [As cm ⁻²]
Q_N	Nennkapazität [As], [Ah]

Q_{stored}	nach dem Laden gespeicherte Ladung [As], [Ah]
q	allgemeine innere Koordinate in der Schwingungsspektroskopie (Winkel oder Bindungslänge)
$\mathbf{q}$	Vektor innerer Koordinaten (Bindungslängen und Bindungswinkel)
R	universelle Gaskonstante, $R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
R	Ohm'scher Widerstand [Ω]
$R_{0,l}$	spezifischer Porenwiderstand [$\Omega \text{ cm}^{-1}$] = $\rho/(\pi r_p^2)$
R_{CT}	Ladungstransferwiderstand [Ω]
R_{E}	Elektrolytwiderstand [Ω]
R_{S}	Reihenwiderstand [Ω]
r	Radius [m]
r	Reaktionsgeschwindigkeit; homogene [$\text{mol L}^{-1} \text{ s}^{-1}$], heterogene [$\text{mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
r_0	Austauschreaktionsgeschwindigkeit; homogene [$\text{mol L}^{-1} \text{ s}^{-1}$], heterogene [$\text{mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
r_{crit}	kritischer Keimradius [nm]
r_{D}	Debye-Länge [m]
r_i	hydrodynamischer Radius des i -ten Ions [m]
r_p	charakteristischer Porenradius [cm]
r_{sol}	Radius der Solvathülle eines Ions
r_{S}	Radius der aktiven Probe (SECM)
r_{T}	Radius der Mikroelektrode (SECM)
R_{g}	normierter Radius der isolierenden Einfassung [einheitenlos] (SECM)
R_{S}	normierter Radius der aktiven Probe [einheitenlos] (SECM)
R_{uc}	unkompensierter Elektrolytwiderstand [Ω]
S	molare Entropie [$\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$]
S°	molare Standardentropie [$\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$]
$S^\#$	molare Aktivierungsentropie (als intensive Größe) [$\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$]
s	Entropie als extensive Größe [J K^{-1}]
T	absolute Temperatur [K]
T_{b}	Siedepunkt [K] (<i>boiling</i>)
T_{e}	Transmissionskoeffizient für einen Tunnelprozess [einheitenlos]
T_{i}	Flammpunkt [K] (<i>ignition</i>)
T_{m}	Schmelzpunkt [K] (<i>melting</i>)
T_{p}	Streufähigkeit (Kap. 9) [einheitenlos]
t	Zeit [s]
t_+, t_-	Überführungszahl, Anteil der Ionensorte am Gesamtstrom [einheitenlos]
$t_{\text{d}}, t_{\text{c}}$	Entlade- bzw. Ladezeit [s], [h] (<i>discharge/charge</i>)
t_{off}	Ruhezeit [ms]
t_{on}	Pulsdauer [ms]
U	Spannung [V]
U	Momentanspannung [V]
U°	Standardzellspannung [V]

U_0	Spannungsamplitude [V]
U_{bias}	Vorspannung [V]
$\langle U_d \rangle, \langle U_c \rangle$	mittlere Entlade- bzw. Ladespannung (<i>discharge/charge</i>) [V]
U_{eq}	Gleichgewichtszellspannung [V]
$U_{P,\text{max}}$	Spannung am Punkt maximaler Leistungsabgabe [V]
U_{zer}	Zersetzungsspannung [V]
u_{eo}	elektroosmotische Mobilität [$\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$]
u_{exp}	experimentell bestimmte elektroosmotische Mobilität [$\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$]
u_i	Ionenbeweglichkeit des Ions i [$\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$]
V	Volumen [L, cm^3 , ...]
V_{m}	molares Volumen [L mol^{-1} , $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$, ...]
ν	Quantenzahl des harmonischen Oszillators [einheitenlos]
v	Potentialvorschubgeschwindigkeit in der Voltammetrie [V s^{-1}]
W	Arbeit, Energie [Wh], [Ws], [J]
W/m	spezifische Energie [Wh kg^{-1}] = [mWh g^{-1}]
w	Arbeit [J, Ws, Nm]
w_1	Masse des Stoffes 1 [einheitenlos]
w_{el}	elektrische Arbeit [Ws, J, Nm, VAs]
$\mathbf{w}_{\text{eo}}$	elektroosmotische Flussgeschwindigkeit [m s^{-1}]
$\mathbf{w}_{\text{exp}}$	experimentell bestimmte Wanderungsgeschwindigkeit [m s^{-1}]
$\mathbf{w}_i$	Wanderungsgeschwindigkeit [m s^{-1}], Index i = Ionenart
$\{X\}$	Konzentrationsaktivität der Komponente X [mol L^{-1}]
$[X]$	Konzentration der Komponente X [mol L^{-1}]
X	Blindwiderstand [V A^{-1}]
x	Ortskoordinate [m], z. B. Abstand zur Elektrode
x_i	Molenbruch des i -ten Stoffes [einheitenlos]
Y	Admittanz (<i>admittance</i>) [A V^{-1}] = [Ω^{-1}]
Z	Betrag der Impedanz [Ω]
$\mathbf{Z}$	Impedanz [Ω]
$\mathbf{Z}_{0,l}$	spezifische Grenzflächenimpedanz (auf Ringbreite Δl bezogen) [Ωcm]
$\mathbf{Z}_A$	flächenbezogene Grenzflächenimpedanz [Ωcm^2], an glatter Elektrode ermittelt
$\mathbf{Z}_p$	Impedanz einer Pore [Ω]
z_+, z_-	Ladungszahlen für Kationen und Anionen [einheitenlos]
z_i	Ionenladung des Ions i [einheitenlos], exakt Verhältnis der Ladung eines Ions [As] zur Ladung eines Protons [As]

Griechische Symbole (Auswahl)

α	Transferkoeffizient [einheitenlos]
α	Dissoziationsgrad [einheitenlos (0...1) oder angegeben in %]
$\alpha, \beta, \dots$	Index der Phase
β	Adsorptionsgleichgewichtskonstante [$\text{mol}^{-1} \text{L}$]
β	Abklingkonstante eines Tunnelprozesses [m^{-1}]
γ	Exponent des CPE [$0 < \gamma < 1$], oder Arbeitszyklen (Abschn. 18.6.1)
γ	Grenzflächen- oder Oberflächenspannung [N m^{-1}]
Γ	Grenzflächenkonzentration [mol cm^{-2}]
Γ^* ,	Gesamtgrenzflächenkonzentration eines Redoxpaares [mol cm^{-2}]
δ	allgemein Schichtdicke, Abstand; insbesondere Abstand zwischen zwei Redoxzentren [m]
ΔE	Amplitude der Wechselfspannung [V]
ΔE_p	Aufspaltung der Peakpotentiale in der Cyclovoltammetrie [V]
$\Delta_R G$	molare freie Reaktionsenthalpie [J mol^{-1}]
$\Delta_R G^\circ$	molare freie Standardreaktionsenthalpie [J mol^{-1}]
$\Delta_B G$	molare freie Bildungsenthalpie [J mol^{-1}]
$\Delta G^\ddagger$	molare freie Aktivierungsenthalpie [J mol^{-1}]
$\Delta_B G^\circ$	molare freie Standardbildungsenthalpie [J mol^{-1}]
$\Delta_{SS} G$	molare freie Übersättigungsenthalpie [J mol^{-1}]
$\Delta H^\ddagger$	molare Aktivierungsenergie [J mol^{-1}]
$\Delta_R H$	molare Reaktionsenthalpie [J mol^{-1}]
$\Delta_R H^\circ$	molare Standardreaktionsenthalpie [J mol^{-1}]
ΔI	Amplitude des Wechselstroms [A]
Δm	Massenverlust [g] durch Korrosion, ermittelt durch Wägung
Δm_{theo}	nach dem Faraday'schen Gesetz berechneter Massenverlust [g]
$\Delta_R S$	molare Reaktionsentropie [$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$]
$\Delta S^\ddagger$	molare Aktivierungsentropie [$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$]
$\Delta_R S^\circ$	molare Standardreaktionsentropie [$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$]
Δx	Dicke der Diffusionsschicht [cm], z. B. Nernst'sche Diffusionsschichtdicke
$\Delta \varphi^{\alpha,\beta}$	Galvani-Spannung zwischen Phase α und β [V]
$\Delta \varphi^{\circ \alpha,\beta}$	Standard-Galvani-Spannung [V] zwischen Phase α und β
$\Delta \varphi_A$	Differenz der Galvani-Spannungen [V] zwischen Anode und Lösung
$\Delta \varphi_{\text{eq}}$	Gleichgewichts-Galvani-Spannung [V]
$\Delta \varphi_{\text{eq}}^\circ$	Standard-Gleichgewichts-Galvani-Spannung [V]
$\Delta \varphi_C$	Differenz der Galvani-Spannungen [V] zwischen Kathode (<i>cathode</i>) und Lösung
ϵ_r	relative Dielektrizitätskonstante des Lösungsmittels [einheitenlos]
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums (Permittivität des Vakuums), $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ A}^2 \text{ s}^4 \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} = 8.854 \times 10^{-12} \text{ A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$ $= 8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
ζ	zeta-Potential oder Oberflächenpotential [V]
η	Überspannung [V]
η	Viskosität [N s m^{-2}]
ϵ	Wirkungsgrad [einheitenlos], allgemein Effizienzgrößen
ϵ_{be}	bipolare Stromeffizienz [einheitenlos], Abschn. 9.6.1
ϵ_C	Kollektoreffizienz, Übertragungsverhältnis [einheitenlos]

ϵ_C	Ladungseffizienz [einheitenlos]
ϵ_{el}	Energieeffizienz [einheitenlos]
$\epsilon_{F,i}$	Stromausbeute [einheitenlos]
θ	Bedeckungsgrad [%]
θ	Kontaktwinkel [°]
κ	spezifische Leitfähigkeit [$S\text{ cm}^{-1}$, $\Omega^{-1}\text{ cm}^{-1}$]
κ	Abklingkonstante (STM) [m^{-1}]
κ	normierte homogene Geschwindigkeitskonstante (Kap. 6, 17, 18) [einheitenlos]
κ	normierte heterogene Geschwindigkeitskonstante (SECM) [einheitenlos]
κ	normierte Geschwindigkeitskonstante eines immobilisierten Redoxsystems [einheitenlos]
Λ	molare Leitfähigkeit [$(\Omega^{-1}\text{ cm}^{-1})/(\text{mol cm}^{-3})$, $S\text{ cm}^2\text{ mol}^{-1}$]
Λ_0	molare Leitfähigkeit bei unendlicher Verdünnung [$(\Omega^{-1}\text{ cm}^{-1})/(\text{mol cm}^{-3})$, $S\text{ cm}^2\text{ mol}^{-1}$]
Λ_{relax}	Abnahme der Leitfähigkeit durch Relaxation [$(\Omega^{-1}\text{ cm}^{-1})/(\text{mol cm}^{-3})$, $S\text{ cm}^2\text{ mol}^{-1}$]
Λ_{ephor}	Abnahme der Leitfähigkeit durch elektrophoretischen Effekt [$(\Omega^{-1}\text{ cm}^{-1})/(\text{mol cm}^{-3})$, $S\text{ cm}^2\text{ mol}^{-1}$]
λ	partieller Entladungskoeffizient [einheitenlos] bei der Adsorption von Metallionen mit der Ladung z^+ ; λz ist die Elektrosorptionswertigkeit
λ	Reorganisationsenergie im Rahmen der Marcus-Theorie
λ	mittlere freie Weglänge von Elektronen im Festkörper (Kap. 8)
$\lambda_{0,\text{eq},i}$	Einzelionenäquivalentleitfähigkeit bei unendlicher Verdünnung des Ions i [$S\text{ cm}^2\text{ mol}^{-1}$]
$\lambda_{0,i}$	molare Einzelionenleitfähigkeit bei unendlicher Verdünnung des Ions i [$S\text{ cm}^2\text{ mol}^{-1}$]
$\lambda_{0,\text{eq}}$	Äquivalentleitfähigkeit
μ	Betrag des Dipolmoments eines Moleküls [A s m], meist angegeben in Debye D; $1\text{ D} = 3.33564 \times 10^{-30}\text{ A s m}$
μ_i	chemisches Potential des Stoffes i [J mol^{-1}]
μ_i°	chemisches Standardpotential des Stoffes i [J mol^{-1}]
$\tilde{\mu}_i^\alpha$	elektrochemisches Potential des Stoffes i in der Phase α [J mol^{-1}]
$\tilde{\mu}_i^{\alpha^\circ}$	elektrochemisches Standardpotential des Stoffes i in der Phase α [J mol^{-1}]
μ	Übergangsdipolmoment in der Spektroskopie
ν	Kreisfrequenz [s^{-1}], Umdrehungen pro Sekunde
ν_D	mittlere Diffusionsgeschwindigkeit entlang einer Raumrichtung [cm s^{-1}]
ν_i	vorzeichenbehafteter stöchiometrischer Koeffizient (für Ausgangsstoffe < 0 ; für Reaktionsprodukte > 0) [einheitenlos]
ν_+ , ν_-	stöchiometrische Koeffizienten für Kationen bzw. Anionen [einheitenlos]
ν	Frequenz [Hz] = [s^{-1}]
ν_{osc}	Oszillatorfrequenz in der Schwingungsspektroskopie [Hz] = [s^{-1}]
ξ	Reaktionsumsatz angegeben als Objektmenge der Formelumsätze bezüglich der Reaktionsgleichung [mol]
π	Kreiszahl, $\pi \approx 3.141$
Π	Filmdruck [N m^{-1}]
ρ	Massendichte [g cm^{-3}] = [kg dm^{-3}] = [t m^{-3}]
ρ	Ladungsdichte [As cm^{-3}], [C cm^{-3}]
ρ	spezifischer Widerstand [$\Omega\text{ cm}^{-1}$]
ρ_E	spezifischer Elektrolytwiderstand [$\Omega\text{ cm}$]

σ^M	Überschussladungsdichte am Metall [As cm^{-2}], [C cm^{-2}]
τ	Zeitkonstante, oder auch Schrittzeit [s]
τ	Tropfzeit einer Quecksilberelektrode [s]
τ	Transferverhältnis beim Langmuir-Blodgett-Transfer [einheitenlos]
φ	inneres Potential [V]
φ^A	Potential [V] im Inneren der Anode ($x \rightarrow \infty$)
φ^C	Potential [V] im Inneren der Kathode (<i>cathode</i>) ($x \rightarrow \infty$)
φ^S	Potential [V] im Lösungsinnen (<i>solution</i>) ($x \rightarrow \infty$)
$\phi_{x'=0}$	Potential [V] an der äußeren Helmholtz-Fläche
ϕ	Austrittsarbeit [eV]
χ_α	Oberflächenpotential [V] einer speziellen Oberfläche der Phase α
Ψ	quantenmechanische Wellenfunktion
Ψ	Fugazität [Pa], die zum Partialdruck gehörende Aktivitätsgröße
ψ	Stromfunktion, normierter Faraday'scher Strom [einheitenlos]
ψ^α	äußeres Potential [V] der Phase α
ψ_T	Stromfunktion (normierter Strom) in der SECM [einheitenlos]
ω	Winkel Frequenz ($\omega = 2\pi f$) [s^{-1}], Winkel in Radiant pro Sekunde

Abkürzungen in diesem Buch

2D DIGE	zweidimensionale differentielle Gelelektrophorese (<i>2D differential gel electrophoresis</i>)
Ab	Antikörper (<i>antibody</i>)
AC	Wechselspannung (<i>alternating current</i>)
AChE	Acetylcholinesterase
ACS	American Chemical Society
ACV	Wechselstrom-Voltammetrie (<i>alternating current voltammetry</i>)
ADC	Analog-Digital-Wandler (<i>analog-digital converter</i>)
ADP	Adenosindiphosphat
AES	Auger-Elektronenspektroskopie
AFC	alkalische Brennstoffzelle (<i>alkaline fuel cell</i>)
Ag	Antigen
ALP	alkalische Phosphatase
AO	Atomorbital
APT	Atomsonden-Tomographie (<i>atom probe tomography</i>)
APU	zusätzliche Stromquelle (<i>auxiliary power unit</i>)
<i>aq</i>	in wässriger Lösung (<i>aqueous</i>)
ARXPS	winkelaufgelöste Photoelektronenspektroskopie (<i>angle resolved XPS</i>)
ATP	Adenosintriphosphat
ATR	abgeschwächte Totalreflexion (<i>attenuated total reflection</i>)
Aux	Gegenelektrode oder Hilfselektrode (<i>auxiliary electrode</i>)
CB	Leitungsband
CC	konstante Stromstärke (<i>constant current</i>) beim Laden von Batterien
CCD	ladungsgekoppelter Zähler (<i>charge-coupled device</i>)
CE	Gegenelektrode in Zwei-Elektroden-Aufbau (<i>counter electrode</i>)
CE	Kapillarelektrophorese, <i>capillary electrophoresis</i>
CEI	kathodische ionenleitende Grenzschicht (<i>cathode electrolyte interphase</i>)
CFME	Kohlefaser-Mikroelektrode (<i>carbon fiber microelectrode</i>)
cgs	Einheitensystem Zentimeter-Gramm-Sekunde
CHP	kombinierte Wärme-Kraft-Kopplung (<i>combined heat power</i>)
CL	Katalysatorschicht (<i>catalyst layer</i>)
CMC	kritische Mizellbildungskonzentration (<i>critical micelle concentration</i>)
CN	Koordinationszahl (<i>coordination number</i>)
COT	Cyclooctatetraen

CPE	Kohlepaste-Elektrode (<i>carbon paste electrode</i>)
CPE	Element mit konstantem Phasenwinkel, Konstant-Phasen-Element (<i>constant phase element</i>)
C-SFM	Rasterkraftmikroskopie mit gleichzeitiger Leitfähigkeitsmessung (<i>conductive scanning force microscopy</i>)
DA	Dopamin
DAC	Digital-Analog-Wandler (<i>digital-analog converter</i>)
DC	Gleichstrom (<i>direct current</i>)
DCECM	elektrochemische Abtragung mit Gleichspannung (<i>direct current electrochemical machining</i>)
DCM	Dichlormethan
DDO	von außen angetriebener Schwinger mit Stoßdämpfer (<i>damped, driven oscillator</i>)
DEMS	differentielle elektrochemische Massenspektrometrie
DET	direkter Elektronentransfer
DGL	Differentialgleichung
DHE	dynamische Wasserstoffelektrode (<i>dynamic hydrogen electrode</i>)
DME	tropfende Quecksilberelektrode (<i>dropping mercury electrode</i>)
DMF	Dimethylformamid
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle (<i>direct methanol fuel cell</i>)
DMSO	Dimethylsulfoxid
DNA	Desoxyribonucleinsäure
DPV	Differenzpuls-Voltammetrie (<i>differential pulse voltammetry</i>)
DPN	Tauchstift-Nanolithographie (<i>dip pen nanolithography</i>)
DSA	dimensionsstabile Anode
DSC	farbstoffsensibilisierte Solarzelle (<i>dye-sensitized solar cell</i>)
dsDNA	doppelsträngige Desoxyribonucleinsäure (<i>double-stranded DNA</i>)
EBSD	Elektronenrückstreubeugung (<i>electron backscatter diffraction</i>)
ECM	elektrochemische Abtragung (<i>electrochemical machining</i>)
ECS	The Electrochemical Society
ECSA	<i>electrochemically active surface area</i>
ECSFM	elektrochemische Rasterkraftmikroskopie (<i>electrochemical scanning force microscopy</i>)
ECSTM	elektrochemische Rastertunnelmikroskopie (<i>electrochemical scanning tunneling microscopy</i>)
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
EELS	Elektronenenergie-Verlustspektroskopie (<i>electron energy loss spectroscopy</i>)
EIS	elektrochemische Impedanzspektroskopie
ELOXAL	elektrolytische Oxidation von Aluminium
EMD	elektrolytisches Mangandioxid (<i>electrolytic manganese dioxide</i>)
ENA	elektrochemische Rauschanalyse (<i>electrochemical noise analysis</i>)
EQCM	elektrochemische Quarzmikrowaage (<i>electrochemical quartz crystal microbalance</i>)
EOF	elektroosmotischer Fluss (<i>electroosmotic flow</i>)
ESR	Elektronenspin-Resonanz
ET	Elektronentransfer
ETC	Elektronentransportkette (<i>electron transfer chain</i>)
EXAFS	kantenferne Röntgenabsorptions-Feinstruktur (<i>extended X-ray absorption fine structure</i>)