

HANSER



Leseprobe

ZU

„Werkstoffe in der Elektrotechnik“ Grundlagen - Struktur - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung - Technologie

von Hansgeorg Hofmann und Jürgen Spindler

ISBN (Buch): 978-3-446-45853-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-45863-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45853-6>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort des Herausgebers

Was können Sie mit diesem Buch lernen?

Wenn Sie dieses Lernbuch durcharbeiten, dann erwerben Sie umfassende Kenntnisse über Werkstoffe, die Sie bei der Entwicklung von Projekten und für die Lösung produktionstechnischer Aufgaben benötigen.

Der Umfang dessen, was wir Ihnen anbieten, orientiert sich an:

- den Studienplänen der Hochschulen und Fachhochschulen für Technik,
- den Lehrplänen der Fachschulen für Technik in den Bundesländern.

Jeder Problemkreis wird in praxisgerechter, dem Stand der Technik entsprechender Form aufgearbeitet.

Das heißt, Sie können dabei stets folgenden Fragen nachgehen:

- Welches werkstofftechnologische Problem stellt sich dar?
- Welche Struktur und Eigenschaften der Werkstoffe liegen vor?
- Wo liegen die Lösungsmöglichkeiten und Grenzen?
- Welche Prüfverfahren sind einzusetzen?

Wer kann mit diesem Buch lernen?

Jeder, der

- sich weiterbilden möchte,
- elementare Kenntnisse in der Mathematik und den Naturwissenschaften besitzt,
- grundlegende Kenntnisse in der Elektrotechnik erworben hat.

Das können sein:

- Studierende an Hochschulen und Fachhochschulen in Bachelor- und Masterstudiengängen,
- Studierende an Berufsakademien und Ingenieure,
- Schüler an Fachschulen für Technik und Techniker,
- Schüler an beruflichen Gymnasien, Berufsoberschulen und Berufsfachschulen,
- Facharbeiter, Gesellen und Meister während und nach der Berufsausbildung,
- Umschüler und Rehabilitanden,
- Teilnehmer an Fort- und Weiterbildungskursen,
- Autodidakten

vor allem im Bereich der Elektrotechnik.

Wie können Sie mit diesem Buch lernen?

Ganz gleich, ob Sie mit diesem Buch in Schule, Betrieb, Lehrgang oder zu Hause im „stillen Kämmerlein“ arbeiten, es wird Ihnen endlich Freude machen.

Warum?

Ganz einfach, weil Ihnen hierzu in der technischen Literatur ein Buch vorgelegt wird, das bei der Gestaltung die Gesetze des menschlichen Lernens zur Grundlage macht. Deshalb werden Sie am Anfang jedes Kapitels über die **Kompetenzen** zuerst mit dem bekannt gemacht, was Sie am Ende gelernt haben sollen.

– Ein Lernbuch also –

Danach beginnen Sie, sich mit den **Lerninhalten** auseinander zu setzen. Schrittweise dargestellt, ausführlich beschrieben in der linken Spalte des Buches und umgesetzt in die technisch-wissenschaftliche Darstellung auf der rechten Spalte des Buches. Die eindeutige Zuordnung des behandelten Stoffes in beiden Spalten macht das Lernen leichter, umblättern ist nicht mehr nötig. Zur Vertiefung stellen Ihnen die Autoren **Beispiele** vor.

– Ein unterrichtsbegleitendes Lehrbuch. –

Jetzt können und sollten Sie sofort die **Übungsaufgaben** durcharbeiten, um das Gelernte zu festigen. Den wesentlichen **Lösungsgang** und das **Ergebnis** der Übungen haben die Autoren **am Ende des Buches** für Sie aufgeschrieben.

– Also, auch ein Arbeitsbuch mit Lösungen. –

Sie wollen sicher sein, dass Sie richtig und vollständig gelernt haben. Deshalb bieten Ihnen die Autoren am Ende jedes Kapitels **anwendungsorientierte Aufgaben als Selbstkontrolle** an. Ob Sie richtig geantwortet haben, sagen Ihnen die Lösungen zur Lernerfolgskontrolle am Ende des Buches.

– Eine Selbstkontrolle mit Lösungen. –

Trotz intensiven Lernens über Beispiele, Übungen und Selbstkontrollen verliert sich ein Teil des Wissens und Könnens wieder, wenn Sie nicht bereit sind, am Anfang oft und dann in immer längeren Zeiträumen zu wiederholen!

Das wollen Ihnen die Autoren erleichtern.

Sie haben die jeweils rechten Spalten des Buches so geschrieben, dass die wesentlichen Lerninhalte als Satz, stichwortartig, als Formel oder als Skizze zusammengefasst sind. Sie brauchen deshalb beim **Wiederholen und Festigen meistens nur die Zusammenfassungen nach den Unterkapiteln** zu lesen.

– Schließlich noch Repetitorium! –

Diese Arbeit ist notwendigerweise mit dem **Aufsuchen** der entsprechenden **Kapitel** oder dem Suchen von bestimmten **Begriffen** verbunden. Dafür verwenden Sie bitte das Inhaltsverzeichnis am Anfang und das Sachwortverzeichnis am Ende des Buches.

– Selbstverständlich mit Inhaltsverzeichnis und Sachwortverzeichnis. –

Sicherlich werden Sie durch die intensive Arbeit mit dem Buch **Ihre Bemerkungen zur Sache** unterbringen wollen, um es so zum individuellen Arbeitsmittel zu machen, das Sie auch später gerne benutzen. Deshalb haben wir für Ihre Notizen auf den Seiten Platz gelassen.

– Am Ende ist „Ihr“ Buch entstanden. –

Möglich wurde dieses Lernbuch für Sie durch die Bereitschaft der Autoren und die intensive Unterstützung durch den Verlag und seine Mitarbeiter. Beiden sollten wir herzlich danken.

Nun darf ich Ihnen viel Freude und Erfolg beim Lernen wünschen!

Der Herausgeber
Manfred Mettke

Vorwort

Mit der nun vorliegenden 8. Auflage der „Werkstoffe in der Elektrotechnik“ verfolgen die Autoren weiterhin das Ziel der Aktualisierung. Es sind Ergänzungen und Änderungen gegenüber der 7. Auflage notwendig geworden. Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit einer Erweiterung der Darstellung eingesetzter neuer Werkstoffe, wie z. B. flüssigkristalliner Ferroelektrika. Unter Beibehaltung des Umfangs ergibt sich daraus zwangsläufig das Erfordernis, Kapitel zu Grundlagenkenntnissen aus Chemie und Physik zu komprimieren. Die für das Verständnis der Eigenschaften von Werkstoffen der Elektrotechnik unbedingt notwendigen Kenntnisse zu Atombau und Bindungszuständen behandeln die Lehrbücher der allgemein bildenden Schulen in hervorragender Weise. Die Autoren beschränken sich deshalb auf eine übersichtliche Zusammenfassung dieser Komplexe in Form von Begriffen, Tabellen und Definitionen.

Die didaktische Grundstruktur eines Lernbuches bleibt auch weiterhin erhalten. Im Aufbau der einzelnen Kapitel vermittelt der Gliederungspunkt Überblick eine Einführung in den zu behandelnden Stoff, die Formulierung der Kompetenzen am Beginn jedes Abschnittes gibt den Studierenden notwendige Hinweise für die Erarbeitung des Fachinhaltes. Durch die Zusammenfassungen besteht die Möglichkeit, den jeweils erreichten Wissensstand zu prüfen. Definitionen, Merksätze, Formeln u. ä. sind mit einer Schattierung unterlegt und damit hervorgehoben.

Die vorgenommenen Kürzungen und Streichungen seit der 7. Auflage zeigen sich besonders deutlich im Kapitel 2 „Das mechanische Verhalten von Werkstoffen“. Hier wurde der Teil „Ausgewählte Verfahren zur Bestimmung nichtelektrischer Werkstoffeigenschaften“ herausgenommen. Es werden nur diejenigen Prüfverfahren für mechanische und thermische Kenngrößen behandelt, die im Zusammenhang mit den nachfolgenden Kapiteln stehen. Die Darstellung der Leitungsmechanismen im Kapitel „Elektrisches Verhalten von Werkstoffen“ erfolgt nach gleichen Prinzipien.

Aus den Beurteilungen der Prüfaxemplare zur 7. Auflage konnten wir wiederum wertvolle Anregungen zur Aktualisierung der Normenangaben sowie eine Vereinheitlichung von Begriffen und Schreibweisen entnehmen.

Für die Hinweise der aufmerksamen und kritischen Leser sei herzlich gedankt. Trotz vielfältiger anderer Möglichkeiten, Informationen zu Werkstoffeigenschaften zu erhalten, bestätigen die positiven Einschätzungen zu unserem Buch die Richtigkeit der gewählten Methode der Stoffdarstellung in gedruckter Form für den angesprochenen Leserkreis.

Mittweida, im Sommer 2018

*Hansgeorg Hofmann
Jürgen Spindler*

Dank der Autoren

Es ist uns ein Bedürfnis an erster Stelle dem Herausgeber, Herrn Dipl.-Gewerbelehrer Manfred Mettke für seine freundliche Begleitung und wertvolle fachliche Beratung herzlich zu danken.

Wir bedanken uns bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im HANSER-Verlag, insbesondere Frau Wulst und Herrn Leppert, für die Unterstützung zur Herausgabe der achten Auflage.

Mittweida, im Sommer 2018

*Hansgeorg Hofmann
Jürgen Spindler*

Inhalt

Verwendete Formelzeichen (Fz) mit Einheiten (E) und Abkürzungen	13
1 Grundlagen	
1.0 Überblick	19
1.1 Atombau und Bindungen	21
1.1.1 Elektronenverteilung im Einzelatom	21
1.1.2 Bindungszustände	24
1.1.2.1 Atombindung	24
1.1.2.2 Ionenbindung	29
1.1.2.3 Metallbindung	31
1.2 Bildung von Ordnungszuständen in festen metallischen und nichtmetallischen anorganischen Werkstoffen	34
1.2.1 Ideale Kristallstruktur	36
1.2.2 Gittertypen	37
1.2.3 MILLERSche Indizierung zur Angabe der Lage von Gitterebenen	42
1.2.4 Reale Kristallstruktur	43
1.3 Bildung von Ordnungszuständen in flüssigkristallinen Werkstoffen	48
1.3.1 Nematische Phasen	49
1.3.2 Cholesterische Phasen	51
1.3.3 Smektische Phasen	52
1.3.4 Kolumnare Phasen	53
1.3.5 Ausblick	53
1.4 Bildung von Phasen, Phasengleichgewichtsdiagramme	55
1.4.1 Phasenübergang flüssig-fest und fest-flüssig; Schmelzen und Erstarren	55
1.4.2 Zustandsdiagramme von metallischen Zweistoffsystemen	59
1.4.2.1 Legierungen mit vollständiger Löslichkeit der Komponenten im flüssigen Zustand und Unlöslichkeit im festen Zustand (V-Diagramm)	62
1.4.2.2 Legierung mit vollständiger Löslichkeit der Komponenten im flüssigen und völliger Löslichkeit im festen Zustand (Linsendiagramm)	64
1.4.2.3 Legierungen mit vollständiger Löslichkeit der Komponenten im flüssigen und teilweiser Löslichkeit im festen Zustand (Mischungslücke)	66
Selbstkontrolle zu Kapitel 1	69
2 Das mechanische Verhalten von Werkstoffen	
2.0 Überblick	71
2.1 Ausgewählte mechanische und thermische Kenngrößen	72
2.1.1 Mechanische Werkstoffkenngrößen	72
2.1.1.1 Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 für Metalle	72
2.1.1.2 Zugversuch für Kunststoffe nach DIN EN ISO 527-1	75
2.1.1.3 Härteprüfung	77
2.1.1.4 Schlagfestigkeit	78
2.1.2 Thermische Werkstoffkenngrößen	79
2.2 Das Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe	82
2.2.1 Elastische und plastische Verformung	82
2.2.2 Kristallerholung und Rekristallisation	85

2.3	Das Verformungsverhalten nichtmetallischer Werkstoffe	90
2.3.1	Das Verformungsverhalten polymerer organischer Werkstoffe	90
2.3.2	Das Verformungsverhalten nichtmetallischer anorganischer Werkstoffe	93
	Selbstkontrolle zu Kapitel 2	97
3	Das elektrische Verhalten von Werkstoffen	
3.0	Überblick	99
3.1	Ursachen der elektrischen Leitfähigkeit im Festkörper	99
3.2	Leitungsmechanismen	102
3.2.1	Leiter	102
3.2.2	Nichtleiter	105
3.2.3	Halbleiter	105
3.2.4	Supraleiter	107
	Selbstkontrolle zu Kapitel 3	110
4	Elektrochemisches Verhalten metallischer Werkstoffe	
4.0	Überblick	111
4.1	Redox-Reaktionen und das elektrochemische Potenzial	111
4.2	Galvanische Zellen	116
4.2.1	Zellen mit Metall-Anoden (Minuspole)	119
4.2.2	Zelle mit Li ⁺ -Ionen als Elektroden	121
4.3	Brennstoffzellen	125
4.4	Die Elektrolyse	128
4.5	Die elektrochemische Korrosion	130
	Selbstkontrolle zu Kapitel 4	134
5	Leiterwerkstoffe	
5.0	Überblick	136
5.1	Der spezifische elektrische Widerstand	136
5.2	Werkstoffe für kompakte Leiter	144
5.3	Werkstoffe für Leitschichten und Schichtkombinationen	155
	Selbstkontrolle zu Kapitel 5	162
6	Widerstandswerkstoffe	
6.0	Überblick	163
6.1	Werkstoffe für kompakte Widerstände	163
6.1.1	Präzisions- und Messwiderstände	164
6.1.2	Heizwiderstände (DIN 17470)	165
6.1.3	Werkstoffe für Dehnungsmessstreifen	166
6.2	Werkstoffe für Widerstandsschichten	168
	Selbstkontrolle zu Kapitel 6	172
7	Kontaktwerkstoffe	
7.0	Überblick	174
7.1	Der bewegte Kontakt	174
7.1.1	Physikalische und chemische Vorgänge am Kontakt	175
7.1.2	Werkstoffe für bewegte Kontakte	178
7.2	Der feste Kontakt	182
	Selbstkontrolle zu Kapitel 7	189

8 Halbleiterwerkstoffe	
8.0 Überblick	190
8.1 Werkstoffe für Sperrschicht gesteuerte Halbleiterbauelemente	191
8.1.1 Leitungsmechanismen, die n- und p-Leitung	193
8.1.2 Die spezifische elektrische Leitfähigkeit von Halbleiterwerkstoffen	196
8.1.3 Vorgänge am p-n-Übergang	198
8.1.4 Vorgänge in der p-n-p- bzw. n-p-n-Grenzschicht	206
8.1.5 Vorgänge im Feldeffekttransistor (FET)	208
8.2 Werkstoffe für Volumenhalbleiterbauelemente	210
8.2.1 Werkstoffe für Fotowiderstände	211
8.2.2 Werkstoffe für HALL-Sonden	212
8.2.3 Werkstoffe für Thermistoren und Varistoren	213
Selbstkontrolle zu Kapitel 8	216
9 Isolierstoffe und dielektrische Werkstoffe	
9.0 Überblick	218
9.1 Elektrische Kenngrößen	220
9.1.1 Spezifischer Durchgangswiderstand (Innenwiderstand)	220
9.1.2 Oberflächenwiderstand	221
9.1.3 Kriechstromfestigkeit	222
9.1.4 Durchschlagfestigkeit	222
9.2 Dielektrisches Verhalten	225
9.2.1 Polarisierung und Polarisationsmechanismen	225
9.2.2 Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl)	228
9.2.3 Dielektrischer Verlustfaktor	230
9.2.4 Temperatur- und Frequenzabhängigkeit	231
9.3 Isolierstoffe	233
9.3.1 Isolierstoffe für Kabel und Leitungen	234
9.3.2 Isolierstoffe für elektronische Baugruppen und Bauelemente	235
9.4 Dielektrika für Kondensatoren	244
9.5 Dielektrika für Sensoren und Aktuatoren	249
Selbstkontrolle zu Kapitel 9	255
10 Supraleitende Werkstoffe	
10.0 Überblick	257
10.1 Werkstoffentwicklung und Anwendungsmöglichkeiten	257
Selbstkontrolle zu Kapitel 10	263
11 Magnetwerkstoffe	
11.0 Überblick	264
11.1 Das magnetische Verhalten von Werkstoffen	264
11.1.1 Magnetische Größen	264
11.1.2 Ursachen des Magnetismus	266
11.2 Ferromagnetische Werkstoffe	272
11.2.1 Hartmagnetische Ferromagnetika	276
11.2.2 Weichmagnetische Ferromagnetika	281
11.3 Ferrimagnetische Werkstoffe	288
11.4 Magnetwerkstoffe für Speicher	292
Selbstkontrolle zu Kapitel 11	299

12 Lichtwellenleiter	
12.0 Überblick	301
12.1 Physikalische Grundlagen	301
12.2 Werkstoffe und Technologie	306
Selbstkontrolle zu Kapitel 12	311
13 Fertigungsverfahren in der Elektrotechnik und Elektronik	
13.0 Überblick	312
13.1 Verfahren der Si-Technologie	312
13.1.1 Einkristallines Silizium	312
13.1.2 Planartechnik	315
13.2 Metallisierung von Dielektrika	316
13.3 Leiterplattentechnik	321
13.3.1 Allgemeines	321
13.3.2 Technologische Varianten zur Leiterplattenherstellung	323
Selbstkontrolle zu Kapitel 13	331
Lösungsteil	
Lösungen der Übungen	332
Lösungen zur Selbstkontrolle	362
Verwendete und weiterführende Literatur	364
Bildnachweis	369
Sachwortverzeichnis	370

4.2 Galvanische Zellen

Kompetenzen

Durch Trennung von zwei Elektroden unterschiedlichen Potentials in einer Zelle (Diaphragma, Stromschlüssel) kann kein direkter Elektronenaustausch erfolgen. Fließen die Elektronen über einen äußeren Stromkreis, kann elektrische Energie genutzt werden. Man unterscheidet Primär- und Sekundärelemente. Im Primärelement ist der bei der Stromnutzung ablaufende chemische Vorgang ohne Zerstörung der Zelle nicht wieder umkehrbar. Sekundärelemente lassen sich durch Umkehrung der Stromrichtung wieder in den Ausgangszustand zurückführen, wobei durch Nebenreaktionen die Anzahl der Lade- und Entladezyklen begrenzt ist.

Elektrodenmaterialien, Elektrolyte und konstruktive Gestaltung führen zu einer Vielzahl von Batterien, die ganz unterschiedliche Anforderungen erfüllen können. Zwei große Gruppen von galvanischen Zellen hinsichtlich des Anodenmaterials haben sich durchgesetzt: Batterien mit Metallanoden und Batterien mit Lithium-Ionen, eingelagert in einem Wirtsmaterial (Interkalationselektrode).

Redox-Reaktionen zwischen Metallen und Metallionen kann man bei geeigneter Versuchsanordnung in durch ein Diaphragma (Separator) getrennten Bereichen ablaufen lassen. Dabei tauchen die Elektroden in einen Elektrolyten ein. Es wird dadurch möglich, den bei spontan ablaufenden Redox-Reaktionen erfolgenden Elektronenaustausch in Form des elektrischen Stromes zu nutzen. In einem galvanischen Element wird das erreicht, indem Oxidations- und Reduktionsmittel in getrennten „Räumen“ untergebracht sind (siehe Bild 4.2-1). Elektronen können dann nur über einen äußeren Weg, den elektrischen Stromkreis, fließen. Das Primärelement liefert nur solange Strom, wie der zugrunde liegende Redox-Prozess abläuft. Ist z. B. beim LECLANCHÉ-Element das Zink in Lösung gegangen, kann keine elektrische Energie mehr entnommen werden. Man müsste, um das Primärelement zu regenerieren, die Endprodukte des Redox-Prozesses entfernen, die verbrauchten Elektroden ersetzen und frischen Elektrolyten einbringen. Bei galvanischen Elementen, in denen die potenzialbestimmenden Reaktionen reversibel sind, besteht die Möglichkeit, sie durch den elektrischen Strom durch Umkehrung der Stromrichtung in den ursprünglichen Zustand zurückzuführen. Diese Art von Spannungsquellen heißen Sekundärelemente, auch als Akkumulatoren bezeichnet. Hierbei ist der Redox-Vorgang in der gewählten Zelle ohne deren Schädigung umkehrbar.

Beim Versuch der Wiederaufladung einer Primärzelle kann eine Schädigung eintreten durch:

Zelle: kleinste elektrochemische Einheit einer Spannungsquelle, ohne gebrauchsfertiges Gehäuse

Batterie: durch Kontakte miteinander verbundene Zellen in gebrauchsfertigen Gehäusen; aber auch die konfektionierte Einzelzelle

Primärzelle: Nichtwiederaufladbare Batterie (Einwegbatterie)

Sekundärzelle: Wiederaufladbare Batterie (Akkumulator)

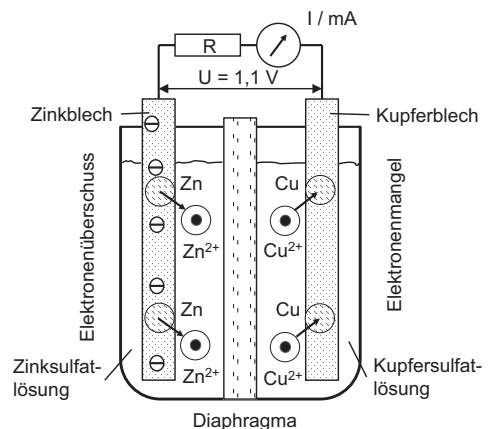


Bild 4.2-1 Galvanische Zelle als Spannungsquelle

1. Das verwendete Anodenmaterial (z. B. Zink) geht in Lösung und dabei geht die Geometrie der Elektrode verloren. Darüber hinaus besteht die Gefahr eines Kurzschlusses durch Dendritenbildung.
2. Nebenreaktionen durch Gasbildung (H_2 , O_2). In der Folge des entstehenden Überdruckes kann es zur Zellöffnung kommen und Elektrolyt austreten.
3. Bei der Reduktion während des Ladevorganges bildet sich nicht wieder das duktile Metall in der ursprünglichen Form zurück.

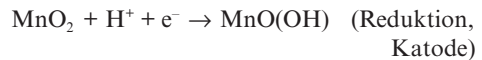
Viele der heute eingesetzten galvanischen Zellen beruhen auf dem bereits 1866 von LECLANCHÉ entwickelten Prinzip der Oxidation von Zink, der negativen Elektrode und der Reduktion von Braunstein, der positiven Elektrode in einem sauren Elektrolyten.

In ihrer technischen Ausführung weisen die Batterien entsprechend des Verwendungszweckes vielfältige Unterschiede (siehe Tabelle 4.2-1) hinsichtlich konstruktiver Merkmale und stofflicher Vielfalt der Elektrodenmaterialien und der Elektrolyte auf. Dadurch erreicht man eine Anpassung an unterschiedliche Forderungen

Minuspol:



Pluspol (Graphit):



Folgereaktion:

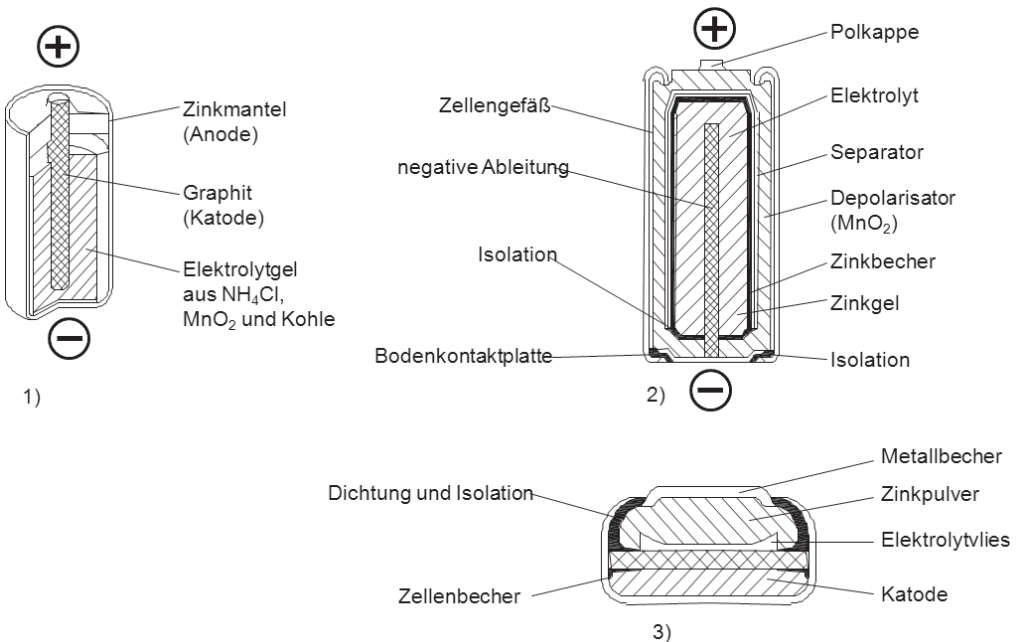
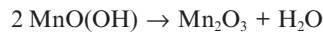


Bild 4.2-2 Aufbau handelsüblicher Batterien

1) Zink-Kohle-Zelle; 2) Alkaline-Zelle; 3) Knopfzelle

Tabelle 4.2-1 Übersicht zu handelsüblichen elektrochemischen Spannungsquellen

Bezeichnung	U [V]	Energiedichte [Wh/kg]	Besondere Merkmale	Anwendungen
<i>Primärbatterien</i>				
Zink-Kohle (Zn/C) LECLANCHÉ-Element	1,5	40–70	Für weniger anspruchsvolle Anwendungen	Taschenlampen, Spielzeuge, Fernbedienungen
Alkali-Mangan (Al/Mn) = Alkaline	1,5	90–100	Wird hoher Stromanforderung und Dauernutzung gerecht	Tragbare Audiogeräte, Fotoapparate, Spiele
Zink-Luft (Zn-Luft)	1,4	300	Hohe Belastbarkeit	Hörgeräte, Personrufgeräte
Lithium (Li)	3,0	250–300	Hohe Belastbarkeit, niedrige Selbstentladung	Fotoapparate mit hohem Strombedarf, elektronische Datenspeicher
Silberoxid (AgO)	1,55	120–190	Hohe bis mittlere Belastbarkeit	Uhren, Fotoapparate, Taschenrechner
<i>Sekundärbatterien (Akkus)</i>				
Blei-Akku	2,0	40	Bis 2000 Lade-/Entladezyklen, Gelelektrolyt, wieder aufladbar	Starterbatterie, Notstromversorgung
Nickel-Cadmium (NiCd)	1,2	20	Sehr hohe Belastbarkeit, wieder aufladbar	Schnurlose Telefone, elektrische Zahnbürsten, Akkuwerkzeuge, Notbeleuchtungen
Nickel-Metallhydrid (NiMH)	1,2	60	Hohe Belastbarkeit, wieder aufladbar	Handys, schnurlose Telefone, Camcorder, Rasierer
Lithium-Ionen (Li-Ion), Lithium-Polymer (LiPo)	3,7	130	Hohe Belastbarkeit, hohe Energiedichte, wieder aufladbar	Handys, Camcorder, Notebooks, Organizer

der Praxis, wie Lebensdauer, Größe, Energiedichte, Entladungscharakteristik, Auslauf-sicherheit (leak proof), Entsorgbarkeit, Recyclbarkeit u. a. Die auf dem Prinzip von LECLANCHÉ beruhenden Zellen, früher als Trockenzellen bezeichnet, werden in vielfältigen Ausführungsformen hergestellt (siehe Bild 4.2-2).

4.2.1 Zellen mit Metall-Anoden (Minuspol)

Eine Variante zur Zink-Braunstein-Zelle mit saurem Elektrolyten ist die alkalische Zink-Braunstein-Zelle (Alkaline). Wegen der im Vergleich zur „sauen“ Zelle besseren Energiedichte, bei höherer Dauerbelastung, ist die Alkaline-Zelle für einige elektromotorische Geräte, z. B. Kameras, trotz ihres relativ hohen Preises besonders geeignet. Außerdem kann sie in begrenztem Umfang als Sekundärzelle, in Form der RAM-Zellen (Rechargeable Alkaline-Manganese), verwendet werden.

Die Zink-Silberoxid-Zelle besteht aus einer Paste aus Zinkpulver (Anode) und einer Ag_2O -Paste als Katode. Der Elektrolyt ist Kaliumhydroxidlösung. Die Zelle ist wegen ihrer hohen Energiedichte die derzeit am meisten verwendete Miniaturzelle für elektronische Uhren, Taschenrechner und weitere elektronische Geräte. Ihre Ruhespannung von 1,8 V sinkt bei Belastung auf 1,5 V und bleibt mit diesem Wert lange Zeit konstant. Dieser Vorzug erklärt die umfangreiche Anwendung der Zelle, trotz ihres hohen Preises.

In der Zink-Luft-Zelle (siehe Bild 4.2-3) ist Zink in Form von Zinkpulver wieder die Anode. Der Luftsauerstoff reagiert unter Aufnahme der Elektronen in Gegenwart von Luftfeuchtigkeit an der katalytischen Katode zu OH^- -Ionen. Da die Katode sehr dünn ist, steht für das Anodenmaterial ein großes Volumen zur Verfügung, wodurch diese Zellen, im Vergleich mit anderen elektrochemischen Spannungsquellen die höchste Energiedichte erreichen. Ein typisches Einsatzgebiet sind Batterien für Hörgeräte. Im nicht aktivierten Zustand (versiegelte Luftöffnung) sind Zink-Luft-Batterien nahezu unbegrenzt lagerfähig. Bis zum Gebrauch sind sie deshalb luftdicht verschlossen zu halten. Nach ihrer Aktivierung ist die Zelle in maximal 500 h entladen.

Ein nach wie vor wichtiges Sekundärelement ist der Bleiakкумулятор z. B. in Form der Starterbatterie im Auto. Der schematische Aufbau ist im Bild 4.2-4 und ein handelsüblicher Akku im Bild 4.2-5 dargestellt. Die Elektroden des Bleiakkus bestehen aus einer Anzahl von Bleigitterplatten, die mit schwammartigem Blei beschichtet sind, den Anodenplatten, oder mit Blei-(IV)-

Tabelle 4.2-2 Energiedichten von Primärelementen

Typ	Energiedichte in $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$
LECLANCHÉ-Zelle	40–70
Alkaline-Zelle	90–100
Zink-Silberoxid-Zelle	120–190
Lithium-Zelle	250–300

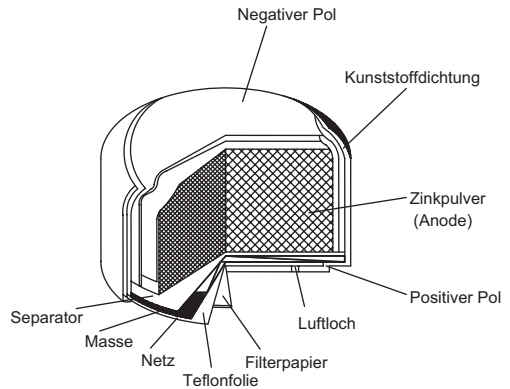


Bild 4.2-3 Zink-Luft-Zelle

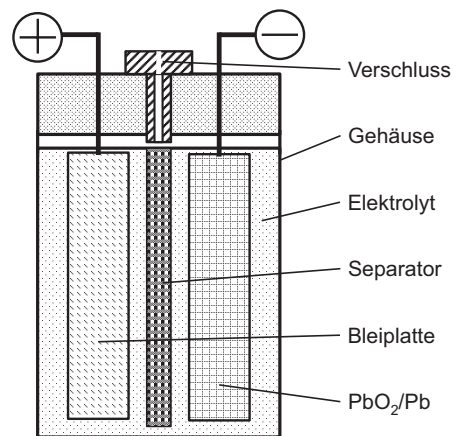


Bild 4.2-4 Aufbau einer Bleiakкумуляtorzelle (schematische Darstellung)

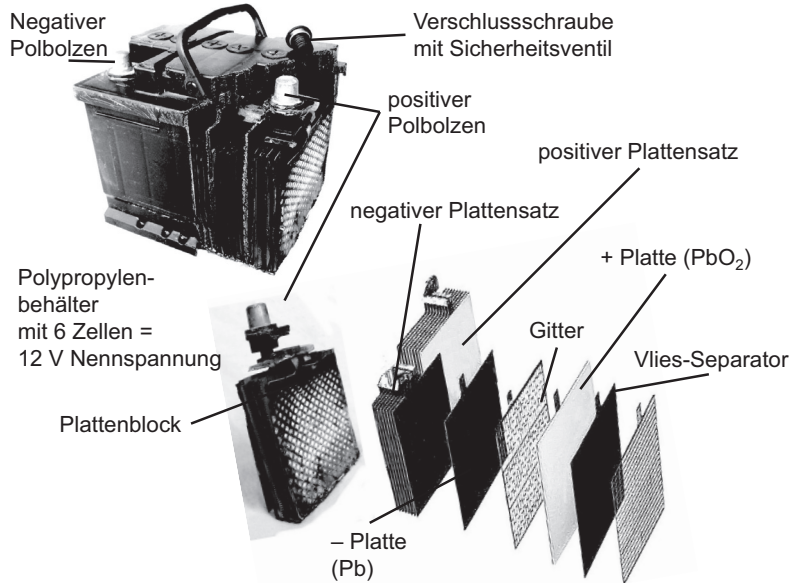
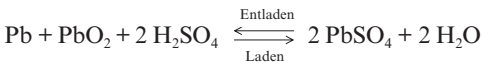


Bild 4.2-5 Schnitt durch einen handelsüblichen Bleiakku und Explosivdarstellung

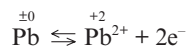
oxid PbO₂, den Katodenplatten. Als Elektrolyt dient Schwefelsäure mit der Dichte zwischen 1,18 bis 1,28 g · cm⁻³, entspricht ca. 30 %iger Schwefelsäure. Bei der Stromentnahme verläuft eine Redox-Reaktion zwischen Pb und PbO₂, dabei entsteht PbSO₄. Beim Laden verlaufen die umgekehrten Vorgänge.

Die Gesamtreaktion, die auch die Veränderung der Dichte beim Lade-/Entladezyklus erklärt, lautet:

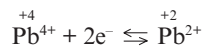


Der Zahlenwert der Säuredichte soll nicht unter 1,1 g/cm³ sinken. Im unbelasteten Zustand des Akkumulators verlaufen die Elektrodenreaktionen des Entladevorganges mit geringen Reaktionsgeschwindigkeiten. Dabei entsteht feinkristallines und elektrisch nicht leitendes Bleisulfat, das beim Ladevorgang nicht wieder in Pb und PbO₂ rückführbar ist. Diese Erscheinung heißt Sulfatierung. Sie führt zur Verringerung der Ladekapazität (analog zur Energiedichte). Entladene Akkumulatoren sollten sofort wieder geladen werden. Der Wirkungsgrad des Bleiakkumulators beträgt 75 bis 85%, die Energiedichte erreicht Werte zwischen 30 und 40 Wh · kg⁻¹. Die Ruhespannung der einzelnen

negativer Pol (Anode):



positiver Pol (Katode):



Zelle beträgt rund 2 V, die Ladeschlussspannung 2,7 V. Je nach Typ lassen sich 2000 Lade-/Entladezyklen erreichen.

Moderne Bleiakkumulatoren sind „wartungsfrei“. Sie haben einen Gel-Elektrolyten, sodass eine Kontrolle des Elektrolytstandes entfallen kann und der Akku unabhängig von der Lage betrieben werden kann.

Man unterscheidet zwischen:

geschlossenen und *verschlossenen* Bleiakkumulatoren. Beim geschlossenen Akkumulator handelt es sich um den bereits dargestellten klassischen Typ. Nachteile, wie Gasentwicklung (O_2 und H_2) und Verbrauch von Elektrolyt (H_2O ist nachzufüllen!) führten zur Entwicklung des verschlossenen Akkumulators. Er ist charakterisiert durch:

- Der Elektrolyt ist fixiert, entweder in einem Vlies oder als Gel.
- Der an der positiven Elektrode entstehende Sauerstoff gelangt durch die im fixierten Elektrolyten vorhandenen Kanäle zur negativen Elektrode, wo er wieder durch Reduktion der OH^- -Ionen zu Wasser umgesetzt wird.

Darüber hinaus werden als Akkumulatoren mit Nickel als Katode, Kaliumhydroxidlösungen unterschiedlicher Konzentrationen als Elektrolyt und unedleren Metallen als Anode eingesetzt.

Das sind:

- Nickel-Eisen-Akkumulatoren
- Nickel-Cadmium-Akkumulatoren und
- Nickel-Zink-Akkumulatoren.

Einen Vergleich dieser Akkus zum Bleiakku gibt Tabelle 4.2-3.

Tabelle 4.2-3 Vergleich des Bleiakkumulators mit anderen Akkumulatortypen

Typ	Vorteile	Nachteile
Ni-Fe	stabilere Lade-/Entladezyklen, höhere Lebensdauer, geringere Masse	Energiedichte: 15–22 Wh · kg ⁻¹ Wirkungsgrad der Ladereaktion: 50 % Selbstentladung unter H_2 -Bildung (gasdichte Ausführung nicht möglich)
Ni-Cd	gasdichte Ausführung möglich	Energiedichte: 20 Wh · kg ⁻¹ , teurer RoHS* beachten!
Ni-Zn	3–4-fache Energiedichte	geringere Lebensdauer

* RoHS (*engl.*): Restriction of (the use of certain) hazardous substances

4.2.2 Zelle mit Li^+ -Ionen als Elektroden

Bei der Weiterentwicklung elektrochemischer Zellen hat sich das Metall Lithium als negative Elektrode (Anode) als sehr günstig erwiesen. Das Alkalimetall Lithium mit einem Standardpotenzial von $-3,05$ V reagiert leicht mit Wasser. Deshalb kommen in derartigen Zellen nur wasserfreie Elektrolyte zur Anwendung, die aus organischen und anorganischen Lösungsmitteln unter Zusatz geeigneter Salze, wie $LiBF_4$ (Lithiumtetrafluoroborat), bestehen. Da hier

keine wässrigen Elektrolyte zur Anwendung kommen, spricht man von protonenfreien Elektrolyten (keine H^+ -Ionen). Daraus ergibt sich für den Einsatz ein Temperaturbereich von -55 bis $+85$ °C und eine Lagerzeit bis zu 10 Jahren, bei einem Kapazitätsverlust von ca. 1% pro Jahr.

Praktische Bedeutung besitzen die **Lithium-Mangandioxid-Zellen**, wobei das MnO_2 die Katode bildet. Einsatzgebiete sind die Fototechnik, Messtechnik und Telekommunikation.

Eine ungewöhnliche Form bildet die sehr dünne **Lithium-Papier-Zelle**, deren Dicke bei 0,5 mm liegt und sich besonders zur Stromversorgung von Smartcards eignet. Das sind aktive Karten mit batteriebetriebenen Mikrochip sowie integriertem Display.

Lithium-Ionen-Zellen sind Akkumulatoren, die im Gegensatz zu den bisher beschriebenen auf einem anderen chemischen Prinzip der Energiespeicherung beruhen. In diesen Zellen liegen Lithium-Ionen im Elektrodenmaterial eingelagert vor (Interkalations-Elektroden), was für Anode und Katode gleichermaßen gilt. Die Lithium-Ionen-Batterien unterscheiden sich völlig von den o. g. Li- MnO_2 -Batterien. Es liegt hier ein neuer Typ galvanischer Elemente vor; die Ionen des protonenfreien Elektrolyten sind nicht am Redox-Prozess beteiligt.

Die Interkalations-Elektroden vermitteln den Übergang der Lithium-Ionen (Li^+) zu Lithiumatomen (Li) und umgekehrt. Sie bestehen einerseits aus Verbindungen wie $LiMnO_2$ oder $LiCoO_2$ und andererseits aus Li_xnC (Graphit-elektrode mit eingelagerten Li-Atomen). In beiden Fällen sind sowohl Graphit als auch CoO_2 und MnO_2 Träger der Li-Atome, sie bilden das sogenannte Wirtsmaterial.

Einfach formuliert treten an der einen Elektrode Li-Atome als Li^+ -Ionen in den Elektrolyten über und werden an der Gegenelektrode zu Li-Atomen reduziert und in das Wirtsgitter eingelagert. Dieser Vorgang ist umkehrbar, aus dem Pendeln der Li-Atome, über die im Elektrolyten wandernden Li^+ -Ionen, von einer Elektrode zur anderen leitet sich der Begriff „Swingzelle“ ab.

Zwischen den Elektroden werden über den äußeren Stromkreis Elektronen ausgetauscht. Den Ladungsausgleich durch den Elektrolyten

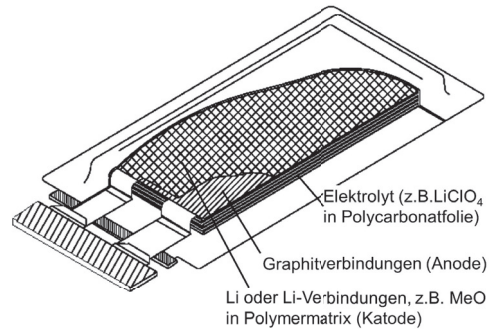
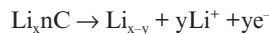


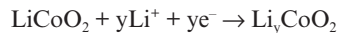
Bild 4.2-6 Prinzipieller Aufbau eines Lithium-Polymerakkumulators

Beim Entladen einer Lithium-Ionen-Batterie laufen folgende Vorgänge ab:

negative Elektrode:



positive Elektrode:



bewirken die Lithium-Ionen. Demnach besteht eine Lithium-Ionen-Zelle aus dem Aktivmaterial LiCoO_2 bzw. LiMnO_2 als positive Elektrode, dem Aktivmaterial Graphit als negative Elektrode (siehe Bild 4.2-7).

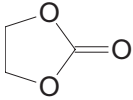
Daraus ergibt sich folgende Halbzellenanordnung:



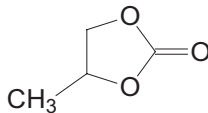
/Li⁺ im organischen Lösungsmittel

Graphit mit Li-Atomen

Als organische Lösungsmittel finden Anwendung Ethylen- oder Propylencarbonat.



Ethylencarbonat



Propylencarbonat

Eine Weiterentwicklung des Lithium-Ionenakkumulators stellt der Lithium-Polymerakku (LiPo) dar. Als Anode dient entweder Lithiumfolie oder Li-Graphit, z. B. Li_xnC . Der Separator besteht aus einem Elektrolyten (z. B. LiClO_4) in einer Polymermatrix (z. B. Polycarbonat). Die Katode wird gebildet durch Metalloxid in einer Polymermatrix (siehe Bild 4.2-6). Die Vorteile von festen Polymermatrizen sind die deutlich höhere Sicherheit gegenüber herkömmlichen Akkumulatoren sowie die geringe Dicke einer Zelle von ca. 100 μm . Somit lässt sich in einem kleinen Volumen eine hohe Leistung verwirklichen. Lithium-Polymerakkus zeigen nur sehr geringe Neigung zur Selbstentladung, keinen Memory-Effekt und erwärmen sich beim Entladen nur sehr wenig. Deshalb können LiPo-Akkupacks mehrere Stunden vor Gebrauch geladen und unmittelbar nach dem Gebrauch sofort wieder geladen werden (siehe Bild 4.2-8).

Der Einsatz von Gerätebatterien, ob in Form eines Primärelementes oder Akkumulators, nimmt weltweit deutlich zu. Immer neue elektronische Geräte, die unabhängig von der „Steckdose“ betrieben werden können, kommen auf den Markt. Daraus resultiert das Erfordernis, die Leistung und Sicherheit elektrochemischer Spannungsquellen zu verbessern. Ein Weg dazu ist die Verwendung neuer Werkstoffe, z. B. verbesserter Ionenleiter vom Typ der Defekt-Perowskite (siehe 9.2.1).

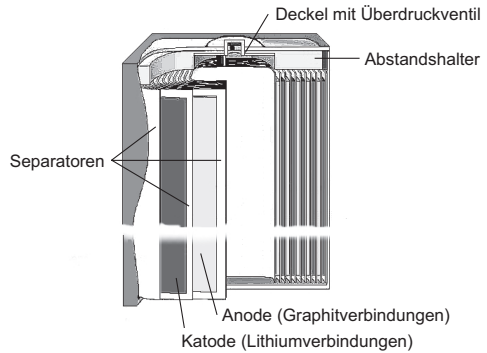


Bild 4.2-7 Schnitt durch einen Lithiumionenakkumulator (Elektroden gewickelt, durch Separatoren getrennt)

Die stark vereinfachten nebenstehenden Strukturformeln in ausführlicher Schreibweise:

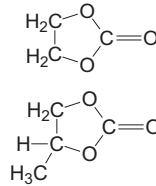


Bild 4.2-8 Lithiumionenbatterie für Elektroautos (Bosch-Samsung)

Foto: Auto-Medienportal.Net/Bosch

Batterien liefern Strom durch ablaufende chemische Reaktionen. Dabei werden zur Speicherung der elektrischen Energie Stoffe verwendet, die zum Teil umweltrelevant sind. Somit ergibt sich ein weiterer Aspekt bei der Batterientwicklung. Der Zweck der Herstellung und Verwendung von Batterien besteht in der Nutzung elektrischer Energie, die bei chemischen Reaktionen frei wird.

Übung 4.2-1

Skizzieren Sie ein galvanisches Element, das aus einer Nickel- und einer Zink-Elektrode besteht. Der Zinkstab taucht in eine Zinksulfatlösung ein, der Nickelstab in eine Nickelsulfatlösung.

1. Bezeichnen Sie jeweils Anode und Katode und formulieren Sie den Anoden- und Kationenvorgang.
2. Bestimmen Sie die Bewegungsrichtung von Elektronen und Ionen beim Entladungsvorgang.
3. Berechnen Sie die Zellspannung unter Standardbedingungen.

Übung 4.2-2

Erklären Sie den Unterschied von Primär- und Sekundärelementen!

Übung 4.2-3

Welche Vorteile bringt der Einsatz wasserfreier Elektrolyte in galvanischen Zellen?

Übung 4.2-4

Stellen Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines LECLANCHÉ-Elementes und einer Zink-Luft-Zelle dar und formulieren Sie die Gleichungen für den jeweiligen Anoden- und Kationenprozess!

Übung 4.2-5

Charakterisieren Sie die unterschiedlichen Lithium-Zellen hinsichtlich ihrer Anwendung!

Übung 4.2-6

Welche Werkstoffe kommen in der Gruppe der Lithiumbatterien zum Einsatz; unterscheiden Sie dabei Primär- und Sekundärbatterien!

Übung 4.2-7

Warum kann man den Ladezustand eines geschlossenen Bleiakkumulators mit wässrigem Elektrolyten überprüfen, in dem man die Dichte der Batterieflüssigkeit misst?

Übung 4.2-8

Welche Pole der Stromquelle und des Blei-Akkus müssen beim Laden miteinander verbunden werden? Vorzeichen und Elektrodenbezeichnungen sind anzugeben!

Übung 4.2-9

Welche Elektrode des Blei-Akkus wird beim Laden reduziert?

Zusammenfassung: Galvanische Zellen

- Anodenmetalle für Batterien sind Zink, Mangan, Lithium, Blei und Nickel.
- Lithium-Ionen Batterien bilden einen völlig neuen Typ galvanischer Elemente. Sie enthalten einen protonenfreien Elektrolyten und die Interkalationselektroden.
- Im Lithium-Polymer-Akku bildet eine Lithiumfolie die Anode, der Elektrolyt besteht aus in eine Polymermatrix eingelagertem LiClO_4 und einer Katode aus Metalloxid, das in eine Polymermatrix eingelagert ist. Dieser Aufbau gestattet Zellendicken von ca. 0,1 mm bei hoher Leistungsdichte.
- Elektrochemische Spannungsquellen ermöglichen den Betrieb elektrischer Geräte unabhängig von einem Netzanschluss. Hieraus resultiert das Erfordernis, Leistungsdichte und Betriebssicherheit zu erhöhen.
- Aus der Anwendung umweltbedenklicher Werkstoffe in Batterien ergeben sich besondere Regeln für Umgang und Rückgewinnung.

4.3 Brennstoffzellen

Kompetenzen

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die wasserstoffreiche Gase, wie den Wasserstoff selbst, Ammoniak, Methanol und Kohlenwasserstoffe, z. B. Methan, mit (Luft)sauerstoff in einer elektrochemischen Reaktion umsetzen und nicht verbrennen. Die in diesem Prozess freigesetzte Reaktionsenergie wird direkt in Form elektrischer Energie nutzbar. Die Brennstoffzelle ähnelt deshalb in ihrer Funktion einer Batterie, weil ein chemischer Prozess zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt wird. Ein wesentlicher Unterschied zum galvanischen Element besteht aber darin, dass bei kontinuierlicher Versorgung mit dem Brenngas ein dauerhafter Betrieb möglich ist.

Es gibt heute sechs verschiedene Typen von Zellen. Sie unterscheiden sich durch den verwendeten Elektrolyten. Die ablaufenden energieliefernden Prozesse sind unabhängig vom Zelltyp durch folgende Reaktionen bestimmt:

Die Bruttoumsetzung in der Brennstoffzelle folgt der Knallgasreaktion:



Diese Reaktion (1) teilt sich in der Brennstoffzelle auf in eine Anoden- und Katodenreaktion:



Eine genauere Betrachtung des Verlaufes der Umsetzung der Sauerstoffionen mit den Wasserstoffionen führen zu den Gleichungen (5) und (6).

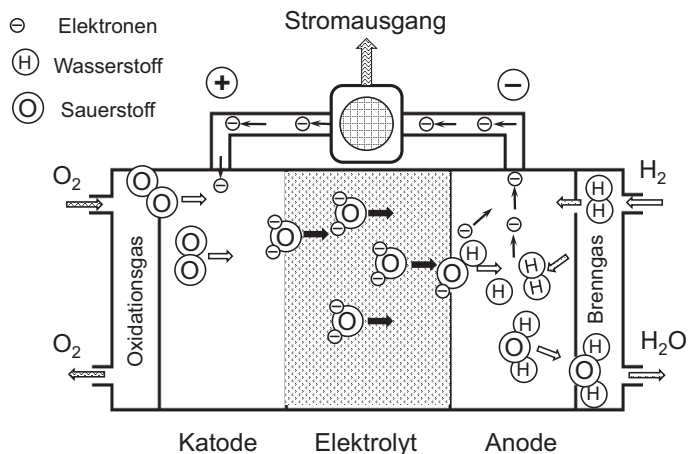


Bild 4.3-1 Wirkprinzip einer Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle

Folgereaktionen:



Gleichungen (5) und (6) zusammengefasst ergeben wieder die Gleichung (4), allerdings unter Berücksichtigung der Beteiligung von OH^- -Ionen.

Brennstoffzellen bestehen aus Katode und Anode, die entweder durch einen Elektrolyten oder eine Membran getrennt sind. Die Umsetzung von Wasserstoff im Anodenraum mit Sauerstoff im Katodenraum zu Wasser liefert den nutzbaren Strom über den äußeren Stromkreis. Auf diese Weise entsteht auf direktem Weg elektrische Energie, ohne CO_2 -Emission, wie das bei der Verstromung fossiler Energieträger ansonsten immer auftritt.

Tabelle 4.3-1 Typen von Brennstoffzellen

Zelltyp	Elektrolyt	Anodengas	Katodengas	Betriebs-temperatur
AFC (Alkaline Fuel Cell)	Kalilauge (KOH)	Wasserstoff	Sauerstoff	ca. 100 °C
PEMFC (Proton Exchange Membran Fuel Cell)	protonenleitender Polymerelektrolyt	Wasserstoff, Wasserstoff aus Methanol	Sauerstoff, Luftsauerstoff	bis 100 °C
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	Polymerelektrolyt	Methanol	Luftsauerstoff	90–120 °C
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Phosphorsäure	Wasserstoff, Wasserstoff aus Methan	Luftsauerstoff	200 °C
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	Alkalicarbonat-schmelze	Wasserstoff, Methan, Kohlegas	Luftsauerstoff	650 °C
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Keramischer Festelektrolyt	Wasserstoff, Methan, Kohlegas	Luftsauerstoff	800–1000 °C

Die einzelnen Typen von Brennstoffzellen unterscheiden sich hinsichtlich der Elektroden und der Elektrolyte. Die Brenngase sind bevorzugt Wasserstoff und das Oxidationsgas Luftsauerstoff (siehe Tabelle 4.3-1).

Als klassische Brennstoffzelle kann man die im Apollo-Programm der NASA in den 1960-er Jahren entwickelte Wasserstoff-Sauerstoff-Zelle bezeichnen. Als Elektrolyt kam 75%ige KOH zum Einsatz bei 200 bis 230 °C unter Verwendung einer edelmetallaktivierten Doppelschicht-

elektrode aus Sinternickel. Die Weiterentwicklung dieses Zellentyps führte zur AFC-Brennstoffzelle (Alkaline Fuel Cell). Sie besitzt mit bis zu 85% den höchsten Wirkungsgrad von Brennstoffzellen. Ein Nachteil besteht in der CO_2 -Unverträglichkeit durch die Bildung von K_2CO_3 mit dem Elektrolyten, was den Einsatz von reinem Sauerstoff erfordert.

Einen anderen Lösungsweg bietet die PEM-Zelle (Proton Exchange Membrane). Eine protonenleitende Teflonmembran, beidseitig mit Platin und einer gasdurchlässigen Elektrode aus Graphitpapier beschichtet, bildet die PEM. Zwei Bipolarplatten aus Graphit sind die äußere Begrenzung. Sie tragen eingefräste Kanäle, die entweder Wasserstoff oder Sauerstoff durchströmt. In einer Anwendung der PEM-Zelle für einen Automobilantrieb stapelt man z. B. 150 Einzelzellen zu einem Stack mit einer Leistung von etwa 25 kW.

Quelle für das Brenn- oder Anodengas ist Wasserstoff aus der Elektrolyse, aus einem Reformingprozess von Methan oder Methanol und der Aufbereitung von Synthesegas (Kohlegas). Die Tabelle 4.3-1 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten Daten zu Brennstoffzellen.

Übung 4.3-1

Erläutern Sie das Wirkprinzip einer Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle!

Übung 4.3-2

Warum muss bei der Nutzung der AFC-Brennstoffzelle reiner Sauerstoff eingesetzt werden?

Übung 4.3-3

Welche Bedeutung besitzen Brennstoffzellen hinsichtlich ökologischer Aspekte?

Übung 4.3-4

Welche energetische Aussage enthält die Gleichung (1)?

Übung 4.3-5

Erläutern Sie die Abkürzung PEM!

Zusammenfassung: Brennstoffzellen

- Brennstoffzellen sind Energiewandler von chemischer direkt in elektrische Energie.
- Die Umsetzung von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser ist die Energiequelle.
- Katoden- und Anodenraum sind in einer PEM durch eine protonendurchlässige Membran mit Elektrolyten getrennt.
- Die unterschiedlichen Zelltypen unterscheiden sich im Wesentlichen in der Art des Elektrolyten und der Herkunft des Wasserstoffs.
- Brennstoffzellen haben einen modularen Aufbau und lassen sich deshalb in einem weiten Größenbereich herstellen. Sie bilden eine Alternative zu herkömmlichen Stromquellen ohne Freisetzung von CO_2 .
- Entscheidende Voraussetzung für die Umweltverträglichkeit der Anwendung von Brennstoffzellen ist die Gewinnung von Wasserstoff unter Verzicht auf fossile Energieträger.

11.4 Magnetwerkstoffe für Speicher

Kompetenzen

Neben vielen Möglichkeiten der Informationsspeicherung wird die Bedeutung der ferro- und ferri-magnetischen Werkstoffe dafür erkannt. Die Nutzung von Ferriten, wie Fe_2O_3 und CrO_2 lässt sich anhand der Hysteresekurven verstehen.

Die Kenntnis der physikalischen Vorgänge beim „Schreiben“ und „Lesen“ im magnetischen Speichermedium bilden die Voraussetzung für das Verständnis der Wirkungsweise der unterschiedlichen Speicherarten.

Mit der Entwicklung und Anwendung der Nanotechnik und Nutzung von Quanteneffekten (GMR) ergeben sich neue Möglichkeiten zur Erhöhung der Speicherdichte, deren Bedeutung erkannt wird.

Ein Speichermedium dient zur Sicherung und Bereitstellung von Informationen bzw. Daten, ist aber gleichzeitig auch Synonym für Datenträger. Datenträger oder Speichermedien sind technische Mittel zur Datenspeicherung. In der Unterhaltungselektronik (Audio, Video usw.) lassen sich die entsprechen Daten mit Hilfe elektronischer Geräte abspielen bzw. auch speichern. Computer (PC) bzw. Computeranlagen gestatten das Lesen und Schreiben von Daten jeglicher Art (Unterhaltung, Bankdaten, Erhebungen, Archivalien usw.), die von internen oder peripheren Speichern verwaltet werden.

Dafür nutzt man viele unterschiedliche Effekte, wie optische und mechanische sowie Supralei-

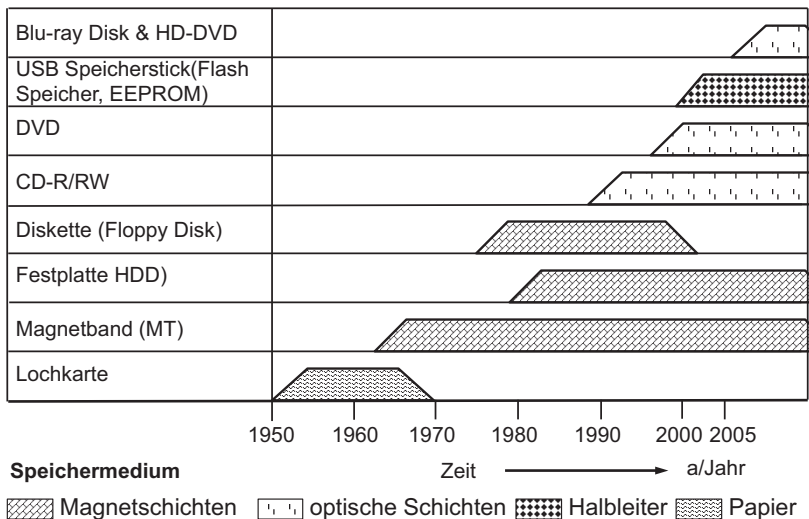


Bild 11.4-1 Entwicklung der Speichermedien (Auswahl)

tung, Halbleitung, Ferroelektrizität und Magnetismus (siehe Bild 11.4-1). Allen gemeinsam ist der Zyklus der Informationsspeicherung:

Einschreiben, Speichern und Lesen.

Die Vor- und Nachteile eines Speichers resultieren aus drei Hauptmerkmalen des Speichervorganges:

- Speicherkapazität, als maximale Informationsmenge in bit
- Zugriffszeit, als Zeitdifferenz zwischen Aufrufbefehl und Erscheinen der Information
- Zykluszeit, als Zeitdifferenz zwischen zwei Auslesevorgängen.

Vom heutigen Erkenntnisstand aus stellt der einzelne Baustein des Festkörpers (Atom oder Ion) die Grenze an möglichen Speicherelementen dar. In einem Mol eines Stoffes befinden sich $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen (siehe Kapitel 1).

Im Durchschnitt befinden sich damit in 1 cm^3 Stoff 10^{22} Teilchen, d. h. $10^{22} \text{ bit} \cdot \text{cm}^{-3}$, praktisch nutzbar sind heute $10^{14} \text{ bit} \cdot \text{cm}^{-3}$ (siehe GMR-Effekt). Die Zugriffszeit auf das Elektron in Form des Leitungselektrons liegt bei 10^{-10} s , nutzt man das Spinnmoment (Magnetismus), liegt sie bei 10^{-9} s .

Im Weiteren steht die Nutzung magnetischer Effekte zur Informationsspeicherung im Vordergrund.

Bei den Magnetspeichern hat man in Form der Weisschen Bezirke oder bei den ferrimagnetischen Schichten die Ferritkristalle als kleinste Speicherzellen. Ein äußeres Magnetfeld verändert ihre Orientierung. Bei der Perpendicular-Aufzeichnung stehen die magnetischen Momente, die jeweils ein logisches Bit reprä-

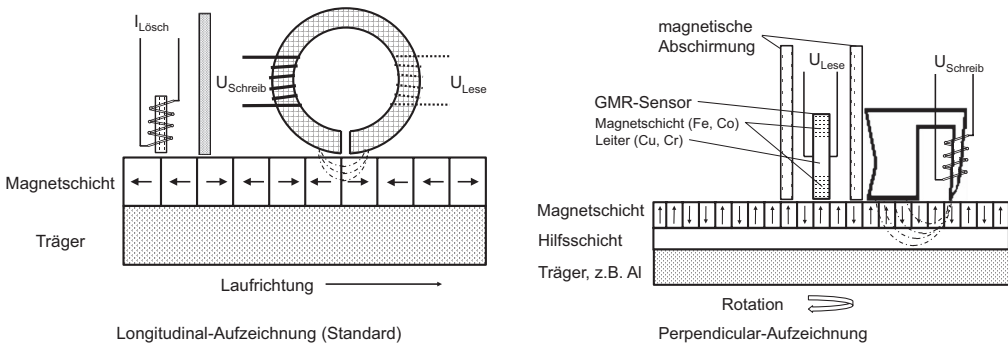


Bild 11.4-2 Prinzip der magnetischen Datenspeicherung

sentieren, nicht parallel zur Oberfläche des Datenträgers, wie bei der Longitudinal-Aufzeichnung, sondern senkrecht dazu, gewissermaßen gehen die Daten in die Tiefe. Dies führt zu einer potenziell wesentlich höheren Datendichte (etwa drei mal so dicht); bei gleicher Oberfläche lassen sich also mehr Daten aufzeichnen (siehe Bild 11.4-2).

Beim Einschreiben der Information baut der Schreib-/Lesekopf das entsprechende Feld auf und bewirkt eine bleibende Umorientierung der magnetischen Speicherzellen in der magnetisierbaren Schicht (siehe Bild 11.4-2). Der Lesevorgang verläuft umgekehrt. Durch bewusstes Anlegen starker magnetischer Wechselfelder beim Löschvorgang (Löschkopf) gehen die Oxid-Kristalle aus der Remanenz in einen Zustand der Partikel ohne Wirkung einer magnetischen Vorzugsrichtung nach außen über.

Die Bedeutung der Magnetspeicher liegt u. a. darin, dass in löschbaren Massenspeichern mit hoher Speicherdichte der unmittelbare Zugriff auf große Datenmengen möglich ist. Bisher wurde dieser Bedarf durch Festplattenspeicher, Floppy-Disk-Laufwerke und Magnetbandgeräte gedeckt. In Konkurrenz zu diesen Systemen sind die löschbaren magneto-optischen Speicher getreten. Die Weiterentwicklung moderner Magnetspeicher zielt auf eine Vergrößerung der Aufzeichnungsdichte, eine Verkürzung der Zugriffszeit und Erhöhung der Datenrate, bei unverändert hoher Datensicherheit. Eine Übersicht zur Nutzung des Magnetismus zur Datenspeicherung enthält Tabelle 11.4-1.

Tabelle 11.4-1 Möglichkeiten der magnetischen Datenspeicherung

Medium	Kompaktmagnet	Magnetschichten		
		nicht rotierend		rotierend
Information	magneto-elektronisch	digital	analog	digital
Ausführungsformen	Kernspeicher	Magnetband Magnetkarte Magnetstreifen Compact Cassette (Datasette) Magnetblasenspeicher	Tonband (Musikkassette) Videoband (Videokassette)	Trommelspeicher Festplatte (hard disk) Diskette (floppy disk) Wechselplatte, z. B. Zip-Diskette (von iomega)

Magnetbandspeicher

Beim Magnetband-Speicherverfahren wird auf ein flexibles Band mit magnetisierbarer Schicht beim Vorbeilaufen an einem Schreib-/Lesekopf die Information eingeschrieben. Beim Lesevorgang kann man die gespeicherten Daten wieder entnehmen. Sehr hohe Bedeutung für den Speichervorgang haben die Magnetbandparameter und die Eigenschaften der Magnetschicht. Die Magnetbandparameter werden durch die Art des Trägermaterials und durch die magnetischen Speicherparameter der Magnetschicht bestimmt. Den prinzipiellen Aufbau eines Magnetbandspeichers zeigt Bild 11.4-3.

Als Träger für die Magnetschicht dient eine 8 bis 15 μm dicke, zugfeste PET-Folie (Terylen®, Mylar®), vordem kam Folie aus Zelluloseacetat zur Anwendung. Die Magnetschicht besteht aus Eisenoxid- ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) oder Chromdioxid- (CrO_2)-Partikeln von ca. 1 μm Korngröße. Die Oxidschicht bilden nadelförmige Kristalle mit einem Längen-Dickenverhältnis von etwa 10 : 1, was sich günstig auf die Koerzitivfeldstärke auswirkt.

Ein entscheidender Vorteil der Anwendung von CrO_2 liegt in der bedeutend höheren Koerzitivfeldstärke gegenüber $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (siehe Bild 11.4-4). Bei früher verwendeten Magnetbändern erfolgte die Fixierung der Magnetschicht mithilfe von Bindemitteln. Moderne Verfahren nutzen PVD-Techniken zur Abscheidung dünnerer Schichten mit verbesserter Haftung.

Mithilfe von Magnetbändern (MT, magnetic tape) in Bandlaufwerken als Speichermedium erfolgt die Aufzeichnung (Speichern), Wiedergabe (Lesen) und das Löschen von Informationen von Digitaldaten von analogen Signalen und von Audio- und Videosignalen, in Überwachungs- und Sicherungsanlagen und für die Datensicherung.

Oberflächenrauigkeit, Größe der Magnetpartikel, Magnetspurbreite und die Größen der Magnetisierbarkeit, wie Koerzitivfeldstärke und Remanenzinduktion der Magnetschicht, bestimmen im Wesentlichen die Qualität und Zeitbeständigkeit der Magnetbandaufzeichnung.

Seit etwa 1950 kommt das Magnetband als Speichermedium zur Anwendung. Insbesondere für den Einsatz als Massenspeicher im PC wurde es durch die Festplatte verdrängt. An-

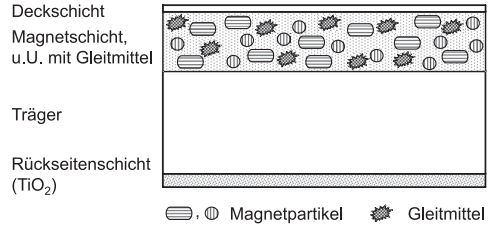


Bild 11.4-3 Prinzipieller Aufbau eines Magnetbandspeichers

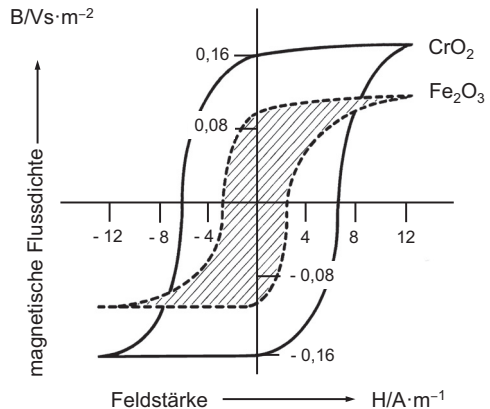


Bild 11.4-4 Hysteresekurven von Werkstoffen für Magnetspeicherschichten

strengungen zur Erhöhung der Speicherdichte führten dazu, dass sich Magnetbänder auch heute noch für Datensicherung und Archivierung eignen.

Diskettenspeicher

Bei diesem Folienspeicher rotiert eine flexible Folie, die mit einer magnetisierbaren Schicht aus CrO_2 versehen ist. Sie befindet sich in einer Hülle und wird mit dieser in das Speichergerät eingeschoben. Speicherkapazitäten liegen hierbei im Bereich von $> 10^6$ bis einige 10^8 bit, bei Zugriffszeiten im Sekundenbereich. Leistungsfähigere Speichermedien führten zur ihrer Verdrängung.

Plattenspeicher

Festplattenlaufwerke (*engl.*: hard disk, HD) sind magnetische Speichermedien der Computertechnik. Bei diesen Plattenspeichern ist das Trägermaterial eine rotierende Aluminiumscheibe, die mit einer hartmagnetischen Schicht aus Fe_2O_3 , bevorzugt CrO_2 versehen ist. Das Übereinanderstapeln mehrerer Platten ermöglicht zusammen mit im Gerät installierten Schreib-/Leseköpfen hohe Speicherkapazitäten ($> 10^9$ bit) bei Zugriffszeiten im Millisekundenbereich. Durch die zunehmende Miniaturisierung sind Plattenspeicher auch für mobile Kleinstanwendungen interessant.

Der Entwicklungstrend der Werkstoffe für Magnetschichten geht zu immer höheren Aufzeichnungsdichten durch Anwendung dünner Metallfilme. Man bewegt sich also auf diesem Gebiet weg vom Ferrit. Typische Beispiele dafür sind CoNi-, CoNiCr-, CoP-, CoPt- und CoCr-Legierungen. Die CoCr-Legierungen sind u. a. deshalb interessant, weil neben der herkömmlichen horizontalen Aufzeichnung (longitudinal recording) die Vertikal aufzeichnung (perpendicular [vertical] recording) möglich ist. Mit aufgedampftem oder aufgesputtertem CoCr kann man kristallorientierte Schichten erzeugen.

Magnetooptische Platte

Im Gegensatz zu CD-ROM wird die Information magnetisch gespeichert, aber sowohl das Einschreiben als auch das Lesen erfolgen thermisch durch Anwendung des Laserstrahles. Werkstoffe für solche Schichten sind GdFeCo



Bild 11.4-5 Festplattenlaufwerk

und TbFeCo, die sich durch eine hohe Koerzitivfeldstärke bei Raumtemperatur und eine geringe bei erhöhter Temperatur auszeichnen.

Das Einschreiben beruht auf lokaler Erwärmung in Nähe der CURIE-Temperatur mithilfe eines Lasers. Dieser räumlich sehr kleine Bereich erfährt durch das Anlegen eines Magnetfeldes eine Orientierung, die beim Abkühlen einfriert.

Das Auslesen erfolgt optisch (KERR-Effekt). Der magnetooptische KERR-Effekt nutzt die Drehung der Polarisations Ebene von Licht aus, das an der magnetischen Plattenoberfläche reflektiert wird.

Magnetische Nanostrukturen

Ziel einer Entwicklung ist es, kleinste räumlich voneinander getrennte magnetische „Nanoteilchen“ herzustellen, die innerhalb einer nichtmagnetischen Matrix integriert sind und von denen jedes eine einzelne Informationseinheit 1 Dot = 1 bit darstellt, siehe Bild 11.4-6.

Die magnetische Nanostruktur aus aufgedampften Co/Pt-Schichten entsteht mithilfe einer fotolithografischen Maske.

Der Vorteil besteht in einer wesentlichen Erhöhung der Aufzeichnungsdichte. Die Dots sollen eindomänig mit rechteckiger Hysteresesein sein. Ihr Durchmesser beträgt ca. 70 nm und sie sind in einem Abstand von ca. 130 nm in der Matrix angeordnet.

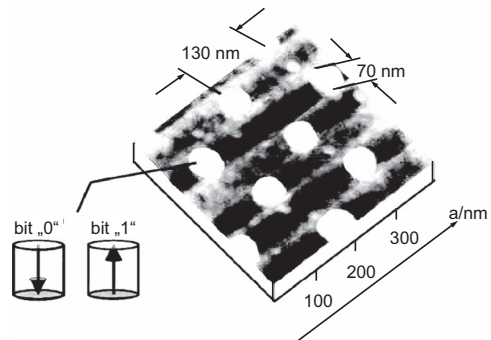


Bild 11.4-6 Magnetische „Nano-Speicher“

GMR-Effekt*)

Mit der Nutzung des GMR-Effektes hauptsächlich zur Herstellung von Magnetfeldsensoren ergab sich die Möglichkeit, Informationen in magnetischen Schichten dichter zu speichern. In einer Folge von magnetischen und nichtmagnetischen Schichten mit Schichtdicken im Nanometerbereich kommt es bei geringen Feldstärkeänderungen zu einer Änderung der Magnetisierungsrichtung in der ferromagnetischen Schicht. Zwischen zwei ferromagnetischen Schichten (Fe, Co) mit einigen Nanometern Schichtdicke befindet sich immer eine ähnlich dicke nichtferromagnetische Schicht (Cu, Cr).

*) 1988 von Peter Grünberg und Albert Fert entdeckt, Nobelpreis für Physik 2007

Der Effekt bewirkt eine sprunghafte Änderung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der gegenseitigen Orientierung der Magnetisierung (Spinorientierung) in den magnetischen Schichten des Sensors. Die Widerstandsänderung im Leiter liefert das als Information verwertbare Signal.

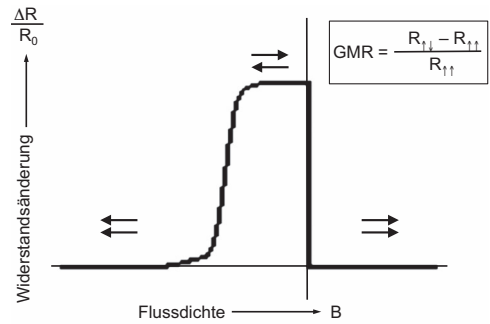


Bild 11.4-7 Widerstandsänderung in einem GMR-Sensor

Übung 11.4-1

Wodurch sind die Grenzen für die Speicherkapazität gegeben?

Übung 11.4-2

Erläutern Sie die Funktion der einzelnen Schichten eines Magnetbandes!

Übung 11.4-3

Worin bestehen die Vorteile von CrO_2 -Schichten für Magnetbänder im Vergleich zu denen mit Fe_2O_3 ?

Zusammenfassung: Magnetspeicher

- Magnetspeicher sind hauptsächlich Bandspeicher, Plattenspeicher, Kartenspeicher und Nano-speicher.
- Wesentliche Speicherwerkstoffe sind die Ferrite Fe_2O_3 und CrO_2 bzw. Metallschichten auf der Basis von Co-Legierungen.
- Die Möglichkeit, Informationen zu speichern, ergibt sich daraus, durch ein elektrisches Feld im Werkstoff ein magnetisches Feld zu erzeugen. Eine hohe Koerzitivfeldstärke sichert eine gegenüber Fremdfeldern stabile Remanenzinduktion.
- Speicherdichte und die Datensicherheit über die Zeit sind zwei entscheidende Gütekriterien für die Anwendung von Magnetspeichern.

12 Lichtwellenleiter

12.0 Überblick

Zur Übertragung von Informationen von einem Sender zum Empfänger kann man neben dem Stromfluss in einem elektrischen Leiter und den Funkwellen heute die Lichtwellenleitung nutzen. Die Lichtleitertechnik wendet das altbewährte Prinzip der Umwandlung elektrischer Signale in Lichtsignale an. Technisch einfach zu lösen ist das beim Übertragungsmedium Luft, allerdings mit den damit verbundenen Grenzen.

In Form der Lichtwellenleiter verfügt man über eine Werkstoffanwendung, mit der eine sichere Informationsübertragung durch Licht in einem

Kabel möglich wird. Das Prinzip des Informationsflusses in einer solchen Übertragungsstrecke ist im Bild 12.0-1 veranschaulicht. Das elektrische Signal wird mit einem Sendebau- element (Lumineszenz- oder Laserdiode) in ein optisches Signal gewandelt und in den Lichtwellenleiter (LWL) eingekoppelt. Es durchläuft dann den LWL und wird im Empfangsbau- element (Si-, Ge- oder InGaAs-Photodioden) wieder in ein elektrisches Signal zurückgewandelt. Im Vordergrund der weiteren Betrachtungen stehen aber die werkstofflichen Anforderungen an LWL.

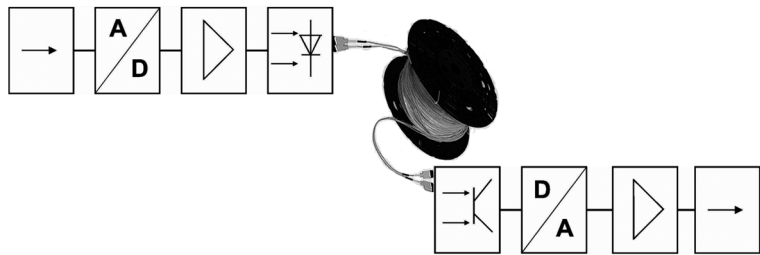


Bild 12.0-1 Prinzip der optischen Signalübertragung

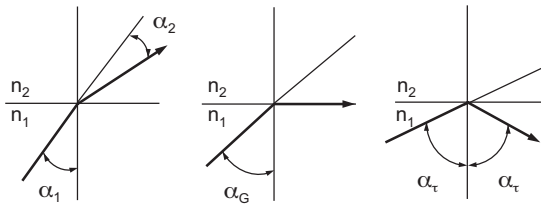
12.1 Physikalische Grundlagen

Kompetenzen

Das Brechungsgesetz nach SNELLIUS bildet die Grundlage für die Erklärung der Totalreflexion an der Grenzfläche zwischen Medien mit verschiedenen Brechzahlen. Für das Verständnis der Modendispersion ist der Akzeptanzwinkel heranzuziehen.

Die hohen Anforderungen an die Werkstoffqualität sowie der Einsatz verschiedener Werkstoffe, wie Gläser und Kunststoffe ergeben sich aus der nicht vermeidbaren Erscheinung der optischen Dämpfung. Die Unterscheidung in extrinsische und intrinsische Verluste wird als sinnvoll erkannt.

Zur Signalübertragung in der LWL-Technik nutzt man die Erscheinung der *Totalreflexion* aus. Grenzen zwei Stoffe mit unterschiedlichen Brechzahlen n_1 und n_2 aneinander, und trifft ein Lichtstrahl auf diese Grenzfläche, dann wird er gebrochen (siehe Bild 12.1-1).



α_1 = Eintrittswinkel α_2 = Winkel des gebrochenen Strahls
 α_G = Grenzwinkel α_T = Winkel bei Totalreflexion

Bild 12.1-1 Lichtbrechung und Totalreflexion an einer Grenzschicht zwischen zwei Medien unterschiedlicher Brechzahl

Formuliert ist dieser Zusammenhang im Brechungsgesetz unterschiedlicher Brechzahl nach SNELLIUS. Dabei kommt es beim Übergang des Lichtstrahls vom optisch dichteren (n hoch = n_1) in das optisch dünnere Medium (n niedrig = n_2) zur Brechung weg vom Einfallslot, d. h., der Winkel gegen die Grenzfläche wird kleiner. Vergrößert man den Einfallswinkel α so weit, dass der Grenzwinkel α_G erreicht wird, verläuft der gebrochene Strahl entlang der Phasengrenze, überschreitet man α_G , tritt Totalreflexion unter dem Winkel α_T ein. Dieser Lichtstrahl kann also das Gebiet mit der höheren Brechzahl nicht verlassen.

Unter Anwendung der Aussage des Brechungsgesetzes nach SNELLIUS bedeutet das bei einem Werkstoff mit der entsprechenden Brechzahl unter einem bestimmten Einfallswinkel des Lichtstrahles das Eintreten der Totalreflexion. Ein Lichtwellenleiter wird also immer aus einem Kern mit der Brechzahl n_1 und einem Mantel mit der Brechzahl n_2 aufgebaut sein. Bild 12.1-2 zeigt den LWL mit Kern-Mantel-Struktur und den Strahlengang. Die einfachste Lichtleitfaser ist die Stufenprofilfaser (engl. step index fibre), bestehend aus einem runden Kern mit einem Durchmesser von 50–200 μm , der von einem Mantel umgeben ist.

Entscheidend für die Reflexion des Lichtes an der Grenze zwischen Kern und Mantel ist der Akzeptanzwinkel α_A . Für alle Lichtstrahlen, die innerhalb des Akzeptanzwinkels auf die Faserstirnfläche treffen, erfolgt fortlaufend Totalreflexion. Die charakteristische Größe für das Einkoppeln stellt die numerische Apertur A_N dar.

A_N -Werte von Stufenfasern liegen zwischen 0,2 bis 0,3, was einem Akzeptanzwinkel von 11,5° bis 17,5° entspricht. Am Fasereingang be-

Brechungsgesetz nach SNELLIUS:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$$

Brechzahl $n = \frac{\text{Phasengeschwindigkeit im Vakuum}}{\text{Phasengeschwindigkeit im Stoff}}$

$$n = \frac{c_0}{c_1}$$

c_0 = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
 c_1 = Lichtgeschwindigkeit im Werkstoff

Ist n des LWL-Werkstoffes bekannt, so ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu:

$$c_1 = \frac{c_0}{n}$$

$$A_N = n \cdot \sin \alpha$$

steht ein Lichtimpuls aus verschiedenen steilen Strahlen, man spricht von unterschiedlichen Moden. Je nach Winkel erfolgt im LWL unterschiedlich oft die Totalreflexion. Licht, das sich entlang der Faserachse in einer Zickzackbahn fortbewegt, legt einen längeren Weg zurück als Licht, das sich in Achsrichtung bewegen würde und benötigt daher bei gleicher Geschwindigkeit eine größere Zeit zum Durchlaufen der Faser. Die Dauer eines zunächst kurzen Lichtimpulses, der in die Faser eingekoppelt und dessen Leistung sich auf verschiedene Ausbreitungswinkel aufteilt, wächst daher beim Durchlaufen der Faser ständig an. Der am Faserende erscheinende Puls ist um so länger, je länger die Lichtleitfaser ist. Der durchgezogene Strahl im Bild 12.1-2 wird weniger oft reflektiert als der gestrichelt gezeichnete. Die unterschiedlichen Moden kommen nacheinander am Faserausgang an, das Signal wird unscharf. Es tritt eine Signalverbreiterung durch die Modendispersion ein. Schlussfolgernd aus den physikalischen Grundlagen zur Totalreflexion wird bei zunehmendem Unterschied der Brechzahlen von Kern und Mantel der Akzeptanzwinkel größer und damit die Modendispersion. Dieser Effekt begrenzt die maximal nutzbare Datenrate bzw. die Kabellänge, über die mit einer vorgegebenen Datenrate übertragen werden kann. Sie lässt sich neben der Beachtung des Brechzahlverhältnisses auch durch konstruktive Maßnahmen minimieren. Versucht man Pulse mit hoher Folgefrequenz in einer solchen Faser zu übertragen, so fließen sie allmählich ineinander und lassen sich schließlich nicht mehr trennen. Setzt man *Einmodenfasern* ein, ist nur der Grundmode übertragungsfähig, d. h. die Modendispersion entfällt und damit steigt die nutzbare Bandbreite bis in den Terahertz-Bereich. Heutige Hochgeschwindigkeitsnetze auf Basis von LWL arbeiten zwischen 100 MHz und mehreren GHz.

Durch die Entwicklung der Gradientenfasern ergab sich eine Möglichkeit, die Modendispersion einzuschränken. In der Stufenfaser liegt ein scharfer Übergang der Brechzahl zwischen Kern und Mantel vor. Bei den Gradientenfasern ist die Brechzahl im Faserkern nicht konstant, sondern fällt von einem Maximalwert auf der Faserachse parabelförmig nach außen hin bis auf den Wert der Mantelbrechzahl ab. In dieser Faser (engl.: *graded index fibre*) bewegt sich

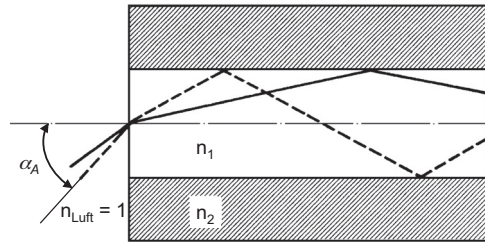


Bild 12.1-2 Strahlengang in einer Stufenprofilfaser

Die Modendispersion wird um so größer, je länger das LWL-Kabel und je größer der Brechzahlenunterschied von Kern und Mantel ist.

das Licht statt im Zickzack auf wellenförmigen Bahnen, weil es wegen der kontinuierlich variierenden Brechzahl seine Richtung kontinuierlich ändert. Die größere Weglänge der weiter ausschlagenden Bahnen wird durch die höhere Geschwindigkeit kompensiert, die im Material mit der kleineren Brechzahl größer ist. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Moden bei gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit am Empfänger zur annähernd gleichen Zeit ankommen zu lassen. Es lassen sich Gradientenfasern herstellen, die bei einer Laufzeit von $5 \mu\text{s}$ je km Faserlänge minimale Laufzeitunterschiede von $\pm 0,1 \text{ ns}$ haben.

Während der Ausbreitung des Impulses im LWL wird das Licht in Abhängigkeit von seiner Wellenlänge λ unterschiedlich stark abgeschwächt, es erfährt eine optische Dämpfung A . Sie wird in dB gemessen. Je geringer die Dämpfung ist, umso intensiver ist das messbare Lichtsignal am Ende des LWL oder um so größer kann die Übertragungsstrecke sein. Das Ausmaß der Dämpfung hängt im Wesentlichen vom Werkstoff ab. Sie resultiert aus drei Anteilen:

- der Streuung (RAYLEIGH-Streuung) α_S
- Absorption α_A und
- Strahlungsverluste α_V .

Die Summe der einzelnen Anteile ergibt den Dämpfungskoeffizienten α .

Man unterscheidet darüber hinaus in intrinsische, nichtvermeidbare und extrinsische, vermeidbare Verluste. Intrinsische Streuverluste entstehen durch Inhomogenitäten, wie z. B. in Dichte- oder Konzentrationsunterschieden sowie Mikrokristallinität im ansonsten amorphen Grundmaterial. Quarzglas ist zwar amorph, besitzt aber atomare Nahordnungsgebiete im Sinne von Si-O-Gruppierungen (siehe Kapitel 2). Extrinsische Streuverluste resultieren aus Einschlüssen, Verunreinigungen, Entmischungen, Gasblasen u.a.m. Intrinsische Absorptionsverluste haben ihre Ursache in der Wechselwirkung der Photonen mit Elektronen und Atomgruppen des LWL-Werkstoffes. Dabei wird die Photonenenergie W für Elektronenübergänge und/oder für die Anregung von Schwingungen verbraucht. Der Bindungszustand im LWL-Material wird also entscheidend sein für das Ausmaß des Anteils α_A an der Dämpfung. Bei Kunststoff-LWL verursachen

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_0}{P_L}$$

P_0 = Eingangslichtleistung

P_L = Ausgangslichtleistung

$$\alpha = \frac{A}{L} \quad (\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$$

α = Dämpfungskoeffizient oder kilometrische Dämpfung

$$\alpha = \alpha_S + \alpha_A + \alpha_V$$

$$W = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

umgeformte PLANCKSche Strahlungsgleichung

die C-H-Schwingungen im Bereich zwischen 700 und 750 nm diese Verluste.

Der extrinsische Absorptionsverlust ergibt sich im Allgemeinen durch solche Verunreinigungen, die im sichtbaren Gebiet absorbieren. Bei Glasfasern sind das besonders die OH-Gruppen der Wassermoleküle, deren Absorption allerdings bei etwa 2,7 μm im IR-Gebiet liegt. Die Adsorption von Wasser an der Faser führt auf diese Weise zu einer Erhöhung der Dämpfung. Strahlungsverluste entstehen durch Krümmungen des LWL, Abweichungen vom Faserdurchmesser sowie Störungen an der Kern-Mantel-Grenzfläche, sie sind extrinsischer Natur.

Übung 12.1-1

Unter welchen Bedingungen erfolgt an der Grenzfläche der Medien 1 und 2 die Totalreflexion?

Übung 12.1-2

Eine LWL besteht aus Kernmaterial mit der Brechzahl 1,5 und dem Mantel mit 1,48. Wie groß ist der Grenzwinkel? Wird ein Lichtstrahl in dieser Faser, der in seiner Richtung um 12° von der Achsrichtung der Faser abweicht, total reflektiert?

Übung 12.1-3

Skizzieren Sie den Aufbau einer Step Index Fibre für beide Werkstoffvarianten Glas und Kunststoff unter Angabe der Abmessungsbe-
reiche!

Übung 12.1-4

Weshalb verwendet man für Kunststoff-LWL Fasern aus PMMA bzw. PS und nicht solche aus den preiswerteren Kunststoffen PE bzw. PP und PA?

Übung 12.1-5

Wodurch wird die Dämpfung von Quarzglas beeinflusst?

Übung 12.1-6

Welche Laufzeit hat ein Lichtsignal in einem 1 km langen K-LWL aus PMMA ($n_{\text{Kern}} = 1,49$)?

Übung 12.1-7

Nennen Sie die Vor- und Nachteile von Einmoden- und Multimoden-LWL!

Zusammenfassung: Grundlagen

- Die Signalübertragung in der LWL-Technik nutzt die Totalreflexion in Fasern.
- Totalreflexion tritt dann ein, wenn beim Übergang des Lichtstrahls vom optisch dichteren Medium in das optisch dünnere der Grenzwinkel α_G überschritten wird.
- Eine Stufenprofilfaser besteht aus einem Kern- und einem Mantelmaterial. Die Lichtwelle breitet sich im Kern aus.
- Der Lichtimpuls besteht am Fasereingang aus verschiedenen „steilen“ Strahlen, den Moden, woraus die Modendispersion resultiert.
- Durch Anwendung der Gradientenfaser verringert sich die Modendispersion.
- Die Ausbreitung des Lichtsignals in der Faser ist mit der optischen Dämpfung verbunden, es entstehen Verluste.
- Extrinsische Verluste sind vermeidbar, intrinsische Verluste nicht.

12.2 Werkstoffe und Technologie

Kompetenzen

Um die Eignung von Glas- bzw. Kunststoffen für Herstellung von LWL-Fasern zu verstehen, sind Kenntnisse der chemischen Zusammensetzung und Struktur erforderlich.

Ausgehend von den aus Abschnitt 12.1 bekannten Faktoren, die zur Dämpfung der Lichtwelle führen, ist die für den Einsatz von Glas- bzw. Kunststofffaser entscheidende Eigenschaft der optischen Fenster zu verstehen. Sie entscheiden über die in einem bestimmten Wellenlängenbereich zur Signaleingabe einsetzbaren LED.

Das Wissen zum prinzipiellen Aufbau von LWL-Kabeln ermöglicht einen Vergleich mit dem metallischen Leiter zur Informationsübertragung.

Als Werkstoffe für LWL kommen einerseits Fasern auf der Basis von Quarzglas und andererseits organische Polymere als Kernwerkstoff, wie Polymethylmethacrylat (PMMA), Polystyren (PS) und Polycarbonat (PC) zum Einsatz. Als Mantelwerkstoff verwendet man bei den Kunststoff-LWL für PMMA-Fasern Fluorpolymere und für Polystyrol PMMA. Der Grund dafür, dass diese Werkstoffe für LWL-Fasern geeignet sind, besteht vorwiegend in dem Fehlen eines Kristallgitters bzw. teilkristalliner Bereiche. Durch Ordnungszustände wird die Dämpfung durch Lichtstreuung unzulässig hoch. Bei Kunststoffen mit Teilkristallinität geht die Transparenz verloren, sie werden opak. Der zweite Aspekt besteht in der technologischen Realisierbarkeit von Fasern aus der Schmelze heraus. Voraussetzung dafür ist bei den Kunststoffen thermoplastisches Verhalten.

Ausgangsstoff für die Glas-LWL ist das gleiche hochreine Silizium wie das für die Halbleitertechnik. Das hochreine, durch Zersetzung von Trichlorsilan gebildete Si wird bei 1300 °C zu körnigem Quarz oxidiert und dieser bei 1000 °C im Chlorstrom von den letzten H₂-Spuren befreit. Aus diesem hochreinen SiO₂ fertigt man einen Quarzglasstab, der in ein Glasrohr mit kleiner Brechzahl gebracht (dem späteren Mantel) und durch Erhitzen zu einem Preform verbunden wird. Aus dem Preform mit 25 mm Außendurchmesser und 500 mm Länge lassen sich ca. 20 km LWL-Faser ziehen. Auf diese Weise entsteht eine Stufenfaser.

Die Gradienten-LWL erhält man durch Innenbeschichtung eines Quarzglasrohres mit CVD-Verfahren. Beim Durchleiten von GeCl₄ oder

BCl_3 entsteht in Gegenwart von O_2 , GeO_2 bzw. B_2O_3 auf der Innenwand. Über Diffusionsprozesse erzielt man einen Konzentrationsgradienten an B_2O_3 (niedrigere Brechzahl) und GeO_2 (höhere Brechzahl), vgl. Bild 12.2-1. Der verbleibende Hohlraum im Inneren des Rohres kollabiert beim Erhitzen in den Erweichungsbereich des Glases. Das Preform ist wiederum Ausgangsstufe für die Glasfaserfertigung.

Glasfasern besitzen in bestimmten Wellenlängengebieten niedrige Dämpfungen, die sog. optischen Fenster. Will man also verlustarm übertragen, muss das eingestrahlte Lichtsignal mit seiner Wellenlänge im Gebiet eines der optischen Fenster des Glas-LWL liegen. Quarzglas hat drei optische Fenster bei 850 nm, 1300 nm und 1500 nm (siehe Bild 12.2-2). Als Sender lassen sich deshalb LED auf Basis von GaAlAs mit einer Emission bei ca. 900 nm (erstes optisches Fenster) verwenden. Das zweite und dritte optische Fenster nutzt man durch Anwendung von GaInAsP (Gallium-Indium-Arsenid-Phosphid). Die Kunststoff-LWL besitzen zwei optische Fenster bei 660 und 780 nm, siehe Bild 12.2-3. Geeignete Sender sind LED auf Basis von GaAsP und AlInGaP mit einer Wellenlänge von 650 nm. Für Laserdioden kommt GaInP zum Einsatz.

Ein Nachteil der Glas-LWL ist ihre Bruchempfindlichkeit bei Biegungen um kleine Radien gegenüber Kunststoff-LWL. Eine Kombination aus Glasfaserkern und Kunststoffmantel, in den sog. Polymer Cladded Fibres (PCF-LWL), vermindert diesen Mangel, behält die Vorteile des Quarzglases als Kernwerkstoff und setzt die Möglichkeit einer Wasseradsorption herab.

Eine Systematik der gebräuchlichen LWL besteht in der Unterscheidung nach ihrem Aufbau als Stufen- bzw. Gradienten-LWL oder nach einer speziellen Eigenschaft, z.B. Singlemode oder Multimode. Beide Systematisierungsvarianten existieren gleichberechtigt nebeneinander und werden in Tabelle 12.2-1 für den Vergleich der physikalischen Eigenschaften verwendet. Neben der Dämpfung entscheidet über die Länge der Übertragungsstrecke die erreichbare Datenrate. Übertragungsrate und Übertragungsstrecke verhalten sich umgekehrt proportional. Deshalb bildet man das Bandbreiten-Längenprodukt als eine weitere Kenngröße

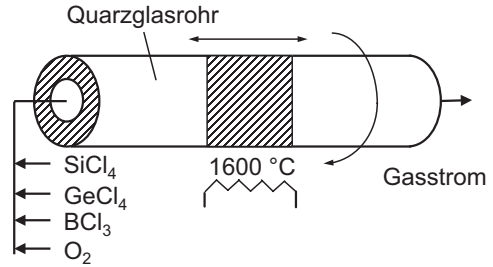


Bild 12.2-1 Prinzip zur Herstellung eines Preform für Gradientenfasern

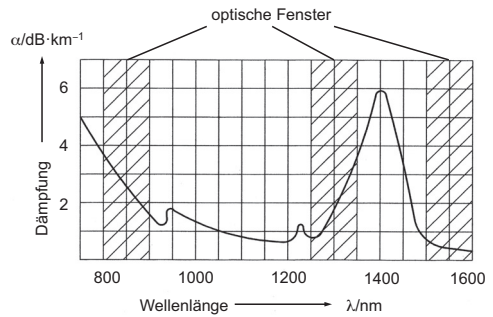


Bild 12.2-2 Optische Fenster im Quarzglas-LWL

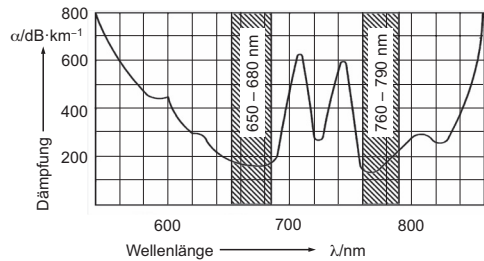


Bild 12.2-3 Optische Fenster im Kunststoff-LWL

Tabelle 12.2-1 Physikalische Eigenschaften gebräuchlicher LWL

	K-LWL	PCF-LWL	Glas-LWL	
			Multimode Gradientenindex	Singlemode Stufenindex
Werkstoff Faserkern	Kunststoff	Glas	Glas	Glas
Werkstoff Fasermantel	Kunststoff	Kunststoff	Glas	Glas
Durchmesser Kern/Mantel (μm)	980/1000	200/230	50/125	9/125
Numerische Apertur	0,47	0,36	0,2	ca. 0,5
Dämpfungskoeffizient α ($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$) bei 660 nm bei 850 nm bei 1300 nm	230 2000 –	7 6 –	– = 3,0 = 0,70	– – = 0,40
typ. Wellenlänge (nm)	660	660, 850	850, 1300	1300
Bandbreiten-Längenprodukt ($\text{MHz} \cdot \text{km}^{-1}$) bei 660 nm bei 850 nm bei 1300 nm	1 – –	– = 17 –	– = 400 = 600	– – = 10000

für LWL. Typische Einsatzbeispiele der in der Tabelle 12.2-1 aufgeführten LWL enthält Tabelle 12.2-2. Neben dem Bandbreiten-Längenprodukt spielen natürlich für die in der Tabelle 12.2-2 genannten Einsatzbeispiele die Kosten eine ausschlaggebende Rolle.

Das eigentliche Wirkelement der LWL, bestehend aus Kern und Mantel, ist praktisch so nicht verwendbar. Erst durch eine Schutzhülle erfährt der LWL einen Schutz vor mechanischer und chemischer Zerstörung. Durch eine einfache Umhüllung mit Kunststoff entsteht die Simplex-Ader (siehe Bild 12.2-4(1)). Versieht man die Ader mit Zugentlastungselementen, z.B. aus speziellen Aramid-Garnen, entsteht das Simplexkabel (Bild 12.2-4(2)). Kabel mit mehreren LWL-Adern, der Zugentlastung und zusätzlichen Kupferleitern lassen sich zu Hybridkabeln verseilen (Bild 12.2-4(3)). Um in knapper Form dem Anwender Angaben zur Konstruktion und den Eigenschaften des LWL zu vermitteln, sind genormte Kurzzeichen in Anlehnung an DIN VDE 0888, Teil 4 gebräuchlich. Das Beispiel beschreibt ein Hybridkabel mit 3 LWL und 3 Kupferadern.

Tabelle 12.2-2 Einsatzbeispiele verschiedener LWL

Faserkern- durchm. in μm	Einsatz- beispiele	typische Entfer- nung	typische Datenraten
9	Telekommuni- kation	> 10 km	Mbit/s-Gbit/s
50 200	lokale Netze Industriernetze	bis 4 km bis 2 km	< 155 Mbit/s < 100 Mbit/s
980	Netze in Gebäuden, in Erzeugnissen	bis 100 m	< 40 Mbit/s

Beispiel:

I-V112Y 3P980/1000 250A10+3x1 FF-Cu300/500V

Erklärung:

- I** Innenkabel
- V** Vollader
- 11Y** PUR-Außenhülle
- 2Y** Schutzhülle aus Polyethen
- 3P** drei LWL mit Stufenindex
- 980/1000** Kern-/Manteldurchmesser in μm
- 250** Dämpfungskoeffizient in $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$
- A** Wellenlänge 650 nm
- 10** Bandbreiten-Längen-Produkt
- 10** MHz \cdot 100 m
- 3x1** 3 Cu-Adern mit einem Querschnitt von je 1 mm^2
- FF-Cu** Feinstdrähtiger Kupferleiter
- 300/500 V** Nennspannung U/U_0

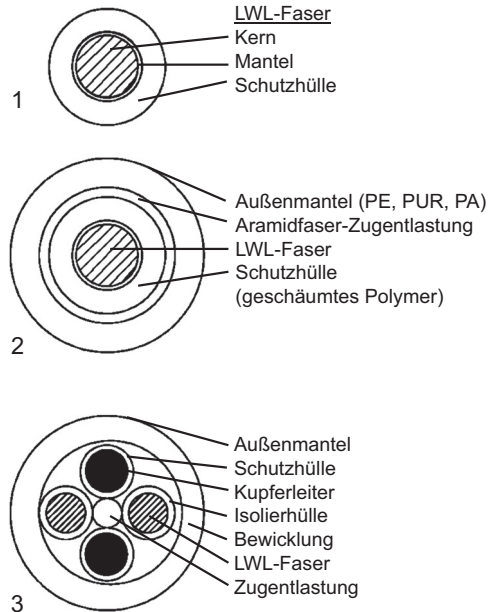


Bild 12.2-4 LWL-Kabel
 1 = Simplex-Ader
 2 = Simplex-Kabel
 3 = Hybrid-Kabel

Die Vorteile der LWL gegenüber metallischen Leitern ergeben sich im Wesentlichen aus der Tatsache, dass Photonen als Träger der Informationen keine elektrische Ladung besitzen.

Daraus resultiert die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), die galvanische Trennung, die Abhörsicherheit und kein Risiko in explosionsgefährdeter Umgebung. Darüber hinaus ergeben sich noch weitere Vorteile von LWL aus ihrer wesentlich geringeren Dichte und der erhöhten Korrosionsbeständigkeit.

Die Tabelle 12.2-3 verdeutlicht die Vorteile des Einsatzes von Glasfaser-LWL gegenüber Kupferkabeln in der Kommunikationstechnik.

Tabelle 12.2-3 Vergleich zwischen LWL- und Cu-Kabel

	Koaxial-Fernkabel	Glasfaserkabel
Typ/Bezeichnung	18 Kx 2,6/9,5+4Kx1,2/4,4+20x2x0,9	A-DSF (L) (ZN)2Y 60G 50/125 μm + 2x2x0,6
Anzahl Fasern/Adern	18 CCITT Koaxialpaare 2,6/9,5 mm und 4 CCITT Koaxialkabelpaare 1,2/4,4 mm	60 Gradientenindexfasern*) in 6 Röhrcen
Einsatzort	Dänische Postverwaltung	Deutsche Telekom
Außendurchmesser	83,0 mm	18,0 mm
Verstärkerabstand	1,5–4,5 km	30 km
Gewicht	5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	300 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$

*) Gradientenindexfasern gleichbedeutend Gradientenfaser

Besondere Aufmerksamkeit und Sorgfalt erfordert die Verbindung der LWL-Faser zum Sender bzw. zum Empfänger und ihre Verbindung untereinander. Wenn der Abstand der Stirnfläche der Faser zum Sender-/Empfängerbauelement bzw. zur anderen Faser größer Null ist, kann die Leistung vollständig übertragen werden. Planparallelität und geringe Oberflächenrauigkeit vermindern die Verluste. Stand der Verbindungstechnik für LWL ist der Einsatz von Kupplungselementen für lösbare Verbindungen in Zusammenhang mit geeigneten Verfahren der Stirnflächenbearbeitung und die Herstellung stoffschlüssiger Verbindungen.

Übung 12.2-1

Aus welchem der beiden genannten Gläser (Bor- oder Germaniumdotiert) besteht der Kern und aus welchem der Mantel der LWL-Faser?

Übung 12.2-2

Warum umhüllt man Glas-LWL-Fasern sofort nach dem Ziehen?

Übung 12.2-3

Für Glas-LWL verwendet man als Sender LED mit einer Wellenlänge von $0,9 \mu\text{m}$; für Kunststoff-LWL von 650 nm . Begründen Sie diese Tatsache! Welche Werkstoffe kommen im Senderbauelement zur Anwendung?

Übung 12.2-4

Für ein Hybrid-Kabel findet man folgende Angaben:

PUR-Außenmantel, Schutzhülle aus PE, 5 LWL mit Stufenindexprofil, Kern-/Manteldurchmesser in μm $9/125$, Dämpfungskoeffizient $\alpha \leq 0,4$, 2 Kupferadern mit je 1 mm^2 Querschnitt.

Skizzieren Sie den Querschnitt dieses Hybridkabels, nehmen Sie eine Beschriftung der einzelnen Funktionselemente vor und erläutern Sie deren Funktion!

Übung 12.2-5

Der Dämpfungskoeffizient eines LWL betrage $\alpha = 0,25 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Nach welcher Strecke L ist die Leistung auf 20% des Eingangswerts abgefallen?

Zusammenfassung: Werkstoffe und Technologie

- Basiswerkstoffe für LWL-Fasern sind Quarzglas, das aus hochreinem Si gewonnen wird und organische Polymere, wie PMMA, PS und PC.
- Die Polymer Cladded Fibres (PCF-LWL) stellen die Kombination beider Werkstoffgruppen dar. Sie bestehen aus einem Glasfaserkern und Kunststoffmantel.
- Die optischen Fenster der Glasfaser LWL liegen im Bereich von 800 bis 1500 nm, die der Kunststofffaser im Bereich von 600 bis 800 nm, daraus ergeben sich die eingesetzten LED mit den geeigneten Wellenlängen des einkoppelbaren Lichts.
- Vorteile der LWL gegenüber metallischen Leitern zur Informationsübertragung sind:
 - elektromagnetische Verträglichkeit,
 - galvanische Trennung,
 - Abhörsicherheit,
 - geringere Dichte,
 - höhere Korrosionsbeständigkeit.

Selbstkontrolle zu Kapitel 12

1. Totalreflexion eines Lichtstrahles erfolgt bei:
 - A Übergang vom optisch dünneren in das optisch dichtere Medium bei $> \alpha_G$
 - B Brechung des Lichtstrahls entlang der Phasengrenze
 - C Eintrittswinkel ist gleich Austrittswinkel
 - D Übergang vom dichteren in das optisch dünnere Medium $> \alpha_G$
 - E vollständiger Reflexion an einer polierten Oberfläche
2. Die Modendispersion wird groß, wenn:
 - A die Übertragungsstrecke sehr kurz ist
 - B der Brechzahlunterschied zwischen Kern und Mantel groß ist
 - C die Übertragungsstrecke sehr groß ist
 - D der Akzeptanzwinkel klein wird
 - E die Frequenzen sehr klein sind
3. Die Dämpfung in einem Glas-LWL wird vermindert, wenn:
 - A die Kristallinität zunimmt
 - B Dichteunterschiede auftreten
 - C Gasblasen eingeschlossen sind
 - D die Wasseradsorption gegen Null geht
 - E die intrinsischen und extrinsischen Verluste minimal sind
4. Die Dämpfung in einem Kunststoff-LWL wird vermindert, wenn:
 - A die Transparenz zunimmt
 - B keine teilkristallinen Bereiche vorliegen
 - C Weichmacher zugegeben werden
 - D der Kunststoff vernetzt vorliegt
 - E die Anregung von Schwingungen von Atomgruppen im Makromolekül gering ist
5. Als Werkstoffe für LWL werden eingesetzt:
 - A Polycarbonat
 - B Quarz
 - C Kohlefasern
 - D Na-K-Silikatglas
 - E Quarzglas
6. Die Vorteile der LWL gegenüber metallischen Leitern sind:
 - A mechanisch höher belastbar
 - B leichter herstellbar
 - C geringere Masse bei gleicher Übertragungsrate
 - D EMV
 - E einfache Verbindungstechnik

Sachwortverzeichnis

- α -Eisen 39
- γ -Eisen 39
- π -Elektron 103
- , konjugiertes 102

- 0,2 %-Dehngrenze 73

- Abbrandfestigkeit 179
- Abkühlungsgeschwindigkeit 55, 56
- Abkühlungskurve 62
- Abscheidung, galvanische 30
- Abscheidungskonstante 128
- Abschrecken 151
- Absorption α_A 304
- Absorptionsverlust, extrinsischer 305
- Achsenabschnitt 42
- Achsenwinkel 37
- Additiv-Technik 323
- Adhäsion 182
- AFC-Brennstoffzelle 127
- Aggregatzustand 19, 20
- $A^{III}B^V$ -Verbindung 102, 191, 203
- Akkumulator 116
- Aktivierungsenergie 44, 85
- Aktorik 251
- Aktuator 249
- Akzeptanzwinkel α_A 301, 302
- Akzeptor 195
- Akzeptoratom 195
- Akzeptorniveau A 195
- Akzeptortermine 197
- Alkali-Kalk-Glas 94
- Alkaline-Zelle 119
- Alnico 278
- Alterung 163, 221
- Alterungsbeständigkeit 182
- Aluminium 150
- Aluminiumbronze 147
- Aluminium-Elektrolytkondensator 246
- Aluminiumgusslegierung 151
- Aluminiumlegierung 150
- A_L -Wert 286
- Analyse, thermische 55, 56
- Anion 29
- Anionenuntergitter 226
- Anisotropie 34, 40

- , ferromagnetische 269, 272
- Anode 317
- Anodenschlamm 129
- Anpressen 182
- Anregungsenergie 100, 191
- Antiferromagnetismus 268, 270
- Anziehung, elektrostatische 21
- Apertur, numerische A_N 302
- Atombindung 24, 90
- , polarisierte 26
- Atomgitter 29, 40
- Atomradius 25, 55, 60
- Atzen 326
- Ätzmittel 327
- Aufdampfen 155
- Ausbauchungsfaktor γ 276
- Ausdehnungskoeffizient 235
- , linearer 79
- , thermischer 237
- Aushärten 144, 151
- Auslaufsicherheit (leak proof) 118
- Ausscheidungshärte 272, 278
- Austauschenergie 268
- Austauschmischkristalle 60
- AVOGADROSche Konstante 27

- Backlack 241
- Badbestandteil 320
- Bahnmoment, magnetischer 264
- Ball-Bondverfahren 184
- Bandbreite 303
- Bändermodell 99, 100, 191, 195
- Bandstruktur 140
- Bariumtitanat 227, 249
- Barriere, elektrostatische 199
- Barrierenbreite 220
- Basis 206
- Basismaterial 149, 324
- Basisstrom (I_B) 207
- Batterie 111, 116
- Bauelement, induktives 285
- Bauform 244
- BCS-Theorie 107
- Bedampfen 157, 317
- Bekeimung 318
- Belastung, leistungslose 174

- , niedrige 174
- Belastungsart 83
- Benetzen 185
- Bereich, kristalliner 92
- Berylliumbronze 148
- Beschichten 155
- Besetzungsdichte 34
- Biegewechselspannung 78
- Bindemittel 158, 235
- Bindung, chemische 24
 - , elektrovalente 24
 - , hauptvalente 27
 - , heteropolare 24
 - , homöopolare 24
 - , kovalente 24
 - , nebenvaleante 21
 - , polarisierte 21
 - , zwischenmolekulare 21
- Bindungsenergie 30
- Bipolartransistor 206
- BITTER-Streifen-Methode 270
- Bleiakkumulator 119
- Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) 249
- BLOCH-Wand 269, 275
- BLOCH-Wandverschiebung, irreversible 272
 - , reversible 272
- Bohrlochmetallisierung 323
- BOHRsches Atommodell 21
- BOHRsches Magneton (μ_B) 266
- Bohrtechnik 323
- Bonddraht 184
- Bondinsel 155, 183
- Bondpad 330
- Bondwerkzeug 184
- BRAGGSche Gleichung 35
- BRAVAIS-Gitter 37
- Brechungsgesetz nach SNELLIUS 301
- Brechzahl 301
- Brennatmosphäre 290
- Brenndauer 290
- Brenngas 125
- Brennstoffzelle 125
- Brenntemperatur 290
- BRINELL-Härte 77
- Bronze 144, 147
- Bruchdehnung 74
- Brucheinschnürung 74
- Bürstenkontakt 174

- Carbid 163
- Ceramic Coated Metal (CCM) 238
- Cermet 164
- Chip 190
- Chipbondfläche 63
- Chipwiderstand 168
- Cholesterinbenzoat 49
- Cluster 46
- cofiring 240
- COOPER-Paar 102, 107, 138, 257
- Copolymere 234
- COULOMBSche Kraft 229
- COULOMBSches Gesetz 30
- Crimphülse 183
- CURIE-Temperatur 231, 249, 275, 297
- CVD 157
- CZ-Einkristall 314
- CZOCHRALSKI-Tiegelverfahren 314

- Dämpfung 307
- Dämpfung, optische A 301, 304
- Dämpfungskoeffizient α 304
- Datenträger 292
- Dauermagnet 276
- Dauermagnet, kunststoffgebundener 281
- Dauerschwingversuch 78
- Defekt, dreidimensionaler 43
 - , eindimensionaler 43
 - , nulldimensionaler 43
 - , zweidimensionaler 43
- Defektelektron 102, 105, 136, 191, 194, 196
- Deformation, plastische 142
- Dehnungsmessstreifen (DMS) 166
- Dehydratisierung 113
- Dendrite 58
- dielektrisch 228
- Diagnostik 262
- Diamagnetika 267
- diamagnetisch 228
- Diamagnetismus 102
- Diamant 39, 40
- Diamantgitter 29
- Diaphragma 116
- Dickschichtpaste 169
- Dickschichttechnik 155, 158, 169
- Dickschichtwiderstand 169
- Dielektrika 218, 219
- Dielektrikum 230
- Dielektrizitätszahl ϵ_r 229
- Diffraktogramm 35
- Diffusion 32, 44, 82, 182, 185
- Diffusionsstrom I_{Diff} 199
- Diode 191

- Dipol 26, 220
 Dipol, elektrischer 225
 –, permanenter 225, 226
 Dipolmoment μ 225
 Diskettenspeicher 296
 Dispersionskraft 27
 Dissoziation, elektrolytische 30
 –, thermische 31, 94
 Domäne 227, 264
 Donator 194
 Donatoratom 194
 Donatorniveau D_N 194
 Donatorterme 197
 Doppelbindung 103
 Doppelbrechung 49
 Doppelschicht, elektrochemische 113
 Doppelschichtkondensator, elektrochemischer (Ultracap) 247
 Dotieren 193
 Dotierung 102, 191, 312
 Dotierungselement 193
 Draht 144
 Drahtlackierung 241
 Drain (Senke) 208
 Drehprozess, reversibler 272
 Drehzelle 50
 Driftgeschwindigkeit 137, 210
 Druck, osmotischer 113
 Drucken 155, 317
 Drucktechnik 156
 duktil 32
 Duktilität 95
 Dünnschichttechnik 136, 155
 Duralumin 152
 Durchgangswiderstand 220
 –, spezifischer 220
 Durchlassrichtung 200, 206
 Durchlassspannung U_F 200
 Durchlassstrom I_F 200
 Durchlasswirkung 191
 Durchschlagfeldstärke (E_D) 223
 Durchschlagfestigkeit 222, 233
 Durchschlagspannung (U_D) 223
 Duromer 90, 91, 234
 Duroplaste 234
 Dynamoblech 285
- E-Cu 144
 Edelgaskonfiguration 22, 29
 Edelmetall 114
 Effekt, elektrostriktiver 250
 –, innerer lichtelektrischer 211
 –, inverser piezoelektrischer 249
 –, piezoelektrischer 249
 Eigenhalbleiter 192
 Eigenhalbleitung 194
 Eigenschaft, thermische 72
 Einbrennen 240
 Einbrennprozess 159
 Eindringverfahren, statisches 77
 Einfallswinkel 302
 Einfriertemperatur 92
 Einhalbleitung 191
 Einkristall 41, 57, 190, 314
 –, versetzungsfreies 314
 Einlagerungsmischkristalle 60
 Einmodenfaser 303
 Einpressen 182
 Einschnürung 73
 Einstell-(Relaxations-)zeit 231
 Elastizitätsmodul 41, 74
 Elastomer 90, 91, 234
 Electroless Plating 318
 Elektroblech 283
 Elektrode, elektrochemische 112
 Elektrolyse 128
 Elektrolyt 101, 318
 –, protonenfreier 122
 –, wässriges 112
 Elektrolytkondensator 244, 246
 Elektromigration 157
 Elektron 19
 Elektronegativität 26
 Elektronegativitätsdifferenz 21
 Elektronegativitätszahl 55, 60
 Elektronenbeweglichkeit 136
 Elektronengas 21, 31
 Elektronengasmodell 99
 Elektronenhülle 21
 Elektronenpolarisation 225
 Elektronenpolarisation, unpolare 229
 Element, galvanisches 111
 Elementarladung 21
 Elementarteilchen 19
 Elementarzelle 34, 37
 Elementhalbleiter 106, 191, 192
 Eloxieren 150
 Emitter 206
 Emitterstrom (I_E) 206
 Empfangsbaulement 301
 Empfindlichkeit, spektrale (S) 211
 Energie, kinetische 56

- Energieband 99
Energiedichte 118
Energieniveau, diskretes 99
Energieprodukt, maximales ($B \cdot H$)_{max} 276, 277
Energiewandler, elektrochemischer 125
Engewiderstand R_E 174, 175
Entkomplexierung 113
Entmagnetisierungskurve 277
epitaktisch 315
Epoxidharz 149
Erstarren 55
Erstarrungsintervall 62
Eutektikum 62
- Fadenmolekül 91
FARADAYSches Gesetz 128, 317
Farbcodierung 171
Faserverbund 95
Faserverbundwerkstoff 41
Federkontakt 174
Feinleitertechnik 324
Feinwanderung 177
Feld, elektrisches 264, 265
–, magnetisches 264, 265
Feldeffekttransistor (FET) 208
Feldkonstante, magnetische 266
Feldstärke, kritische H_C 107, 257
–, magnetische H 264
Feldstrom I_E 199
Fenster, optisches 306
Fernordnung 35
Ferrimagnetismus 264
Ferrit 288
–, hartmagnetisches 279, 289
–, weichmagnetisches 289
Ferroelektrika 219, 225
ferroelektrisch 228
Ferromagnetika, amorphe 269
–, weichmagnetische 281
ferromagnetisch 228
Ferromagnetismus 264
Festelektrolyt 99, 112
Festkörper 99
Festplatte 295
Festplattenlaufwerk 296
Festplattenspeicher 294
Festwiderstand 170
Film, fototechnischer 323
Flächenwiderstand 160, 168
Flachprobe 72
Flammpunkt 242
Flammschutzmittel 322
Flat 315
Fließen, viskoses 92, 94
Floating-Einkristall 314
Floating-Verfahren, tiegelfreies 314
Floppy-Disk-Laufwerk 294
Flussdichte 283
–, magnetische B 265, 266
Flüssigkeitskristall, ferroelektrisches 255
Flüssigkristall (LC) 48
–, ferroelektrisches 52
Flüssigkristallbildschirm 205
flüssigkristallin 49
Flüssigkristalline Polymere (LCP) 48
Flussmittel 159, 185
Foliengießtechnik 238
Folienspeicher 296
Fotodiode 201, 205
Fotoeffekt, äußerer 201
–, innerer 201, 210, 211
Fotoelement 202
Fotolithografie 149, 316, 325
Fotoplotter 323
Fotoresist 323
Fotostrom 202
Fototool (Leiterbildvorlage) 325
Fototransistor 205
Fotovoltaik 202
Fotowerkzeug 323
Fotowiderstand 210
Fotozelle 202
Fremdschicht 174
Fremdschichtwiderstand 176
Fremdstromanlage 132
Fritte 159
Fullerene 39, 40
Füllstoff 221
Funktionsschicht 327
- GaAs (Galliumarsenid) 192
Galliumarsenid (GaAs) 192
Gasentladung 99
Gasphasenepitaxie 315
Gate (Tor) 208
Gefüge, polykristallines 57
Gehäuse 233, 235
Gel-Elektrolyt 121
Generation 105
Germanium 40, 190
Geschwindigkeit, thermische 137
Gitter, hexagonales 37

- , kubisch flächenzentriertes 38
 –, raumzentriertes 38
 Gitterebene 34, 36
 Gitterfehler 43, 47
 Gittergerade 34
 Gitterkonstante 34, 36, 55, 60
 Gittermodell 35
 Gitterpunkt 34
 Gittertyp 37, 55, 60
 Glanzbildner 318
 Glanzkohle 168
 Glas 34, 93, 233
 Glasfaser 306
 Glasfritte 158
 Glaskeramik 94
 Glaslot 94
 Glas-LWL 307
 Glastemperatur T_g 90, 92
 Gleichgewichtsdiagramm 55
 Gleitebene 82, 84
 Gleitrichtung 84
 Glühdauer 87
 Glühtemperatur 87
 GMR-Effekt 293, 297
 Gosstextur 282
 GP-Zone 67
 Gradientenfaser 303
 Gradienten-LWL 306
 Graphit 39, 40
 Grenzfläche 142
 Grenzschiicht 198
 Grenzwellenlänge 210, 211
 Grenzwinkel α_G 302
 Grobwanderung 177, 179
 Großwinkelkorngrenze 46
 Grundabschnitt 42
 Grunddotierung 315
 Grundtyp von Leiterplatten 322
 Gruppe, polare 221
 GUINIER-PRESTON-Zone (GP-Zone) 151
 Gussmagnet 279
 Gusswerkstoff 59

 Halbleiter 40, 99, 105
 Halbleiterdiode 198
 Halbleitersilizium 44
 Halbleiterwerkstoff 190
 Halbleiterwiderstand 211
 HALL-Effekt 210
 HALL-Generator 210
 HALL-Konstante 212
 HALL-Sonde 210, 212, 213
 HALL-Spannung (U_H) 212
 Haltepunkt 56, 57, 62
 Haltetemperatur 57
 Härtemessung 72
 Härteprüfung, dynamische 77
 Härteprüfverfahren 72
 Hartferrit, polymergebundenes 290
 Hartlot 186
 Hartmagnetika 272
 Hartmetallbohrer 325
 Harz 235
 Hauptquantenzahl 21
 Hautwiderstand 176
 Heißeleiter 213
 Heißluftverzinnen 329
 Heizwiderstand 163, 165, 166
 HELMHOLTZsche Doppelschiicht 111
 Hermetisierung 233
 heterogen 60
 Heteroübergang 198
 HEUSLER-Legierung 268
 Hexaferrit 290
 Hilfsschiicht 327
 Hochtemperatursupraleiter (HTSL) 95, 257
 Homoübergang 198
 HOOKESche Gerade 74
 HOOKESches Gesetz 74
 Hopping-Leitung 103
 HUNDSche Regel 22
 Hüttenkupfer 144
 Hybridbauelement 155
 Hybridkabel 308
 Hybridorbital 26
 Hydratation 101
 Hydratisierung 113
 Hydroniumion 111
 Hysterese, ferroelektrische 252
 Hysteresekurve 272
 Hystereseverlust V_h 281

 Idealkristall 43
 i-Leitung 105, 200
 Induktivität L 286
 Informationsspeicherung 292
 Inhibitor 132
 Innenlage 324
 Innenmetallisierung 320
 Innenwiderstand R_D 220
 Interkalationselektrode 116
 Intrinsic-Polymerleiter 102

- intrinsisch 101
- Ion 29
- Ionenbindung 24, 29, 32
- Ionengitter 21, 30, 270, 288
- Ionenleiter 101
- Ionenpolarisation 225, 226, 229
- Ionisierungsenergie 24, 29
- Isolator 99, 105
- Isolieröl 242
- Isolierstoff 218, 220, 233
- , anorganischer 221
- Isotop 21

- JOSEPHSON-Element 261
- JOULESche Wärme 224

- Kabel 144, 233
- Kabelschuh 183
- Kaltleiter 214
- Kaltumformung 276
- Kanthal 166
- Kapazität 225, 230
- Kapazitätsbereich 244
- Kapazitätsdiode 201
- Kation 29, 317
- Kationengitter 32
- Kationenuntergitter 226
- Katode 317
- Keilbondverfahren 184
- Keilzugprobe 88
- Keim 57, 314, 318
- , arteigener 57
- , fremder 57
- Keramik 34, 93
- , grüne 239
- Keramiksubstrat 169, 237
- Keramik-Vielschichtkondensator 256
- Kerbschlagbiegeversuch 78
- Kernladungszahl 21, 25
- KERR-Effekt 297
- Kleben 182, 183, 186
- Kleinwinkelkorngrenze 46
- Knallgasreaktion 125
- Knetlegierung 59
- Knickpunkt 62
- Koerzit 279
- Koerzitivfeldstärke H_C 272, 273, 276
- Kohlenstoffmodifikation 40
- Kohlenstoff-Nanoröhrchen 40
- Kohleschicht 163
- Kohleschichtwiderstand 168
- Kollektor 206
- Kollektorstrom (I_C) 207
- Kolloidkohle 169
- Kolophonium 185
- Kompaktkontakt 174
- Kompaktwiderstand 163
- Komplexierung 113
- Kondensator 225, 244
- Kondensatorplatten 230
- Kontakt 174
- , bedingt lösbarer 174
- , beweglicher 174
- , bewegter 174, 178, 182
- , fester 182
- , lösbarer 174
- , ruhender 174
- , unlösbarer 174
- Kontaktkraft 175
- Kontaktlast 179
- Kontaktmetall 178
- Kontaktstück 175
- Kontaktübergangswiderstand R_K 174, 175, 176
- Konzentration des Leitungselektrons 137
- Koordinationszahl 34, 37
- Koppelfaktor, elektromechanischer k 249, 250
- Korn 46
- Korngrenze 45, 46
- Kornwachstum 86
- Korrosion 71, 111, 130
- , elektrochemische 130
- Korrosionsbeständigkeit, elektrochemische 95
- Korrosionsschutz, aktiver 132
- , passiver 132
- Korrosionsschutzmaßnahme 131
- Korrosionsschutzverfahren 130
- Kovar 240
- Kriechen 78, 152
- Kriechstromfestigkeit 220, 222
- Kriechverhalten 183
- Kristall 34
- Kristall, idealer 312
- Kristallanisotropie 272, 285
- Kristallanisotropie, magnetische 278
- Kristallerholung 85, 142
- Kristallgitter, reales 34
- Kristallit 46
- Kristallseigerung 65
- Kristallsystem 37
- Kristallsystem, hexagonales 34
- , kubisches 34
- Kugeldruckhärte 78

- Kugel-Packung, hexagonaldichteste 37
 Kunststoff 90, 233
 Kunststoff, thermoplastischer 90
 Kunststofffaser 306
 Kunststoff-LWL 304, 307
 Kupfer 145
 Kupferauflage 324
 Kupferlegierung 145
 Kupferraffination 129
 Kupferschaltung 330

 Ladekapazität 120
 Ladeschlussspannung 121
 Ladungsmenge 128
 Ladungsträgerbeweglichkeit 137, 197
 Ladungsverschiebung 225
 Lamellenkontakt 174
 Laserdiode (LD) 203
 LCP (Liquid Crystal Polymer) 54
 LECLANCHÉ-Element 116
 Leerstelle 44
 Legierung 19, 44
 Legierung, binäre 59
 –, eutektische 63, 186
 Legierungsart 140
 Leistungselektronik 238
 Leiter 1. Art, metallischer 102
 –, metallischer 136
 Leiterbildvorlage (fototool) 325
 Leiterplatte 321
 Leiterplatte, durchkontaktierte 321
 Leiterplattenbasismaterial 233, 235
 Leiterplattentechnik 148, 312
 Leiterwerkstoff 136
 Leiterzug 149
 Leitfähigkeit, elektrische 43
 Leitfähigkeit, spezifisch elektrische 136
 Leitkleber 158
 Leitkupfer (E-Cu) 66
 Leitschicht 155
 Leitungsband (LB) 100, 137, 191
 Leitungselektron 31, 32, 136, 137
 LENZsche Regel 266
 Leuchtdiode, organische (OLED) 204
 Leuchtstofflampe 206
 Li⁺-Ion 121
 Licht emittierende Diode (LED) 203
 Licht, polarisiertes 50
 Lichtbogen 177
 Lichtbogengrenzkurve 177
 Lichtemission 202

 Lichtleitertechnik 301
 Lichtwellenleiter 204
 Lichtwellenleitung 301
 Linsendiagramm 64
 Liquid Crystal Polymer (LCP) 54
 Liquiduskurve 62
 Liquidus-Temperatur 62
 Lithium-Ionen-Zelle 122
 Lithium-Mangandioxid-Zelle 122
 Lithium-Papier-Zelle 122
 Lithium-Polymerakku (LiPo) 123
 Loch, positives 195
 Löcherleitung 195
 LONDON-Kraft 27
 longitudinal recording 296
 Longitudinal-Aufzeichnung 294
 LORENTZ-Kraft 212
 Lösemittel 158
 Lösungsdruck 113
 Lösungsglühen 151
 Lot, bleifreies 322
 Lötten 183, 185
 Lotpaste 158
 Löttechnik 182
 Lotwerkstoff 63, 185
 Luftspalt 277
 Luftspaltinduktion 277
 Lumineszenzdiode 191

 Magnesiumsulfid (MgS) 192
 Magnet, isotroper 281
 Magnetbandgerät 294
 Magnetfeldsensor 297
 Magnetic Resonance Imaging (MRI-Tomograph)
 259
 Magnetisierung, spontane 267
 Magnetisierungsrichtung 269
 Magnetisierungsvektor 269
 Magnetit 270
 Magnetostriktion 275
 Magnetostruktionskoeffizient λ 275
 Magnetquantenzahl m 21, 22
 Magnetschicht 295
 Magnetspeicher 294, 295
 Majoritätsladungsträger 194
 Majoritätsträger 200
 Makromolekül 90, 234
 Mangan-Zink-Ferrit 289
 Maske, fotolithografische 297
 Masse 19, 20
 Massewiderstand 214

- Materialwanderung 174, 175
Materie 19, 20
Mehrlagentechnik 238
Mehrstoffsystem 19
MEISSNER-OCHSENFELD-Effekt 107, 257
MELF-Widerstand 168, 169
mesomorph 49
Messing 145
Messinglegierung 144
Messwiderstand 164
Metall 19
–, amorphes 35, 272, 285
–, ferromagnetisches 289
–, unedles 114
Metallabscheidungsverfahren, chemisches 317
Metallabscheidungsverfahren, physikalisches 317
Metallbindung 24, 31
Metallgitter 21
Metallisierung 312
Metallisierung, außenstromlose 316, 318
–, galvanische 316, 317
–, selektive 320
Metallresist 326
Metallresist-Technik 327
Metallsalz 317
MgS (Magnesiumsulfid) 192
Mikrohybridtechnik 239
MILLERSche Indizierung 34
MILLERSches Indiz 42
Miniaturisierung 321
Mini-MELF-Diode 170
Minoritätsladungsträger 195, 200
Mischkristall 44, 59
Mischungslücke 66
Mode 303
Modendispersion 301, 303
Modifikation 34, 39
Modifikationsänderung 221
Molare Masse M_x 27
Molekül, diskotisches 53
–, kalamitisches 53
Molekülorbital 21, 25
Monokristall 58
Monomer 90, 234
MRI-Tomograph (Magnetic Resonance Imaging) 259
Multilayer 322, 324
Multimode 307

Nachwirkungsverlust V_n 281, 283
Nail-Head-Verfahren 184
Nanostruktur, magnetische 297
Nanotechnik 292
Nb-Filament 258
Nebenquantenzahl l 21, 22
NERNSTsche Potenzialgleichung 113
Netzebene 36
Neukurve 227, 272
Neusilber 147
Neutralisation 112
n-Halbleiter 312
n-Halbleitung 191
Nichtleiter 105
Nichtmetall 19
Nichtoxidkeramik 94
Nickel-Zink-Ferrit 289
Nitrid 163
Normalwasserstoffelektrode 113
NTC-Widerstand 213
Nutzgröße 323

Oberflächenrauigkeit 235
Oberflächenspannung 185
Oberflächenwiderstand R_o 220, 221
OHMSches Gesetz 137
Oktaederuntergitter 270, 288
Opferanode 132
Optokoppler 205
Orbital 21
Ordnungszahl 21
Orientierungspolarisation 225, 226, 229
Oxid 163
Oxidation 111
Oxidationsmittel 112
Oxidationszahl 112
Oxidkeramik 94, 99

Packungsdichte 37, 155, 323
Paraelektrika 219
paraelektrisch 228
Paramagnetika 267
paramagnetisch 228
Passivierung, organische 322
Passivierungsschicht 132
Paste 156
PAULI-Prinzip 22
PEM-Zelle 127
Permanentmagnet 276
Permeabilität μ 266
Permeabilitätszahl μ_r 264, 266, 273
Permittivitätszahl ϵ_r 225, 229
Perovskit-Gitter 227, 258
Perovskit-Struktur 227, 250

- perpendicular [vertical] recording 296
Perpendicular-Aufzeichnung 293
p-Halbleiter 312
p-Halbleitung 191
Phase 56
–, cholesterische 48, 51
–, kolumnare 48, 53
–, mesomorphe 48
–, nematische 48, 49
–, smektische 48, 52
Phasengleichgewichtsdiagramm 20, 55
Phasengrenze 45, 48, 302
Photon 201
Photovoltaik 190
Piezo-Aktuator 251
Piezoeffekt 249
–, inverser 251
Planartechnik 312, 316
PLANCKSche Strahlungsgleichung 204
PLANCKSches Wirkungsquantum 22
Plastomer 90, 234
Thermoplaste 234
Platte, magnetooptische 296
Plattenspeicher 296
p-n-Übergang 198
Polarisation 49, 218, 225
–, magnetische J 266
–, spontane 52, 225, 226
Polarisationsmechanismus 225
Polyacetylen 103
Polyanilin 103
Polyblends (Polymermischung) 234
Polyethen 29, 90
Polygonisation 86
Polyimidfolie 237
Polymer 90
Polymer Cladded Fibres 307
Polymer, elektrisch leitfähiger 104
Polymerfritte 158
Polymerleiter 99, 103
Polymermischung (Polyblends) 234
Polymerpaste 159
Polymorphie 34, 39
Polypyrrol 103
Pore 48
Positivresist 326
Potenzial, elektrochemisches 111
Potenzialänderung 113
Potenzialdifferenz 130, 318
Potenzialtrichtermodell 99
Potenzialverlustfaktor 277
Präzisionswiderstand 164
Preform 306
Primärelement 111, 116
Primärzelle 116
Print-and-etch-Technik 327
Prinzip der größten Multiplizität 22
Proportionalstab 72
Proton 21
Prüfverfahren 72
Prüfverfahren nach MARTENS 80
–, VICAT 80
Pseudolegierung 59
PTC-Widerstand 213
Punktreihe 36
Pyrolyse 168

Quanteneffekt (GMR) 292
Quantenzahl 21
Quarz (SiO_2) 250
Quarzglas 306
Quarzsand 93, 313
quasiisotrop 41, 57
Quelle (Source) 208
Quetschen 183

RAM-Zelle 119
Rapid Single Flux Quantum (RSFQ-Logik) 259
Rasterkraftmikroskop 34
Raumgitter 36
Raumladung 191
–, negative 195
–, positive 194
RAYLEIGH-Streuung 304
Reaktion, elektrochemische 111
Reaktionsprodukt 320
Rechteck-Chip-Widerstand 168, 169
Redox-Paar 114
Redox-Reaktion 111
Reduktion 111
Reduktionsmittel 112
Regel von MATTHIESSEN 139
Reibungsverlust 230
Reinheit 140
Reinheitsbegriff 44
Reinstsilizium, einkristallines 312
Reißdehnung 76
Reißspannung 76
Rekombination 106
Rekombinationszeit 202
Rekristallisation 85, 86, 276
Rekristallisationstemperatur 86, 142

- Relaxationszeit 225, 226
 Relaxor-Ferroelektrika 250
 Remanenzinduktion B_r 272, 273, 276
 Remanenzpolarisation 272, 273
 Resist 325
 Resistmaske 326
 Restmagnetismus 273
 Ringbandkern 285
 Rissprüfung 262
 ROCKWELL-Härte 77
 RoHS 322
 RoHS-directive 186
 Röntgendiffraktometrie 35
 Röntgenstrahl 35
 Röntgenstrukturanalyse 36
 Rotguss 148
 RSFQ-Logik (Rapid Single Flux Quantum) 259
 Rückstell-(Relaxations-)zeit 231
 Rundstab 72
- Salzschnmelze 101, 112
 Sättigung, magnetische 272
 Sättigungslinie 67
 Sättigungspolarisation 289
 Sauerstoffleerstelle, geordnete (vacancy) 259
 Schaltkreis, integrierter 155, 312
 Schaltleistung 178
 Schaltung, integrierte 190
 Schaltungstechnik, elektrische 321
 Schaubild 61
 Schichtdicke d_s 142
 Schichtkondensator 244
 Schichtkontakt 174
 Schichtpressstoff 149
 Schichtwerkstoff 143, 163
 Schichtwiderstand 168
 Schlagfestigkeit 78
 Schlagversuch 72
 Schmelzbereich 94
 Schmelze 55
 Schmelzflusselektrolyse 31, 150
 Schmelzlegierung 55, 59
 Schmelzpunkt 55
 Schraub-Klemmverbindung 183
 Schutz, katodischer 132
 Schweißen 182, 183
 Schweißtechnik 182
 Schwierigkeitsgrad 321
 SEEBECK-Effekt 164
 SEEBECK-Koeffizient 164
 Seggregat 67
 Segregationskoeffizient 314
 Sekundärelement 111, 116
 Sekundärzelle 116
 Selbstreinigung 178
 Self Reinforcing Polymer (SRP) 54
 Seltenerd-Magnet 278
 Semiadditiv-Technik 323
 Sendebauuelement 301
 Senke (Drain) 208
 Sensor 249
 Sensor, magneto-elastischer 285
 Separator 116
 Shore-Härte 77
 Siebdruck 325
 Siebdruckverfahren 169
 Si-Einkristall 312
 Silidus-Temperatur 62
 Silikatkeramik 94
 Silizium 40
 –, einkristallines 190, 197
 –, versetzungsfreies 197
 Siliziumcarbid 166
 Siliziumtechnologie 197, 312
 Simplex-Ader 308
 Singlemode 307
 Sintern 95, 240
 Sinterprozess 290
 Sintervorgang 94
 Sinterwerkstoff 179
 SiO₄-Tetraeder 93
 Si-Solarzelle 202
 SMD-Technik 325
 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)
 259
 Solarzelle 155, 202
 Soliduskurve 62
 Sondermessing 147
 Sonnenbatterie 202
 Source (Quelle) 208
 Spannung, wahre 73
 Spannungsbereich 244
 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 72, 73
 Spannungsreihe der Metalle 114, 318
 –, thermoelektrische 165
 Spannungs-Riss-Korrosion 147
 Speicher, digitaler 255
 Speicher, interner 292
 –, peripherer 292
 Speicherdichte 296
 Speicherkapazität 293
 Speichermedium 292

- Speichermedium, magnetisches 292
 Speicherzelle, magnetische 294
 Sperrichtung 206
 Sperrschichtbleiberelement 198
 Sperrstrom 201
 Sperrwirkung 191
 Spinellgitter 270, 289
 Spinmoment 264
 –, freier 267
 –, magnetischer 266
 Spinquantenzahl s 21, 22
 Sprödebruch 94
 Sprungtemperatur 102, 107, 257
 Sputtern 155, 317
 SQUID-Sensor (Superconducting Quantum Interference Device) 259, 261
 SRP (Self Reinforcing Polymer) 54
 Standardpotenzial 114
 Standard-Wasserstoffelektrode 111
 Stängelkristall 276
 Stecken 182, 183
 Steckverbinder 330
 Steckverbindung 183
 STERN-GRAHAM-Modell 111
 Stoff 19
 –, amorpher 35
 Störstellenhalbleiter 196
 Störstellenhalbleitung 106, 193
 Strahlensubstrat, emailliertes (ESS) 238
 Strahlungsverlust α_v 304
 Streckgrenze 73
 Streuung, extrinsische 304
 –, intrinsische 304
 Streuverlustfaktor 277
 Strippen 326
 Stromausbeute 129
 Stromdichte 317
 Stromdichte, kritische j_c 102, 108, 257
 Strukturdefekt 140
 Strukturzeugung 321
 Stufenfaser 303
 Stufenprofilfaser 302
 Stufenversetzung 45
 Substitutionsmischkristalle 60
 Substrat 233
 –, keramisches 235
 Substratwerkstoff 143
 Subtraktiv-Verfahren 323
 Sulfatierung 120
 Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) 259
 Superconducting Quantum Interference Device (SQUID-Sensor) 259, 261
 Supraleiter 40, 99, 257
 Supraleitung 102, 107, 257
 Swingzelle 122
 TAMMANNsche Regel 87
 Tantal-Festelektrolytkondensator 246
 Target 157, 168
 Tauchabscheidung 318
 Tauchlöten 186
 Temperaturbeständigkeit 235
 Temperaturkoeffizient (TK_α) 139, 168
 –, des Widerstandes 164
 Temperatur-Zeit-Diagramm 56
 Tending-Verfahren 327
 Tetraedermodell 26
 Tetraederuntergitter 270, 288
 Textur 84, 276
 Texturblech 282
 Texturierung, kornorientierte 285
 Thermistor 163, 210, 213
 Thermoanalyse, differenzielle 62
 Thermochromie 52
 Thermodynamik 44
 Thermoplaste (Plastomere) 234
 Thermosonicbond 184
 Thermospannung 163, 164
 TN-Zelle 50
 Tor (Gate) 208
 Totalreflexion 301, 302
 Trägermaterial 235, 295
 Tränklack 241
 Transformatorenblech 285
 Transistor 190, 191, 198
 Träufellack 241
 Trennung, galvanische 233, 309
 Trichlorsilan 313
 Trockenfilmresist 325
 Übergang, belasteter 191
 Übergang, unbelasteter 191
 Überschusshalbleiter 193
 Überstruktur, helikale 51
 Ultracap 247
 Ultrasonicbond 184
 Umklappvorgang 272
 Ummagnetisierungsarbeit 273, 281
 Ummagnetisierungsverlust 272, 285
 Umschmelzen 329
 Unipolartransistor 206

- vacancy 101
- Valenzband (VB) 100, 191
- Valenzelektron 24, 31
- Valenzelektronenzahl 60
- VAN DER WAALSsche Bindung 27
- Varaktor-Effekt 201
- Varistor 163, 210, 214
- V-Diagramm 62
- Verarmungszone 200
- Verbindung, aliphatische 49
 - , aromatische 49
 - , intermetallische 60
- Verbindungshalbleiter 106, 191
- Verfahren, chemisch reduktives 318
 - , fotolithografisches 321
- Verformung, elastische 82
 - , irreversible 82, 83
 - , plastische 82, 83
 - , reversible 82, 83
 - , viskoelastische (entropie-elastisch) 91
- Verformungsgrad 141
- Verhalten, diamagnetisches 264
 - , ferroelektrisches 227
 - , kautschukelastisches 82
 - , paramagnetisches 264
 - , viskoses 82
- Verlust, extrinsischer 301
 - , intrinsischer 301
- Verlustfaktor $\tan \delta$ 225
- Verlustfaktor, dielektrischer 230
- Vernetzung 234
- Verschiebungspolarisation 225
- Versetzung 45
- Versetzungslinie 45
- Versetzungswanderung 82, 83
- Verträglichkeit, elektromagnetische (EMV) 309
- Verunreinigung 43
- Verzunderung 163
- Via 238, 324
- VICKERS-Härte 77
- Volumen, spezifisches 92
- Volumenhalbleiterbauelement 198, 210
- Volumenwiderstand R_D 220

- Wafer 42, 315
- Wärmebeständigkeit 80
- Wärmedehnung 79
- Wärmeformbeständigkeit 79
- Wärmeleitfähigkeit 235
- Warmumformung 88
- Wasserstoff-Brückenbindung 25

- Wedgebondverfahren 184
- WEEE 322
- Weglänge, mittlere freie 142
- Weichlot 186
- Weichlot, bleifreies 187
- Weichmagnetika 272, 281
- Weichmagnetika, metallische 283
- Weißlicht 205
- WEISSscher Bezirk 264, 269
- Werkstoff, dielektrischer 218
 - , ferrimagnetischer 288
 - , ferroelektrischer 225
 - , hartmagnetischer 272, 276
 - , hochperrmeabler 285
 - , keramischer 233
 - , kompakter 143
 - , organischer 90
 - , paraelektrischer 229
- Werkstoffabbrand 176
- Werkstoffkenngröße 72
- Werkstoffwanderung 176
- Wickelkondensator 244, 245
- Wickeln 183
- Widerstand, keramischer 214
 - , spezifisch elektrischer 99, 136, 163, 220
- Widerstandsdrift 168
- Widerstandsnetzwerk 168, 170
- Widerstandspaste 168
- Widerstandsschicht 168
- Widerstandsthermometer 165
- Widerstandswerkstoff 163
- Wirbelstrom 283
- Wirbelstromverlust V_w 281, 283, 289
- Wirksubstanz 158
- Wirkungsgrad 129
- Würfeltextrur 282

- Zelle 116
 - , galvanische 116
- Zementation 114, 318
- Zementit 68
- Zink-Luft-Zelle 119
- Zink-Silberoxid-Zelle 119
- Zinnbronze 147
- Zirkularpolarisation 51
- Zone, verbotene 100, 194
- Zonen-Mischkristall 65
- Zonenschmelzen 65
- Zonenschmelzverfahren 314
- Zugfestigkeit 74
- Zugriffszeit 293

Zugversuch 72
Zugversuch für Kunststoff 75
Zunderbeständigkeit 166
Zuschnitt 323
Zustand, amorpher 34

Zustandsänderung 55
Zustandsdiagramm 20
Zweiphasengebiet 64
Zwischengitteratom 43, 44
Zykluszeit 293