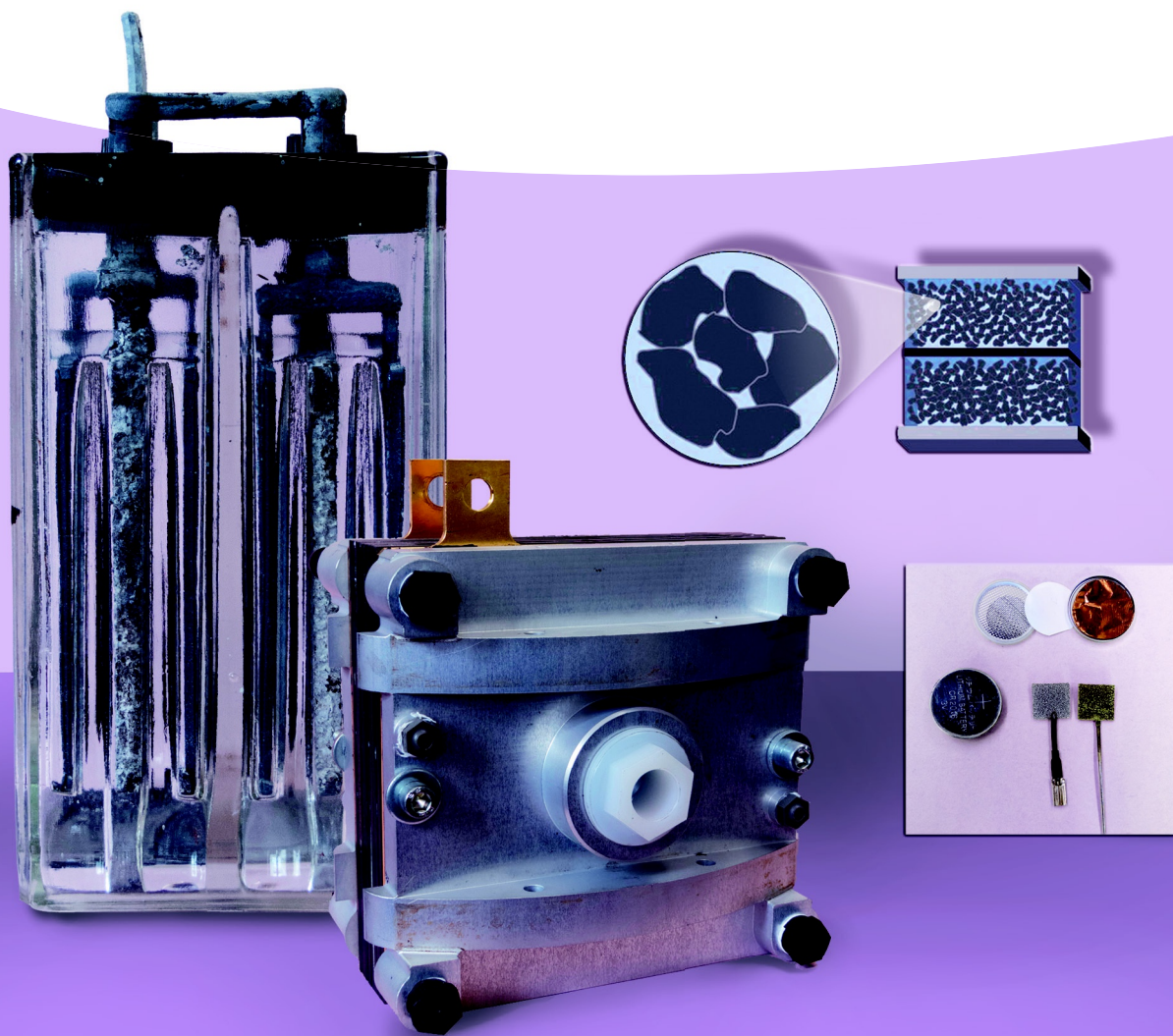


Rudolf Holze und Yuping Wu

Elektrochemische Energiewandler und -speicher



Elektrochemische Energiewandler und -speicher

Elektrochemische Energiewandler und -speicher

Rudolf Holze und Yuping Wu

WILEY-VCH

Autoren

Prof. Dr. Rudolf Holze

Institut für Chemie
Technische Universität Chemnitz
Straße der Nationen 62
09111 Chemnitz
Deutschland

Prof. Dr. Yuping Wu

State Key Laboratory of Materials-oriented
Chemical Engineering
Nanjing Tech University –
School of Energy Science and Engineering
211816 Nanjing
China

Titelbild

Unter Verwendung von Fotografien
des Erstautoren.

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.

© 2024 WILEY-VCH GmbH, Boschstr. 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.

Umschlaggestaltung Adam-Design, Weinheim
Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Print ISBN 978-3-527-33430-8

ePDF ISBN 978-3-527-69078-7

ePub ISBN 978-3-527-69080-0

Moby ISBN 978-3-527-69079-4

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Inhaltsverzeichnis

	Geleitwort	<i>XI</i>
	Vorwort	<i>XIII</i>
	Akronyme, Begriffe und Definitionen	<i>XV</i>
1	Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung	1
	Weiterführende Literatur	<i>22</i>
2	Elektrochemische Prozesse und Systeme	23
2.1	Parasitäre Reaktionen	<i>32</i>
2.2	Selbstentladung	<i>33</i>
2.3	Systemverschlechterung	<i>36</i>
2.3.1	Alterung	<i>40</i>
	Weiterführende Literatur	<i>42</i>
3	Thermodynamik elektrochemischer Systeme	45
	Weiterführende Literatur	<i>61</i>
4	Kinetik elektrochemischer Energieumwandlungsprozesse	63
4.1	Schritte von Elektrodenreaktionen und Überpotentialen	<i>64</i>
4.2	Transport	<i>64</i>
4.3	Ladungsdurchtritt	<i>66</i>
4.4	Überpotentiale	<i>68</i>
	Weiterführende Literatur	<i>78</i>
5	Elektroden und Elektrolyte	81
5.1	Recycling	<i>95</i>
	Weiterführende Literatur	<i>96</i>
6	Experimentelle Methoden	99
6.1	Batterietester	<i>99</i>
6.2	Strom-Potential-Messungen	<i>100</i>
6.3	Lade-/Entlademessungen	<i>104</i>
6.4	Batterieladung	<i>113</i>

6.5	Einfache und zyklische Voltammetrie	120
6.6	Impedanzmessungen	124
6.7	Galvanostatische Titration	131
6.8	Potentiostatische Titration	132
6.9	Elektrochemische Potentialsprungspektroskopie	133
6.10	Elektrochemische Quarzmikrowaage	134
6.11	Nichtelektrochemische Methoden	134
6.11.1	Festkörper-Kernresonanzspektroskopie	135
6.11.2	Gasadsorptionsmessungen	135
6.11.3	Mikroskopien	135
6.11.4	Thermische Messungen	135
6.11.5	Modellierung	136
	Weiterführende Literatur	140
7	Primärsysteme	141
7.1	Wäßrige Systeme	143
7.1.1	Zink-Kohle-Batterie	143
7.1.2	Alkalische Zn/MnO ₂ -Batterie	145
7.1.3	Zn/HgO-Batterien	149
7.1.4	Zn/AgO-Batterie	150
7.1.5	Cd/AgO-Batterien	153
7.1.6	Mg/MnO ₂ -Batterien	155
7.2	Nichtwäßrige Systeme	156
7.2.1	Lithiumprimärbatterien	157
7.2.2	Li/MnO ₂	159
7.2.3	Li/Bi ₂ O ₃	160
7.2.4	Li/CuO	161
7.2.5	Li/V ₂ O ₅ , Li/Ag ₂ V ₄ O ₁₁ und Li/CSVO	162
7.2.6	Li/CuS	163
7.2.7	Li/FeS ₂	164
7.2.8	Li/CF _x -Primärbatterien	165
7.2.9	Li/I ₂	167
7.2.10	Li/SO ₂	167
7.2.11	Li/SOCl ₂	169
7.2.12	Li/SO ₂ Cl ₂	172
7.2.13	Li/Oxyhalid-Primärbatterien	172
7.3	Metall-Luft-Systeme	173
7.3.1	Wäßrige Metall-Luft-Primärbatterien	173
7.3.2	Nichtwäßrige Metall-Luft-Batterien	185
7.4	Füllzellen	187
7.4.1	Seewasseraktivierbare Batterien	187
7.4.2	Aktivierbare Hochleistungsbatterien	189
	Weiterführende Literatur	190

8	Sekundärsysteme	191
8.1	Wäßrige Systeme	193
8.1.1	Blei-Säure-Akkumulator	193
8.1.2	Sekundärbatterien auf Nickelbasis	207
8.1.3	Wäßrige wiederaufladbare Lithiumbatterien	221
8.1.4	Wäßrige wiederaufladbare Natriumbatterien	227
8.2	Nichtwäßrige Systeme	228
8.2.1	Lithium-Ionen-Batterien	228
8.2.2	Wiederaufladbare Li/S-Batterien	252
8.2.3	Wiederaufladbare Na/S-Batterien	255
8.2.4	Wiederaufladbare Li/Se-Batterien	257
8.2.5	Wiederaufladbare Mg-Batterien	257
8.3	Sekundärbatterien auf Basis von Gelpolymerelektrolyten	259
8.3.1	Gel-Lithium-Ionen-Batterien	260
8.3.2	Gelelektrolyte für Natriumbatterien	261
8.4	Sekundärbatterien auf Festelektrolytbasis	262
8.4.1	Feste Lithium-Ionen-Batterien	263
8.4.2	Wiederaufladbare feste Lithiumbatterien	264
8.5	Wiederaufladbare Metall-Luft-Batterien	265
8.5.1	Wiederaufladbare Li/Luft-Batterien	265
8.5.2	Wiederaufladbare Na/Luft-Batterien	268
8.5.3	Wiederaufladbare Zn/Luft-Batterien	269
8.6	Hochtemperatursysteme	271
8.6.1	Natrium-Schwefel-Batterie	271
8.6.2	Natrium-Nickelchlorid-Batterie	274
8.6.3	Flüssigmetallakkumulatoren	279
	Weiterführende Literatur	279
9	Brennstoffzellen	281
9.1	Die Sauerstoffelektrode	286
9.2	Die Wasserstoffelektrode	292
9.3	Gemeinsamkeiten von Brennstoffzellen	293
9.4	Klassifizierung von Brennstoffzellen	297
9.4.1	Brennstoffzellen bei Umgebungstemperatur	298
9.4.2	Alkalische Brennstoffzellen	298
9.4.3	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFCs)	300
9.4.4	Direkte Alkoholbrennstoffzellen	307
9.4.5	Bioelektrochemische Brennstoffzellen	309
9.4.6	Mitteltemperaturbrennstoffzellen	310
9.4.7	Phosphorsäurebrennstoffzellen	310
9.4.8	Schmelzcarbonatbrennstoffzellen	311
9.4.9	Hochtemperaturbrennstoffzellen	313
9.5	Anwendungen von Brennstoffzellen	314
9.6	Brennstoffzellen in Energiespeichersystemen	315
	Weiterführende Literatur	317

10	Redoxbatterien	319
10.1	Das Eisen-Chrom-System	324
10.2	Das Eisen-Vanadium-System	325
10.3	Das Eisen-Cadmium-System	326
10.4	Das Brom-Polysulfid-System	326
10.5	Das All-Vanadium-System	327
10.6	Das Vanadium-Brom-System	328
10.7	Actiniden-RFB	329
10.8	All-Organische RFBs	330
10.9	Nichtwässrige RFBs	330
10.10	Hybride Systeme	330
10.11	Das Zink-Cer-System	330
10.12	Das Zink-Brom-System	331
10.13	Das Zink/Organisch-System	332
10.14	Das Cadmium/Organisch-System	332
10.15	Das Blei-Bleiodioxid-System	333
10.16	Das Cadmium-Bleiodioxid-System	334
10.17	Das All-Kupfer-System	334
10.18	Das Zink-Nickel-System	334
10.19	Das Lithium-LiFePO ₄ -System	335
10.20	Vanadium-Festsalz-Batterie	335
10.21	Vanadium-Sauerstoff-System	336
10.22	Elektrochemischer Flußkondensator	337
10.23	Entwicklungsstand und Perspektiven	337
	Weiterführende Literatur	339
11	Superkondensatoren	341
11.1	Klassifizierung von Superkondensatoren	342
11.2	Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren	344
11.2.1	Elektrolyte für EDLCs	345
11.2.2	Elektrodenmaterialien für EDLCs	346
11.2.3	Elektrochemische Leistung von EDLCs	354
11.3	Pseudokondensatoren	356
11.3.1	RuO ₂	356
11.3.2	MnO ₂	359
11.3.3	Intrinsisch leitfähige Polymere	365
11.3.4	Redoxsysteme	373
11.3.5	Elektrochemische Leistung von Pseudokondensatoren	376
11.4	Hybridkondensatoren	380
11.4.1	Negative Elektrodenmaterialien	380
11.4.2	Positive Elektrodenmaterialien	389
11.4.3	Elektrochemische Leistung von Hybridkondensatoren	402
11.5	Testen von Superkondensatoren	408
11.6	Kommerziell erhältliche Superkondensatoren	408
11.7	Anwendung von Superkondensatoren	409

- 11.7.1 Unterbrechungsfreie Stromversorgung 410
- 11.7.2 Transport 411
- 11.7.3 Intelligente Netze 411
- 11.7.4 Militärische Ausrüstung 412
- 11.7.5 Andere zivile Anwendungen 413
- Weiterführende Literatur 414

A Anhang 415

Stichwortverzeichnis 419

Geleitwort

Nicht immer schreitet das, was zusammengehört, auch gemeinsam voran.

Auf die Elektrochemie im Allgemeinen und die elektrochemische Energiespeicherung im Besonderen trifft das auf eine leider fast schon tragische Weise zu. Die Anzahl deutscher Lehrstühle für Elektrochemie und solcher, die sich wenigstens teilweise mit Elektrochemie beschäftigen ist seit Jahrzehnten rückläufig. Ursachenforschung wäre hier müßig, aber die Konsequenzen der daraus resultierenden Defizite in Lehre und Forschung sind gravierend. Unsere Universitäten können den Bedarf der Industrie an elektrochemischem Fachpersonal schon lange nicht mehr decken. Die Bereitstellung neuer elektrochemischer Forschungsergebnisse ist bereits überwiegend auf das Ausland angewiesen. Auch dies ist ein Aspekt des allseits beklagten Fachkräftemangels.

Menschengemachter Klimawandel und der dadurch erzwungene Trend zu Klimaschutz, nachhaltiger Energieversorgung und Verzicht auf fossile Energieträger stellen die Industrie vor neue Herausforderungen, deren Bewältigung ohne den Einsatz elektrochemischer Verfahren und Komponenten kaum möglich ist. Der weitere Ausbau der Elektromobilität erzwingt den Einsatz batterieelektrischer Antriebe ebenso wie den der Brennstoffzelle. Nur beide in kluger Ergänzung können das Mobilitätsbedürfnis vom Pkw bis hin zu Lkw, Bus und Bahn abdecken. Weil Wind und Sonne nicht rund um die Uhr in gleicher Intensität verfügbar sind, müssen sie so ausgelegt sein, dass sie oft Überschüsse anbieten. Damit ist auch die Energiewirtschaft auf elektrochemische Speichersysteme angewiesen.

Vor diesem Hintergrund trifft das von Rudolf Holze und Yuping Wu nun auch in deutscher Sprache vorgelegte und überarbeitete Werk, das seit 2022 schon in englischer Sprache verfügbar ist, auf einen sehr dringenden Bedarf. Es wird vielen Chemikern, die an der Universität keine hinreichend intensive Ausbildung in Elektrochemie bekommen konnten, dabei helfen, dieses Defizit zu kompensieren. Und auch dort, wo die Elektrochemie noch gelehrt wird, werden Lehrende und Studierende gern auf dieses Werk zurückgreifen.

Das Buch beginnt mit jenen Grundlagen aus Thermodynamik und Kinetik elektrochemischer Prozesse, ohne die niemand Elektrochemie betreiben kann. Sehr umfassend und nahezu vollständig widmet es sich dann den Primär- und Sekundärsys-

temen, den Brennstoffzellen und den Redoxbatterien und wird abgerundet durch ein weiteres Kapitel über Superkondensatoren. Von Kleinstbatterien im Hörgerät bis hin zu großen stationären Speichern findet der Leser schnell jedes ihn interessierende System. Viele vergleichende Betrachtungen und Tabellen erleichtern die Orientierung bei der Suche nach einem für eine spezielle Aufgabe besonders geeigneten System. Das vorgelegte Buch ist als Lehrbuch für elektrochemische Einsteiger ebenso geeignet wie als Nachschlagewerk für bereits Fortgeschrittene.

Die chinesisch-deutsche Autorenpartnerschaft besitzt über die erwiesenermaßen hohe wissenschaftliche Kompetenz beider Kollegen hinaus noch einen weiteren Charme, der nicht unerwähnt bleiben soll. Namhafte Wirtschaftswissenschaftler werden gerade in unseren Tagen nicht müde, insbesondere die deutsche Autoindustrie davor zu warnen, ihre Stellung am Weltmarkt nicht durch einen zu zögerlichen Umstieg auf die Elektromobilität zu gefährden. Von weltweit rund 400 000 wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbussen laufen über 90 % in China – made in China. Ich wünsche dem Buch, dass es eine weite Verbreitung finden möge und die erwähnte Autorenpartnerschaft vielleicht auch als Katalysator für eine wachsende Industriepartnerschaft zwischen Europa und China dienen kann.

Eppstein

Gerhard Kreysa

Vorwort

Intensive Nutzung elektrischer Energie (oder kürzer und gebräuchlicher, von Elektrizität) wird oft als Gradmesser des Fortschritts der Entwicklung einer Industriegesellschaft betrachtet. Diese elektrische Energie wird durch Umwandlung anderer Energieformen gewonnen (sie wird nicht etwa erzeugt), sehr häufig durch Verbrennen fossiler Energieträger oder die Nutzung von Kernspaltungsprozessen und Nutzung der freigesetzten Wärme in weiteren thermisch-mechanischen Umwandlungsprozessen oder durch Wandlung der kinetischen Energie im Fließwasser in einer Turbine mit angeschlossenem Generator.

Schon in einem frühen Entwicklungsstand wurde die Notwendigkeit der Speicherung dieser Energie für mobile und transportable Anwendungen festgestellt: Die ersten Autos wurden von Elektromotoren angetrieben. Die noch immer rasch wachsende Zahl auch von kritischen Anwendungen dieser Energie, die auf ununterbrochene Versorgung angewiesen sind (z. B. in Krankenhäusern, im Verkehr, in Computern), hat zudem einen Bedarf für elektrische Speichersysteme ausgelöst, die selbst dann funktionieren, wenn das Stromnetz und andere externe Versorgungen ausfallen. Schließlich sind der Bedarf für fortgeschrittene Verfahren der Wandlung elektrischer Energie in andere Energieformen wie auch die Rückumwandlung mit dem stürmischen Wachstum der Nutzung erneuerbarer Energien (Windenergie, Sonnenenergie) mit fluktuierender Verfügbarkeit verbunden mit dem Bedarf für große Speicher weitere Triebfedern.

Effizienter Einsatz der verfügbaren Optionen benötigt Kenntnisse und Informationen. Dies wird beim Blick auf neuinstallierte Studiengänge an Universitäten ebenso wie auf neue Geschäftsfelder von Unternehmen offenkundig. Ein Lehrbuch für Studierende, die in das Feld der Energietechnologie, -speicherung und verbesserte Energienutzung wie auch für Wissenschaftler in diesem Gebiet, die sich neuen Herausforderungen gegenübersehen, fehlt seit Langem. Die Autoren – beide seit Jahren in der elektrochemischen Energiespeicherung und -wandlung aktiv – versuchen mit dem vorliegenden Buch, diese Lücke zu schließen. Es wird allerdings angesichts der raschen Veränderungen und Zuwächse in diesem Feld nur eine vorläufige Abhilfe sein, immerhin ist es ein Start.

Symbole und Beschriftung von Figuren folgen den Empfehlungen der IUPAC (Pure Appl. Chem. **37** (1974) 499). Beim Vergleich mit älteren Lehrbüchern mag das leichte Verwirrung auslösen, die Liste der Symbole wird helfen (siehe Anhang).

Gängige Begriffe und Namen sowie Akronyme und Abkürzungen sind unter „Akronyme, Begriffe und Definitionen“ zusammengefasst; darin finden sich häufig die oft gebrauchten englischen Termini, für die mitunter kein deutsches Äquivalent etabliert ist.

Maßeinheiten werden vom Zahlenwert mit einem Schrägstrich separiert (quantity calculus); rechteckige oder runde Klammern werden nur verwendet, wenn Verwirrung nicht anders vermieden werden kann. In chemischen Reaktionsgleichungen werden Lösungsmittelmoleküle z. B. in der Solvathülle eines Ions nur erwähnt, wenn dies zum Verständnis des gerade diskutierten Phänomens erforderlich ist.

Dieses Buch versucht keinesfalls eine vollständige Darstellung aller Details oder eine Sammlung aller Veröffentlichungen zur elektrochemischen Energiespeicherung und -wandlung. Daher enthält es keine Literaturverzeichnisse. Am Ende der Kapitel finden sich Hinweise auf weiterführende Literatur zur Vertiefung des dargestellten Inhalts.

Das Verfassen dieses Buches wäre ohne Hilfe und Unterstützung unmöglich geblieben. Y.W. dankt für die Unterstützung durch das National Key R & D Program of China (2018YFB0104301), die National Natural Science Foundation of China (No. 21374021 und 52073143), sein Distinguished Youth Scientist Program (51425301) und das Union Key Project (U1601214); R.H. dankt dem Fonds der Chemischen Industrie, der eine großzügige Unterstützung zur Deckung der angefallenen Kosten bereitgestellt hat. Teile des Manuskripts wurden während Aufenthalten an der Fudan University, Shanghai, und der Nanjing Tech University, Nanjing, erstellt: Die großzügige Gastfreundschaft von Yuping Wu, seiner Gruppe und seiner Universitäten und die stimulierende Umgebung wie auch die Förderung durch die Alexander von Humboldt-Stiftung werden dankbar vermerkt. Einige Teile wurden während Aufenthalten in der inspirierenden Umgebung der Université de Bourgogne mit zahlreichen Diskussionen mit M. Vorotyntsev – großzügig gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft – verfasst. Schließlich brachten Diskussionen mit A.K. Shukla am Indian Institute of Science in Bangalore weitere Anregungen, wiederum ermöglicht durch Förderung der Alexander von Humboldt-Stiftung und einen großzügigen Gastgeber.

Selbstverständlich gehen alle Irrtümer und Fehler zu Lasten der Autoren – die dankbar Hinweise und Korrekturen entgegennehmen.

Shanghai, Nanjing, St. Petersburg,
Bangalore und Chemnitz, Oktober 2022

Rudolf Holze und Yuping Wu

Akronyme, Begriffe und Definitionen

Zahlreiche technische Begriffe und Akronyme werden auf dem Gebiet der elektrochemischen Energiespeicherung und -wandlung genutzt; sie werden auch in diesem Buch häufig verwendet. Keine Leserin und kein Leser sollte nach einer korrekten Definition suchen müssen und ebenso wenig Opfer willkürlichen oder saloppen Gebrauchs werden. Daher sind alle relevanten Definitionen, Abkürzungen, Akronyme und gebräuchlichen Begriffe im Folgenden aufgeführt. Wenn sich kein deutschsprachiger Term etabliert hat, wird das gängige englische Äquivalent vorgestellt, falls es ist die englische Ausschreibung eines Akronyms zum besseren Verständnis mit angegeben.

AAM Anionenaustauschermembran.

Abschaltspannung Spannung, bei der die Ladung oder Entladung beendet werden kann oder muß, um Schaden oder unsichere Betriebszustände zu vermeiden.

AC Wechselspannung/-strom; activated carbon, Aktivkohle.

ADDA Analog-digital- und Digital-analog-Wandler.

AEM Anion exchange membrane, Anionenaustauschermembran.

AFC Alkalische Brennstoffzelle.

AGM Absorbent glass mat; eine Bauform der Blei-Säure-Batterie, in der die Elektrolytlösung in Glasfasermatten zwischen den Elektroden absorbiert ist.

Aktive Masse (Material) Bruchteil von Elektrodenmasse (-material), der tatsächlich an der Elektrodenreaktion teilnimmt. Bindemittel, leitfähige Zusätze und Stromsammler nehmen nicht teil.

Aktive Massen-/Materialnutzung Der Anteil der aktiven Masse, der in der Ladung/Entladung genutzt wird; aus verschiedenen Gründen tritt oft keine vollständige Ausnutzung ein, mitunter ist sie nicht möglich.

Aktivierungsüberpotential Mitunter gebrauchtes Synonym für Ladungsdurchtrittsüberpotential.

Alkalische Batterie Populäre Bezeichnung der Zink-Mangandioxid-Primärzelle mit einer alkalischen Elektrolytlösung.

Alterung Allgemeiner Begriff, der alle Formen der Verschlechterung von Batteriekomponenten bezeichnet, die zu unwiderruflichem Verlust von Zellkapazität führen.

AM Alkalimangan.

AMD Aktiviertes Mangandioxid.

Amperestundenwirkungsgrad Synonym für Coulomb-Wirkungsgrad.

AN Acetonitril, gängiges organisches Lösungsmittel.

Anode Aus dem Griechischen: aufwärts, W. Whewell zugeschrieben. Vermutlich hilfreicher: der Ort in einer elektrochemischen Zelle, an dem eine Oxidation stattfindet; in einer Primärzelle stets der Minuspol, in einer Sekundärzelle ist es der Minus- oder der Pluspol je nach Betriebszustand Ladung/Entladung. Auch dies mag verwirren; die Anionen wandern stets zur Anode, die Kationen stets zur Kathode.

Antriebsstrang Ingenieurbegriff, der alle Komponenten für die Umwandlung elektrischer Energie und die Weiterleitung zum Anwendungsort, z. B. den Antriebsrädern eines Fahrzeugs, zusammenfaßt.

APU Auxiliary power unit, Hilfsstromquelle.

ARLB Aqueous rechargeable lithium battery, wäßrige wiederaufladbare Lithium-batterie.

ARSB Aqueous rechargeable sodium battery, wässrige wiederaufladbare Natrium-batterie

ASC Asymmetrischer Superkondensator.

Autobatterie Sekundärbatterie, die hinsichtlich Leistungsdichte, Gehäuse und elektrischen Anschlüssen für Gebrauch in Fahrzeugen ausgelegt ist.

BASE Beta-Alumina-Festelektrolyt.

Batterieconditionierung Prozedur zur Vorbereitung einer Batterie aus der Produktion für den Einsatz, z. B. Formieren einer Blei-Säure-Batterie.

Batteriemanagement Kombination von zusätzlichen Baugruppen für eine Batterie, einen Batteriepack oder ein Batteriemodul zur Überwachung von Ladung, Entladung, Temperatur und weiteren Betriebsparametern.

Batteriemodul Zusammenschaltung von Batteriezellen als Bestandteil eines Batteriepacks.

Batteriepack Kombination von mehreren Batteriezellen oder -packs in ein einheitliches mechanisch und elektrisch verbundenes Produkt.

BE Bifunktionale Elektrode (z. B. die positive Elektrode in einer Metall-Luft-Batterie) für die OER während der Ladung und die ORR während der Entladung.

BEMS Building energy management system, Gebäudeenergiemanagementsystem.

BET-Oberfläche Oberfläche eines porösen Materials, die mit der von Brunauer, Emmett und Teller entwickelten Methode bestimmt wurde.

BEV Battery (propelled) electric vehicle, nur batterieversorgtes Elektrofahrzeug.

BMI Battery management interface, Batteriemanagementschnittstelle.

BMS Batteriemanagementsystem.

Bobbin Technische Bezeichnung des zylindrischen Elektrodenkörpers in der Mitte einer Zelle, z. B. der aus Mangandioxid und Kohlenstoff gepreßte Körper in einer Leclanché-Zelle.

CAES Compressed air (oder gas) energy storage, Druckluft(gas)Energiespeicher.

Capacity retention Kapazitätserhaltung; die bei höheren Stromstärken noch verfügbare Kapazität oder die nach einer bestimmten Zahl von Lade-/Entladezyklen noch verfügbare Kapazität.

Carnot-Zyklus Ein zuerst vom französischen Physiker Sadi Carnot beschriebenes thermodynamisches Gedankenexperiment für die Konversion thermischer in nützliche mechanische Energie. Als Ergebnis kann der maximale Wirkungsgrad berechnet werden, der in der Praxis unerreichbar bleibt.

CBD chemical bath deposition, chemische Badabscheidung.

CCA Cold cranking amperage; gibt den bei $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgebbaren Strom einer Starterbatterie an.

CC-CV Constant current charge followed by charging at constant voltage; Ladeprogramm, bei dem einer Konstantstromladung eine Konstantspannungsladung folgt.

CCV Closed circuit voltage; die elektrische Spannung an den Anschlüssen eines elektrochemischen Energiewandlers unter Stromfluß, d. h. mit angeschlossener Last. Sie ist stets kleiner als die Leerlaufspannung wegen unter Stromfluß entstehender Verluste an den Elektroden (durch langsame Elektrodenkinetik verursachte Überpotentiale) und entlang des elektronischen und ionischen Strompfades im Wandler (Ohm'sche Widerstände, Widerstand der Elektrolyt(lösung), der Stromsammler).

CE Charge efficiency; Teil der bei der Entladung wiedergewonnenen Ladung in einer Sekundärbatterie.

CEM Cation exchange membrane, Kationenaustauschermembran.

Cell reversal Zellumkehr. Bei Tiefentladung eines Batteriepacks kann in einer Zelle mit kleinerer Kapazität als die der übrigen Zellen eine Umkehr der Elektrodenprozesse eintreten mit invertierter Zellspannung.

CEM Cation exchange membrane, Kationenaustauschermembran.

Charge acceptance Die Fähigkeit einer Sekundärbatterie, elektrische Energie in nutzbare chemische Energie durch eine elektrochemische Wandlung umzuwandeln. Wegen begrenzter Geschwindigkeit chemischer und elektrochemischer Prozesse kann ein Teil der zugeführten Ladung in Wärme oder Zersetzungsprodukte wie Wasser- und Sauerstoff in einer Blei-Säure-Batterie gewandelt werden. Eine allgemeine Formel in Ladungsbeträgen ist

$$\text{charge acceptance} = \frac{\text{in wieder gewinnbare chemische Energie gewandelte Energie}}{\text{der Zelle zugeführte Ladung}}$$

Ein ähnlicher Ausdruck kann mit dem der Zelle zugeführten Gesamtstrom und dem in parasitären Reaktionen verbrauchten Strom formuliert werden. Charge acceptance kann abhängig vom Ladungszustand substantiell von 100 % abweichen; gegen Ende der Ladung kann sie stark nachlassen.

CMC Carboxymethylcellulose.

CMD Chemically synthesized manganese dioxide, synthetisches Mangandioxid.

CMOS Complementary metal-oxide semiconductor, Typ eines Halbleiterschaltkreises.

Coulomb-Wirkungsgrad Das Verhältnis der aus der geladenen Zelle entnommenen elektrischen Ladung Q_{ent} bezogen auf die in die Zelle eingespeicherte Ladung Q_{lad} :

$$\eta_{\text{Ah}} = \frac{Q_{\text{dis}}}{Q_{\text{char}}} = \frac{\text{Entladestrom} \times \text{Entladezeit}}{\text{Ladestrom} \times \text{Ladezeit}}$$

C-Rate Der Entlade- oder Ladestrom mit Bezug auf die angegebene Kapazität einer Zelle: Eine C-1-Rate (oder 1C-Rate) einer Zelle mit einer Kapazität von 2700 mAh entspricht 2,7 A.

CV Cyclic voltammogram oder cyclic voltammetry, zyklisches Voltammogramm oder zyklische Voltammetrie.

Cycle life Die Zahl von Lade-/Entladevorgängen, die eine Zelle vor Unterschreiten der Mindesteigenschaften durchlaufen sollte.

DAFC Direct alcohol fuel cell, direkte Alkoholbrennstoffzelle; Brennstoffzellentyp, der einen Alkohol direkt, d. h. ohne eine zwischengeschaltete Umwandlung z. B. in Wasserstoff, nutzt.

DC Direct current, Gleichstrom.

DEAAB „dual-electrolyte“-Al/Luft-Batterie.

DEC Diethylcarbonat; Lösungsmittel für Elektrolytlösungen in Lithium-Ionen-Batterien.

DEFC Direct ethanol fuel cell, direkte Alkoholbrennstoffzelle; Brennstoffzellentyp, der Ethanol direkt, d. h. ohne eine zwischengeschaltete Umwandlung z. B. in Wasserstoff, nutzt.

DET Direkter Elektronentransfer; bezeichnet eine Elektrodenbetriebsart z. B. in einer Biobrennstoffzelle.

DFAFC Direct formic acid fuel cell, Ameisensäuredirektbrennstoffzelle; Brennstoffzellentyp, die Ameisensäure direkt, d. h. ohne eine zwischengeschaltete Umwandlung z. B. in Wasserstoff, nutzt.

DMFC Direct methanol fuel cell, Direktmethanolbrennstoffzelle; Brennstoffzelle, in der Methanol als Brennstoff an der Anode ohne vorgeschaltete Konversion z. B. zu Wasserstoff genutzt wird.

DoD (DOD) Depth of discharge; Entladetiefe.

Duty cycle Einschaltdauer oder Tastverhältnis; gibt das Verhältnis der Einschalt- zur Abschaltzeit an; bei Batterien schließt die Einschaltdauer Lade- und Entladezeiten ein.

EASA Electrochemically active surface area, elektrochemisch aktive Elektrodenfläche; Teil der Fläche, der an der Elektrodenreaktion teilnimmt. Für glatte Elektroden mit nur geringer Rauigkeit kann die z. B. durch Messung der Doppelschichtkapazität bestimmte EASA etwas größer als die geometrische Oberfläche sein. In porösen Elektroden ist EASA viel größer als die geometrische Oberfläche, aber immer noch meist nur ein Bruchteil der BET-Oberfläche (wahre Oberfläche).

EBFC Enzymatic biofuel cell, enzymatische Brennstoffzelle.

EBMA Electron beam microanalysis, Elektronenstrahlmikroanalyse.

EC Ethylencarbonat, Lösungsmittel für Elektrolytlösungen in Lithium-Ionen-Batterien.

ECSA Synonym für EASA.

EDLC Electric (electrochemical) double layer capacitor, elektrischer (elektrochemischer) Doppelschichtkondensator.

EES(S) Electrochemical energy storage system, elektrochemisches Energiespeichersystem.

EMD Electrochemically prepared manganese dioxide, elektrolytisch hergestelltes Mangandioxid.

Energiedichte Die in einem elektrochemischen Speicher (in kWh oder Wh) gespeicherte Energie als Produkt von Strom und Spannung über die Entladezeit. Da sowohl Spannung wie auch Strom während der Entladung variieren können (bei Entladung mit konstantem Strom, konstanter Zellspannung oder in einen konstanten Widerstand) erfordert die exakte Bestimmung entsprechende Aufzeichnungsgeräte. Die Energie pro Zelle ist die Energiedichte, entsprechend den Maßeinheiten ist es die gravimetrische (gewichtsbezogene) oder volumetrische (volumenbezogene) Energiedichte. Manchmal wird vereinfacht und ungenau Energiedichte mit volumetrischer Energiedichte gleichgesetzt.

Energieeffizienz Das Verhältnis aus einer Zelle entnommener elektrischer Energie zur eingespeicherten Energie:

$$\eta_{\text{Wh}} = \frac{\int_{t=0}^{\text{Entladezeit}} I \cdot U(t) dt}{\int_{t=0}^{\text{Ladezeit}} I \cdot U(t) dt}$$

Wegen der Elektrodenüberpotentiale bei Ladung und Entladung ist die Energiedifferenz stets kleiner als die Coulomb- oder Ladeeffizienz.

Entladeprofil Das auf eine Zelle meist unter Laborbedingungen angewendete Entladestrom-Zeit-Programm.

Entladestrom Der bei der Entladung angewendete Strom, meist in A, mitunter auch bezogen auf das angegebene Speichervermögen (rated capacity) C der Batterie. In diesem Fall angegeben als C_x/t mit x als dem Entladestrom bei Entladung in x Stunden und t als spezifizierter Entladezeit in Stunden. Ein Beispiel: Rated capacity 5 Ah bei $x = 1$ h, einem Entladestrom von 2 A entspricht ein Entladestrom 0,4 C.

EOl End of life, Ende der Lebensdauer; Zeitpunkt zu dem die vom Hersteller oder von einer technischen Organisation definierten Leistungsdaten einer Batterie unterschritten werden.

EOR Ethanol oxidation reaction; die Anodenreaktion in einer DAFC.

EPS Electrochemical power source, elektrochemische Energiequelle.

Equalizing charge In einem Batteriepack kann eine Ladung der kompletten Einheit in ungleichen Ladungszuständen einzelner Zellen resultieren. Mit elektronischen Schaltungen kann die zur weiteren Ladung unzureichend geladener Zellen nötige Energie zugeführt werden.

Erhaltungsladung Ladung einer Batterie bei kleinem Strom zur Erhaltung des vollen Ladungszustands.

ESR Elektrischer Serienwiderstand.

ESS Energiespeichersystem.

EUCAR European Council for Automotive R&D, das Europäische Konzil für Fahrzeugforschung und -entwicklung.

EV Electric vehicle, vollelektrisches Fahrzeug mit rein elektrischem Antrieb.

Expander Zusätze in Blei-Säure-Batterien, die während der Batterieladung poröse Abscheidung gewährleisten; sie werden als Elektrolytlösungszusatz oder in der negativen Elektrodenmasse zugefügt.

Fahrzeugbatterie Sekundärbatterie, die hinsichtlich Leistungsdichte, Gehäuse und elektrischen Anschlüssen für den Gebrauch in Fahrzeugen ausgelegt ist.

Faraday-Konstante F ist die elektrische Ladung von 1 mol Elektronen: $F = 96\,494 \text{ A s mol}^{-1}$.

Faraday-Gesetz Das erste Gesetz gibt die bei einer Reaktion von m Masse eines Materials mit der Molmasse M umgesetzte Ladung Q an. Die Oxidation von 1,22 g Zink zu Zn^{2+} -Ionen setzt eine elektrische Ladung von 1 Ah frei entsprechend

$$Q = \frac{m \cdot z \cdot F}{M}$$

mit $z = 2$, $F = 96\,494 \text{ A s mol}^{-1}$ und $M = 65.39 \text{ g mol}^{-1}$. Das zweite Gesetz stellt die Beziehung zwischen den Massen m von Stoffen unterschiedlicher Molmasse M und der ionischen Ladung z her:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_1/z_1}{M_2/z_2}$$

FBES Flow battery energy storage, Speicherung mit RFBs.

FC-HES Fuel cell hydrogen energy storage; Kombination eines Elektrolyseurs, einer Wasserstoffspeicherung und einer Brennstoffzelle. Nimmt man einen Wirkungsgrad von 70 % für den Elektrolyseur und von 50 % für die Brennstoffzelle an, ergibt sich (weitere Verluste z. B. von Wasserstoff ignorierend) ein Gesamtwirkungsgrad von 35 % mit hohen Investitionskosten.

FCHV Fuel cell hydrogen vehicle; Brennstoffzellenfahrzeug mit einer Knallgasbrennstoffzelle für alle Verbraucher im Fahrzeug.

FES Flywheel energy storage, Schwungradspeicher.

FLG few-layer graphene, Partikel aus wenigen Lagen von Graphen.

Float charging Ladung einer Zelle bei konstanter Spannung zur Erhaltung des vollen Ladungszustandes. Im Vergleich zur Erhaltungsladung bei konstantem Strom werden exzessive Spannungen an der Zelle vermieden. Die benötigte elektronische Schaltung kann dabei etwas kostspieliger sein.

Formierung Chemische und/oder elektrochemische Prozesse zur Überführung der Zelle oder ihrer Komponenten in den betriebsfähigen Zustand.

Galvanostatisch Ein von konstantem Strom getriebener Prozeß, z. B. die Ladung eines Akkumulators oder die Aufzeichnung einer Elektrodenpotential- vs. Stromdichtekurve.

GIC Graphite intercalation compound, Graphitinterkalationsverbindung. Graphit als negative aktive Masse in einem Akkumulator kann Ionen (sowohl Anionen wie auch Kationen entsprechend der Polarität der Elektrode) und damit Ladung

durch Insertion, d. h. Interkalation, zwischen den Graphenlagen aufnehmen. Stöchiometrische Verbindungen werden auch als GICs bezeichnet.

GITT Galvanostatic intermittent titration technique, galvanostatische Titration.

GLIB Gelelektrolyt-Lithium-Ionen-Batterie oder Lithium-Ionen-Batterie mit einem Gelpolymerelektrolyten.

GPE Gelpolymerelektrolyt oder gelierter Polymerelektrolyt.

Gravimetrische Energiedichte Mitunter vereinfacht (und ungenau) spezifische Energie; die auf die Masse bezogene Energiedichte in Einheiten von Wh kg^{-1} .

Gravimetrische Ladungsdichte Die auf die Masse bezogene Ladungsdichte in Einheiten von Wh kg^{-1} .

Gravimetrische Leistungsdichte Die Leistungsfähigkeit eines Systems in den Einheiten von W kg^{-1} .

GS Graphen sheet(s), Graphenblätter.

HESS Hybrid energy storage system, hybrides Energiespeichersystem, z. B. die Kombination einer Lithium-Ionen-Batterie und eines Superkondensators zur Erzielung hoher Energie- und Leistungsdichte.

HEV Hybrid electric vehicle, elektrisches Hybridfahrzeug; Fahrzeug mit einem Verbrennungs- und einem Elektromotor, in dem die Beiträge beider Antriebe von der technischen Auslegung abhängen. „Milde“ HEVs sind Fahrzeuge, in denen der elektrische Antrieb nur im Stop-an-Go-Modus wirkt. „Strong“ HEVs nutzen den Elektroantrieb auch bei der Beschleunigung. Für die hierzu nötige höhere elektrische Leistung wird eine höhere Bordspannung vorgesehen. „Plug-in“ HEVs benutzen den elektrischen Antrieb auch für größere Distanzen (ca. 50–100 km) ohne Nutzung des Verbrennungsmotors.

HFEDS US highway fuel economy driving schedule, US-amerikanisches Fahrprogramm zur Ermittlung des Treibstoffverbrauchs.

HOMO Highest occupied molecular orbital, höchstes besetztes Molekülorbital.

HOR Hydrogen oxidation reaction, Wasserstoffoxidsreaktion; anodischer Vorgang an der negativen Elektrode einer wasserstoffverbrauchenden Brennstoffzelle.

HRE Hydrogen reference electrode, Wasserstoffbezugselektrode.

HT-PEMFC Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle.

Hybrid(vehikel) Fahrzeug, das sowohl einen Elektromotor als auch einen Verbrennungsmotor zum Antrieb nutzt.

IAM Ionenaustauschermembran.

ICD implantable cardioverter defibrillator, implantierbarer Kardioverter-Defibrillator.

ICE Internal combustion engine; mit Benzin, Diesel oder anderen Brennstoffen angetriebener Verbrennungsmotor. Der Wirkungsgrad, d. h. die energetische Nutzung des Brennstoffs bei der Wandlung der ihm innewohnenden chemischen in mechanische Energie, wird vom Carnot-Zyklus begrenzt.

ICV Internal combustion vehicle; ein mit Verbrennungsmotor angetriebenes Fahrzeug.

IEC Internationale Elektrotechnische Kommission.

IEM Ion exchange membrane, Ionenaustauschermembran.

IL Ionic liquid, ionische Flüssigkeit.

Innenwiderstand Die Summe aller Ohm'schen Widerstände in einer Batterie, die den verfügbaren Strom begrenzt; siehe auch ESR.

iR Akronym aus dem Strom i (richtig I) und dem Widerstand R ; der durch den Widerstand R fließende Strom i verursacht einen Spannungsfall $U = i \cdot R$ entsprechend der Ohm'schen Regel, nicht mit dem Innenwiderstand zu verwechseln.

iR-Abfall Spannungsabfall über einem Widerstand R bei einem Strom i .

IRFC Internal reforming fuel cell, Brennstoffzelle mit interner Reformierung des Brennstoffs.

JARI Japan Automobile Research Institute, japanisches Automobilforschungsinstitut.

KAM Kationenaustauschermembran.

Kapazität Allgemein das Speichervermögen eines Materials oder Systems. Bei der Speicherung elektrischer Energie ist die Kapazität (seltener auch Kapazitätz) eines Kondensators $C = Q/U$ (in den Einheiten F(arad) für C , A s oder C(oulomb) für die Ladung Q und V für die Spannung U). In elektrochemischen Systemen (Primär- und Sekundärbatterien) wird Ladung durch Änderung des Redoxzustandes von Teilchen wie in $\text{Pb(IV)O}_2 + 2 \text{e}^- + 2 \text{H}^+ + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Pb(II)SO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ während der Entladung der positiven Masse in einer Blei-Säure-Batterie gespeichert. Das Speichervermögen (gravimetrisch wie auch volumetrisch in A s g^{-1} und A s l^{-1}) kann mit Atomgewichten und Molmassen und den Dichten der beteiligten Materialien berechnet werden (siehe unten). Bei Superkondensatoren ist die Berechnung komplizierter, da Speicherung sowohl durch Ladung der elektrochemischen Doppelschicht (EDLC; dies kann mit der Berechnung für einen Kondensator behandelt werden) wie auch durch Redoxprozesse stattfinden kann (pseudokapazitive Prozesse). Versuchsergebnisse werden oft in den Einheiten A s V^{-1} mit V bezogen auf die Spannungsänderung eines Kondensators angegeben. Wenn Daten auf einer Elektrode eines Superkondensators bezogen angegeben werden, bezieht man sich oft auf eine experimentell beobachtete Änderung des Elektrodenpotentials $\Delta E = U$. Allerdings macht die Angabe eines Energiespeichervermögens für eine Zelle mit nur einer Elektrode keinen Sinn.

Kapazitätserhaltung Capacity retention; die bei höheren Stromstärken noch verfügbare Kapazität oder die nach einer bestimmten Zahl von Lade-/Entladezyklen noch verfügbare Kapazität.

Kathode Aus dem Griechischen: nach unten, W. Whewell zugeschrieben. Vermutlich hilfreicher: der Ort, an dem in einer elektrochemischen Zelle eine Reduktion abläuft, in Primärzellen stets der Pluspol; in einer Sekundärzelle abhängig vom Betriebszustand (Ladung oder Entladung) der Plus- oder der Minuspol. Dies mag immer noch verwirren; Kationen wandern stets zur Kathode, Anionen zur Anode.

LAB Lead-acid battery, Blei-Säure-Batterie.

Ladeprofil Das während der Ladung einer Zelle angewendete Strom-Spannungs- oder Spannungs-Zeit-Programm.

Ladungsdichte Elektrochemische Energieumwandlung ist stets mit dem Fluß elektrischer Ladung durch einen Draht, eine Phasengrenze oder eine Elektrolytlösung verbunden. Wegen der Kopplung des elektronischen Ladungsflusses mit dem Ionenfluß im Ionenleiter ist die Ladungsmenge, d. h. das Produkt aus Strom und Zeit (Einheiten: A s), mit den Faraday'schen Gesetzen direkt mit der Masse umgesetzter Chemikalien verknüpft. Da die Mengen der in einer Zelle gespeicherten Chemikalien während ihrer Herstellung festgelegt oder berechnet werden, ist die gespeicherte Ladung in einer Zelle festgelegt; bezogen auf die Zelle ergibt sich die Ladungsdichte.

Ladungserhaltung Die Fähigkeit einer Zelle, die in ihr gespeicherte Ladung mit ggfs. Selbstentladungsverlusten im stromlosen Zustand zu erhalten.

Last mile Letzte Meile; s. dort.

Lastspannung Die Spannung einer Batterie unter Last, d. h. bei Stromfluß.

LCO LiCoO_2 ; Material für die positive Elektrode in einer Lithium-Ionen-Batterie.

Leerlaufspannung Spannung an den Anschlüssen eines elektrochemischen Wandlers ohne Belastung.

Leistungsdichte Leistungsfähigkeit (Stromabgabefähigkeit) eines Systems bezogen auf eine Zelle. Bezogen auf das Gewicht spricht man von gravimetrischer Leistungsdichte W kg^{-1} , bezogen auf das Volumen von der volumetrischen Leistungsdichte W l^{-1} mitunter vereinfacht (und ungenau) als Synonym für volumetrische Leistungsdichte benutzt.

Letzte Meile Last mile; Begriff aus der Eisenbahntechnik. Elektrische Lokomotiven mit einem Hilfsdieselmotor und/oder mit zusätzlichen elektrochemischen Speichern für die Elektromotoren, die den Betrieb der Lokomotive ohne Oberleitung z. B. für das Rangieren ermöglichen.

LEV Low-emission vehicle, Niedrigemissionsfahrzeug.

LIB (auch LiB) Lithium-Ionen-Batterie.

LIC (auch LiC) Lithium-Ionen-Kondensator; hybrides Speichersystem zwischen Kondensator und Akkumulator. An der aus Aktivkohle bestehenden positiven Elektrode wird Ladung in der elektrochemischen Doppelschicht gespeichert; in der mit Lithiumionen beladenen negativen Elektrode (die fixiert ihr Elektrodenpotential fast auf das einer Lithiumelektrode) finden Lithiuminterkalation und -deinterkalation statt.

LiFePo₄ Lithiumeisenphosphat, Material für die positive Elektrode einer Lithium-Ionen-Batterie.

LiMetO₂ Lithiummetalloxid, Sammelbegriff für Verbindungen für die positive Elektrode einer Lithium-Ionen-Batterie.

LiPo Lithium polymer battery, auch LIPO, Lithiumpolymerbatterie. Zunächst wurde dieser Begriff auf Lithium-Ionen-Batterien mit einem polymeren Festelektrolyten angewandt, in denen sich auch eine Lithiummetallelektrode befinden konnte. Später wurden damit auch Lithium-Ionen-Batterien mit einer Plastikfolienverpackung bezeichnet.

LISICON Lithium super ionic conductor, hochleitfähiger Lithium-Ionen-Leiter.

LiTFSI Lithiumbis(trifluormethansulfonyl)imid, Elektrolytsalz.

- LL** Load leveling, Lastausgleich; meint den Ausgleich von Angebot und Nachfrage über längere Zeiträume – zwischen Tag und Nacht, Winter und Sommer. Bei kürzeren Zeiträumen wird der Begriff „peak shaving“ (ungefähr: Spitzenausgleich) verwendet.
- LMB** Lithium-Metall-Batterie.
- LMO** LiMn_2O_4 , Material der positiven Elektrode in einer Lithium-Ionen-Batterie.
- LNG** Liquified natural gas, verflüssigtes Erdgas.
- Load shifting** Lastverschiebung, eine Form des Lastausgleichs.
- LOHC** Liquid organic hydrogen carrier, flüssiger Wasserstoffträger. Wasserstoff aus z. B. als Elektrolyseuren arbeitenden bifunktionellen Brennstoffzellen muß gespeichert werden, wenn er nicht kontinuierlich verbraucht wird. Dies kann in verflüssigter Form oder unter Druck erfolgen. Wegen der niedrigen Energiedichte dieser Speichersysteme wird die Möglichkeit betrachtet, Wasserstoff mit organischen Verbindungen unter Bildung wasserstoffreicher Verbindungen umzusetzen (z. B. durch Addition an eine Doppelbindung). Erzielbare Energiedichten können Werte von flüssigen Brennstoffen und Kohlenwasserstoffen erreichen.
- LPG** Liquified propane gas, verflüssigtes Propangas.
- LSD** Low self-discharge NiMH accumulator (LSD-NiMH), NiMH-Akkumulator mit kleiner Selbstentladung.
- LSV** linear scan voltammetry, lineare Scan-Voltammetrie.
- LT-PEMFC** Low temperature polymer electrolyte membrane fuel cell, Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzelle für niedrige Temperaturen (meist Umgebungstemperatur).
- LUMO** Lowest unoccupied molecular orbital, niedrigstes unbesetztes Molekülorbital.
- MBS** Multibattery server, Steuerserver für mehrere Batterien.
- MCFC** Molten carbonate fuel cell, Schmelzcarbonatbrennstoffzelle.
- MEA** Membrane electrode assembly; Einheit aus der ionisch leitenden Membran in einer PEM-Zelle mit den Elektroden auf beiden Seiten.
- MET** Mediated electron transfer; Betriebsmodus einer Elektrode mit Mediatoren z. B. in einer Biobrennstoffzelle.
- MFC** Microbial fuel cell, mikrobielle Brennstoffzelle.
- Microgrid** Zusammengeschaltete Gruppe verteilter Energiequellen/-wandler (PV, Windräder) und verbundener Lasten zu einer Einheit bezogen auf das überregionale Stromnetz. Es kann mit oder ohne (Inselmodus) Verbindung zu diesem Netz funktionieren. Typische Lasten sind 100–10 000 kW.
- Mikrohybrid** Fahrzeug mit Start-Stop-Automatik, die den Verbrennungsmotor bei Stop abschaltet. Bei Wiederanlassen wird die beim Bremsen im Fahrzeug gespeicherte Energie für den Anlasser genutzt.
- Mild hybrid** Fahrzeug mit einem zusätzlichen Elektromotor, der die Leistung des Verbrennungsmotors ergänzt. In der Parallelschaltung unterstützt der Elektromotor z. B. beim Beschleunigen. In der Serienschaltung wird das Fahrzeug von einem dann stärkeren Elektromotor alleine angetrieben, während der Verbrennungsmotor die Bordbatterie auflädt (s. auch Reichweitenverlängerung).
- MPC** mikroporöser Kohlenstoff.

- MWCNT** multiwalled carbon nanotubes, mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren.
- Nafion®** Kationenaustauschermembran aus sulfoniertem PTFE (Polytetrafluoräthylen) mit schneller Natrium-Ionen-Leitung; wird als Festelektrolyt in PEM-Zellen genutzt.
- Name-plate capacity** Siehe „rated capacity“.
- NaNiCl₂** Natrium-Nickelchlorid, Hochtemperaturbatterie.
- Nanogrid** Kombination eines kommerziellen oder großen Wohngebäudes mit Energieerzeugungssystem (Solar, Wind) und einem Speichersystem mit einer Leistung von 10–100 kW mit einer (Netz-)Frequenz und mit Vorkehrungen zum Spitzenausgleich, zeitlichem Lastausgleich (time shifting) und Notstromversorgung.
- NAS-Batterie** Natrium-sulfur battery, Natrium-Schwefel-Batterie.
- NASA** National Aeronautics and Space Administration.
- NCA** $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (mit $x + y + z = 1$); Material für die positive Elektrode in einer Lithium-Ionen-Batterie.
- NDE** negativer Differenzeffekt.
- NGS** Natural gas storage, Erdgasspeicher.
- NiCd** Nickel-Cadmium(-Akkumulator), eine gängige Sekundärbatterie.
- NiMH** Nickel-Metallhydrid(-Akkumulator), eine gängige Sekundärbatterie.
- NMC** $\text{LiMn}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$; Material für die positive Elektrode in einer Lithium-Ionen-Batterie.
- NMD** Natürliches Mangandioxid.
- Nominal capacity** Synonym für „rated capacity“.
- OCP** Open-circuit electrode potential, Ruhepotential; das gegen eine Bezugs elektrode ohne Stromfluß gemessene Potential. Manchmal stimmt es mit dem mit der Nernst-Gleichung und verknüpften thermodynamischen Informationen berechneten Potential überein. Die Differenz der Ruhepotentiale der beiden Elektroden einer Zelle wird als Ruhe- oder Leerlaufspannung (OCV) bezeichnet.
- OCR** Open-circuit relaxation; elektrochemische Experimente, bei denen die Änderung der Zellspannung oder von Elektrodenpotentialen ohne Stromfluß (d. h. bei offenem Stromkreis) als Funktion der Zeit aufgezeichnet wird.
- OCV** Open cell (or circuit) voltage, Leerlaufspannung; Spannung an den Anschlüssen eines elektrochemischen Wandlers ohne Belastung. Stimmt mitunter mit der theoretischen Zellspannung, die mit der Nernst-Gleichung und weiteren thermodynamischen Informationen berechnet werden kann, überein.
- OER** Oxygen evolution reaction; Sauerstoffentwicklungsreaktion an der positiven Elektrode einer sauerstoffverzehrenden Brennstoff- oder Metall-Luft-Zelle.
- Open-circuit voltage** Siehe OCV.
- Opportunity charging** Teilweise Nachladung eines momentan nicht benutzten Akkumulators mit verfügbar werdender elektrischer Überschußenergie.
- ORR** Oxygen reduction reaction; Sauerstoffreduktionsreaktion an der positiven Elektrode (Kathode) einer luft- oder sauerstoffverzehrenden Brennstoff- oder Metall-Luft-Zelle.

Overpotential Überpotential¹⁾; die Differenz η zwischen dem Ruhepotential bei Strom null (also beim thermodynamischen Gleichgewicht) E_0 und dem Potential E bei Stromfluß:

$$\eta = E - E_0$$

Overvoltage Überspannung, die Differenz η zwischen der Zellspannung beim Strom Null (also beim thermodynamischen Gleichgewicht) U_0 und der Zellspannung U unter Stromfluß:

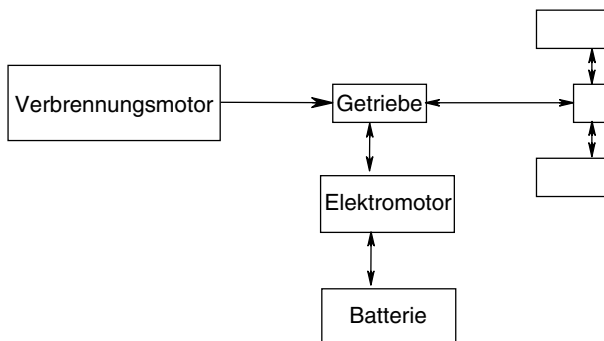
$$\eta = U - U_0$$

p.A. Pro analysi, analysenrein; Reinheitsgrad einer Substanz.

PAAK Potassium polyacrylat, Kaliumpolyacrylat.

PANI Polyanilin.

Parallelhybrid Betriebsweise eines Hybridfahrzeugs, in der sowohl ICE als auch batteriegespeicherter Elektromotor das Fahrzeug antreiben. Ein vergleichsweise großer Verbrennungsmotor wird eingesetzt, der Elektromotor dient vor allem zur Unterstützung.



PCS Power conversion system, Wandlersystem.

Peak-to-average power ratio Das Verhältnis von aus einem ESS angeforderter Spitzen- zur Durchschnittsleistung: $P_{\text{spitze}}/P_{\text{durchschn.}}$.

PEFC Polymer electrolyte membrane fuel cell, Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle.

PEM Polymer electrolyte membrane (fuel cell), Polymerelektrolytmembran (-Brennstoffzelle).

PEMFC Siehe PEFC; auch Protonenaustauschermembran-Brennstoffzelle.

PEO Poly(ethylenoxid).

PHS Pumped hydro storage, Pumpspeicher(kraftwerk).

Picogrid Kombination einer Wohnung/eines Hauses mit einem elektrischen Energiewandler (Solar, Wind) und einem Speichersystem mit einer Leistung von 0–10 kW, das Spitzenlastausgleich und zeitverschobene Energieentnahme ermöglicht.

1) Der Begriff hat sich in der deutschen Sprache nicht durchgesetzt.

PITT Potentiostatic intermittent titration technique.

Plug-in hybrid Fahrzeug mit Verbrennungs- und Elektromotor, das zudem über die Möglichkeit der Batterieladung aus externer Quelle verfügt. Diese Option legt eine größere Speicherbatterie als bei einem einfachen Hybridfahrzeug nahe.

Polarisation Verschiebung des Elektrodenpotentials vom Gleichgewichtswert zu einem anderen Wert unter Stromfluß.

Potentiostatic Prozeß bei konstantem Elektrodenpotential (oft bei elektrochemischen Untersuchungen) oder konstanter Spannung (z. B. bei der Batterieladung, bei der exzessive Spannungen vermieden werden sollen).

Power density Leistungsdichte; die Leistungsfähigkeit (Stromabgabefähigkeit) eines Systems bezogen auf eine Zelle. Bezogen auf das Gewicht spricht man von gravimetrischer Leistungsdichte $W\ kg^{-1}$, bezogen auf das Volumen von der volumetrischen Leistungsdichte $W\ l^{-1}$. Mitunter vereinfacht (und ungenau) als Synonym für volumetrische Leistungsdichte benutzt.

PP peak power, siehe Spitzenleistung.

PPy Polypyrrol.

PQ Power quality (management); bestmögliche Konstanzhaltung wesentlicher elektrischer Kenngrößen wie Spannung und Frequenz. Es schließt die Kompensation plötzlicher Schwankungen von Angebot und Nachfrage ein (z. B. wenn große Abnehmer gleichzeitig angeschaltet werden und einen Abfall von Spannung und Frequenz ohne PQ verursachen würden).

PS Peak shaving; Spitzenausgleich des Bedarfes an elektrischer Energie aus Speichern statt aus zusätzlicher Kraftwerkskapazität. Der Speicher wird in Zeiten geringeren Bedarfs wieder gefüllt.

PTh Polythiophen.

Ragone-Darstellung Darstellung der Energiedichte über der Leistungsdichte eines elektrochemischen Wandlers (als Beispiel s. Abb. 4.10).

RAM Rechargeable alkali-manganese accumulator, wiederaufladbare Alkali-Mangan-Zelle.

Range extender Reichweitenverlängerer: kleiner Verbrennungsmotor in einem elektrisch betriebenen Fahrzeug zur Ladung des Bordakkumulators während der Fahrt. Da der Verbrennungsmotor am optimalen Arbeitspunkt betrieben werden kann, sind sein hoher Wirkungsgrad und lange Lebensdauer möglich.

RAPS Remote area power supply, Energieversorgung netzferner Gebiete. Im einfachsten Fall wird eine Quelle elektrischer Energie (z. B. ein Windrad oder ein Solarpanel) mit dem elektrischen Energie benötigenden Verbraucher verbunden. Ein Akkumulator wird unter Zwischenschaltung der nötigen Elektronik zur Lade-/Entladekontrolle eingebunden und während Zeiten des Überschusses elektrischer Energie aufgeladen; im umgekehrten Fall dreht sich der Vorgang um. Die Leistung der Energiequellen wird entsprechend dem durchschnittlichen Verbrauch ausgelegt; die Größe der Batterie bemißt sich nach der erwarteten Dauer verminderter oder ausfallender Energieerzeugung. Dies kann bei besonders langen Zeiten ausfallenden Energieangebotes zu exzessiv großen Batterien führen; in diesem Fall ist eine weitere Energiequelle wie ein Dieselgenerator in Betracht zu ziehen. Diese Gesamtkombination wird als RAPS bezeichnet.

Rated capacity Die in einer Batterie nach Herstellerangaben gespeicherte Ladung, der zugehörige Entladestrom wird dazu angegeben. Das Symbol ist C oder C_r .

rds rate determining step, geschwindigkeitsbestimmender Schritt.

Regeneratives Bremsen Während der Abbremsung eines Fahrzeugs wird seine kinetische Energie in elektrische Energie z. B. durch Nutzung des Motors als Generator gewandelt und gespeichert.

ReHAB Rechargeable aqueous hybrid battery, wiederaufladbare wässrige Hybrid-batterie.

Reichweitenverlängerer Kleiner Verbrennungsmotor in einem elektrisch betriebenen Fahrzeug zur Ladung des Bordakkumulators während der Fahrt. Da der Verbrennungsmotor am optimalen Arbeitspunkt betrieben wird, kann er hohen Wirkungsgrad und lange Lebensdauer erreichen.

RES Renewable energy source, erneuerbare Energiequellen.

RESS Rechargeable energy storage system, wiederaufladbares Energiesystem. Der Begriff beschreibt eine Kombination von Akkumulator, Superkondensatoren und peripheren elektronischen Schaltungen.

Reversibles Potential Synonym für Ruhepotential beim Strom null; der Begriff sollte nicht benutzt werden.

Reversible Spannung Synonym für Ruhespannung beim Strom null; der Begriff sollte nicht benutzt werden.

RFB Redox flow battery, Redox(fluß)batterie.

RFCS Reversible or regenerative fuel cell system, reversible oder regenerative Brennstoffzelle.

RHE Relative hydrogen electrode, relative Wasserstoffelektrode.

Ruhepotential Das gegen eine Bezugs elektrode ohne Stromfluß gemessene Potential. Manchmal stimmt es mit dem mit der Nernst-Gleichung und verknüpften thermodynamischen Informationen berechneten Potential überein. Die Differenz der Ruhepotentiale der beiden Elektroden einer Zelle wird als Ruhe- oder Leerlaufspannung (OCV) bezeichnet.

SAE Society of Automotive Engineers.

SC Superkondensator.

SEI Solid electrolyte interphase, Festelektrolytzwischenschicht. An der Phasengrenze zwischen einem hochreaktiven Elektrodenmaterial (z. B. Lithium in nichtwässrigen Lithiumbatterien oder lithiuminterkalierte Graphitelektrode in einer Lithium-Ionen-Batterie) und einer Elektrolytlösung finden beim Kontakt chemische Reaktionen, vor allem Reduktionen, statt, die zur Bildung unlöslicher Reaktionsprodukte führen, die fest auf der Elektrode haften. Die so gebildete neue Phase wird SEI genannt; sie begrenzt die Selbstentladung des Systems und ist daher von grundlegender Bedeutung.

Selbstentladung Die Umwandlung in einer Batterie gespeicherter Energie ohne äußeren Stromfluß. Dies ist u. a. auf Korrosionsreaktionen in der Zelle und auf homogene Reaktionen zwischen Zellkomponenten zurückzuführen, bei denen aktive Massen verbraucht werden.