

HANSER

Manfred Merkel, Karl-Heinz Thomas

Taschenbuch der Werkstoffe

ISBN-10: 3-446-41194-1

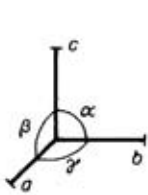
ISBN-13: 978-3-446-41194-4

Leseprobe

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
<http://www.hanser.de/978-3-446-41194-4>
sowie im Buchhandel

Kristallsysteme

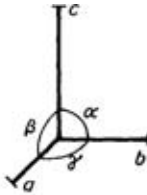
Aus den Größen (Beträgen) der Translationsstrecken und den o. g. Winkeln ergeben sich die 7 Kristallsysteme, Bild 1.3.



kubisches System

$$a = b = c$$

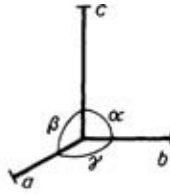
$$\angle \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



tetragonales System

$$a = b \neq c$$

$$\angle \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

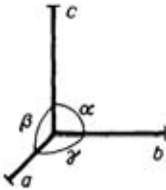


hexagonales System

$$a = b \neq c$$

$$\angle \alpha = \beta = 120^\circ$$

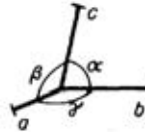
$$\angle \gamma = 90^\circ$$



rhomboedrisches System

$$a = b = c$$

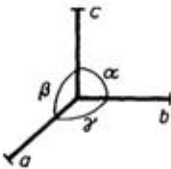
$$\angle \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$



rhomboedrisches System

$$a = b = c$$

$$\angle \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

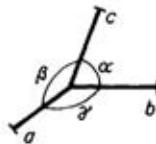


monoklines System

$$a \neq b \neq c$$

$$\angle \alpha \neq \beta \neq \gamma$$

$$\angle \gamma = 90^\circ$$



triklines System

$$a \neq b \neq c$$

$$\angle \alpha \neq \beta \neq \gamma$$

$$\angle \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$

Bild 1.3 Die 7 Kristallsysteme

Die meisten Metalle kristallisieren vor allem im kubischen und hexagonalen System, einige im tetragonalen System. Im monoklinen, triklinen, rhombischen und hexagonalen System treten kristallisationsfähige (partiell-kristalline) Plaste auf.

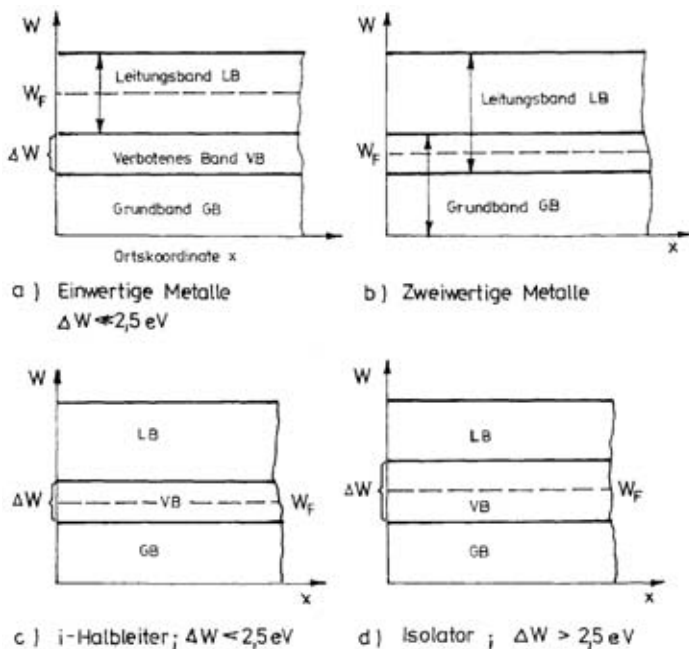


Bild 1.105 Energiebandmodelle für Metalle, Halbleiter und Isolatoren (schematisch), nach [24]

- *Man beachte:* Das 4s-Band als Leitungsband des Cu schließt das vollbesetzte 3d-Band und das leere 4p-Band durch Überlappung ein (vgl. Bild 1.103). Die Überlappung ist in Bild 1.105a nicht angegeben. Das verbotene Band erstreckt sich zwischen der Unterkante des Leitungsbandes und der Oberkante des als Grundband wirkenden 3p-Bandes. Der Bandabstand (Breite des verbotenen Bandes) ist mit $\Delta W \ll 2,5 \text{ eV}$ sehr schmal. W_F liegt im Leitungsband.

In Bild 1.105b, das für zewertige Metalle, wie Cd, Mg, Ni, Zn u. a., zutrifft, überlappen sich das Grund- und das Leitungsband, ohne dass ein verbotenes Band auftritt.

Bei Halbleitern ist die Breite des verbotenen Bandes $\Delta W < 2,5 \text{ eV}$ und bei Isolatoren ist $\Delta W \geq 2,5 \dots 7 \text{ eV}$.

Angemerkt sei, dass bei dotierten Halbleitern (Störstellenhalbleiter) innerhalb des verbotenen Bandes erlaubte Energieniveaus durch den Einbau entsprechender Dotierungsatome entstehen.

Einteilung der Stähle in Hauptklassen nach DIN EN 10 020 (2000)

Die o. a. drei Stahlklassen werden nach den im Folgenden genannten Kriterien spezifiziert:

1. Unlegierte Qualitätsstähle

An diese Stahlsorten werden Anforderungen hinsichtlich mechanischer Eigenschaften, wie Streckgrenze, Bruchzähigkeit, Umformbarkeit, Korngröße u. Ä. gestellt.

Die in DIN EN 10 020: 1989-09 enthaltene Hauptgüteklasse „Grundstähle“ wurde gestrichen und die darin genannten Stahlsorten in die Klassen der unlegierten Qualitätsstähle übernommen.

2. Unlegierte Edelmstähle

Gegenüber den unlegierten Qualitätsstählen weisen diese Stähle einen höheren Reinheitsgrad an nichtmetallischen Einschlüssen auf. Sie sind vielfach für die Wärmebehandlung Vergüten oder Randschichthärten geeignet. Diese Eigenschaften, verbunden mit engen Grenzen für Streckgrenzen- oder Härtebarkeitswerte, werden durch genaue Einstellung der chemischen Zusammensetzung erreicht. Die unlegierten Edelmstähle müssen einer oder mehreren der nachfolgend genannten Anforderungen entsprechen:

- festgelegte Kerbschlagarbeit im vergüteten Zustand
- festgelegte Einhärtungstiefe oder Oberflächenhärte im gehärteten, vergüteten oder randschichtgehärteten Zustand
- besonders niedrige Gehalte an nichtmetallischen Einschlüssen
- festgelegter Höchstgehalt an Phosphor und Schwefel: $\leq 0,020\%$ (Schmelzenanalyse) bzw. $\leq 0,025\%$ (Stückanalyse)
- Mindestwert der Kerbschlagarbeit an Charpy-V-Proben bei $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ von ≥ 27 Joule in Längsrichtung oder ≥ 16 Joule in Querrichtung entnommener Proben
- elektrische Leitfähigkeit $> 9\text{ MS/m}$ ($> 9\text{ Sm/mm}^2$)
- bei Kernreaktorstählen darf der Anteil von $\leq 0,10\%$ Cu, $\leq 0,05\%$ Co und $\leq 0,05\%$ V in der Stückanalyse nicht überschritten werden
- bei ausscheidungshärtenden ferritisch-perlitischen Stählen mit $\geq 0,25\%$ C liegen die Anteile von Mikrolegierungselementen, wie z. B. Nb oder V, unterhalb der Grenzwerte für legierte Stähle

3. Nichtrostende Stähle

Sie werden neben den o. g. Kriterien der chemischen Zusammensetzung auch nach den Ni-Anteilen mit $\leq 2,5\%$ bzw. $\geq 2,5\%$ sowie nach Haupteigenschaften, wie korrosionsbeständig, hitzebeständig und warmfest unterschieden.

Berylliumhaltige Nickellegierungen, wie NiBeTi und Ni 60 CrMoBe, zeigen im kaltverfestigten und ausgehärteten Zustand Zugfestigkeitswerte von 1 815 ... 1 865 MPa. Sie werden für säurebeständige Federn, unmagnetische Federn und Wellen für Schwingungsmesser (NiBeTi) verwendet.

4. Form-Gedächtnis-Legierungen (shape memory alloys)

Phasenumwandlungen im festen Zustand, die diffusionslos durch Gitterumklappung bzw. Gitterscherung vor sich gehen, werden als martensitische Umwandlungen bezeichnet. Derartige Umwandlungen werden nicht nur bei Eisenwerkstoffen beobachtet, sondern sie treten auch bei Legierungen solcher Nichteisenmetallsysteme, wie Ni-Ti, Ni-Ti-Fe, Ni-Ti-Cu, Cu-Zn, Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Si, Cu-Zn-Ga, In-Ti und Au-Cd, auf.

Die martensitischen Umwandlungen sind bei den NE-Metallegierungen im Gegensatz zu den Eisenwerkstoffen mit reversiblen (elastischen) Formänderungen verbunden. Daraus resultiert der *Form-Gedächtnis-Effekt*, der erstmals 1932 an einer Au-Cd-Legierung entdeckt wurde.

Definition: Der Form-Gedächtnis-Effekt (shape-memory-effect) ist die Eigenschaft einer martensitumwandelnden NE-Metallegierung, nach einer Formänderung im martensitischen Zustand durch Erwärmen in den Ausgangszustand seine ursprüngliche Form nahezu vollständig oder teilweise wieder anzunehmen.

Analog zum Stahl werden wegen ihrer äußerlichen Ähnlichkeit die Tieftemperaturphase α als Martensit und die Hochtemperaturphase β' als Austenit bezeichnet.

► *Man beachte:* Die β' -Phase (Austenit) hat im Gegensatz zum Stahl eine wesentlich höhere Festigkeit als die α -Phase (Martensit).

Grundlagen zum Form-Gedächtnis-Effekt (FG-Effekt)

Voraussetzung für das Auftreten des FG-Effektes ist eine thermoelastische martensitische Umwandlung geordneter Mischkristallphasen (Überstrukturen, intermetallische Phasen). Wesentlich ist dabei, dass der Ordnungszustand der Hochtemperaturphase der Tieftemperaturphase „vererbt“ wird. Das ist die Bedingung für die Umkehrbarkeit der Phasenumwandlung Austenit $\rightarrow$ Martensit $\rightarrow$ Austenit.

Vorgänge bei der Martensitbildung

Bei hohen Temperaturen besteht das Gefüge der FG-Legierung aus homogenen β -Mischkristallen mit ungeordneter Atomverteilung. Durch Abkühlung auf eine für die Legierung charakteristische Temperatur erfolgt die Umordnung der Atome unter Bildung einer bzw. der geordneten Hochtemperatur-

Die anwendungstechnischen Eigenschaften sind abhängig vom Verlauf der Entmagnetisierungskurve, vom Arbeitsluftspalt, von der Temperaturabhängigkeit der Luftspaltinduktion und von der Geometrie des Magnetsystems.

Für alle hartmagnetischen Werkstoffe gelten drei Gütekennzeichen:

1. Maximale Energiedichte oder maximales Energieprodukt $(BH)_{\max}$ (vgl. Bild 4.9),
2. Ausbauchungsfaktor γ der Entmagnetisierungskurve (vgl. Bild 4.10),
3. Reversible Permeabilität μ_r (vgl. Bild 4.11).

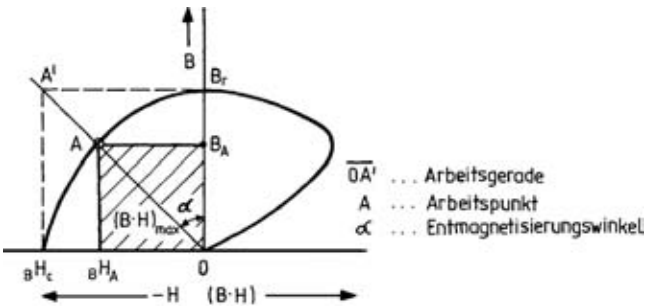


Bild 4.9 Entmagnetisierungskurve und Kurve der Energiedichte

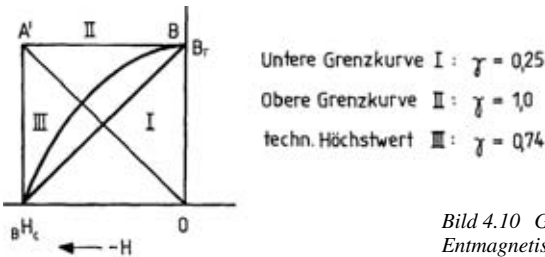


Bild 4.10 Grenzfälle der Entmagnetisierungskurve

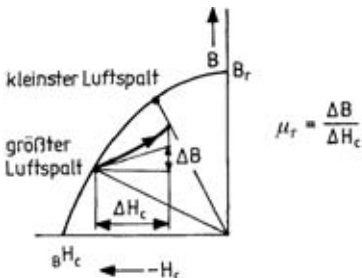


Bild 4.11 Definition der reversiblen Permeabilität

Maximales Energieprodukt $(BH)_{\max}$

Der in jedem technischen Dauermagnetsystem erforderliche Arbeitsluftspalt verursacht durch den Austritt der Feldlinien an den Polen eine Schwächung der magnetischen Flussdichte.

Auf der Entmagnetisierungskurve stellt sich in Abhängigkeit von der Geometrie des Magnetsystems zwischen $H = 0$ und $B = B_r$ sowie zwischen $H = B_r H_c$ und $B = 0$ der so genannte Arbeitspunkt A ein. Die dort gespeicherte bzw. zur Verfügung stehende magnetische Energie ist die Energiedichte oder das maximale Energieprodukt $(BH)_{\max}$.

Maßeinheiten:

$$B: \quad 1 \text{ T (Tesla)} = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2} = 10^4 \text{ G (Gauß)}$$

$$H: \quad 1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} = 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-1} = 1,256 \cdot 10^{-2} \text{ Oe (Oerstedt)}$$

$$BH = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} = 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$1 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} = 10^3 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} = 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3} = 1 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Ausbauchungsfaktor

$(BH)_{\max}$ wird wesentlich durch den Verlauf der Entmagnetisierungskurve, d. h. durch die Kurvenausbauchung bestimmt (vgl. Bild 4.10).

Reversible Permeabilität μ_r

μ_r beschreibt das Verhalten eines Dauermagnetsystems mit veränderlichen Luftspaltverhältnissen (Länge, Querschnitt), wie das bei Motoren, Generatoren, Tachometern und Haftmagneten der Fall ist. Hier ist der Arbeitspunkt nicht konstant, sondern er pendelt zwischen zwei konstruktiv bedingten Grenzwerten auf einer unterhalb der Entmagnetisierungskurve gelegenen Kurve (vgl. Bild 4.11).

$$\mu_r = \frac{\Delta B}{\Delta H_c}$$

μ_r bestimmt die Stabilität des Werkstoffs gegenüber der Änderung der Luftspaltverhältnisse.

4.6.7.4 Sinterhartmagnete auf der Basis von Al-Ni-Co

Neben den hartmagnetischen Ferriten sind die AlNiCo-Magnetwerkstoffe technisch am wichtigsten. Sie können sowohl pulver- als schmelzmetallurgisch hergestellt werden. In ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden sich Sinter- und Gussmagnete nur unwesentlich in den Mengenanteilen der Komponenten. Die Sintermagnete bestehen aus: 5 ... 14 % Al, 13 ... 28 % Ni, ≤ 40 % Co, 1 ... 6 % Cu, ≤ 9 % Ti, Rest Fe.

5.1.2.3.2 Mechanische Eigenschaften

Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, Bruchdehnung, Schlag- und Kerbschlagzähigkeit u. a. sind strukturabhängige Eigenschaften. *Lineare, amorphe Hochpolymere* zeigen im Gegensatz zu denen mit orientierter Molekülanordnung niedrige Werte der Zug- und Biegefestigkeit. Dagegen sind die Dehnungswerte und die Werte der Schlagzähigkeit relativ hoch, sofern sich nicht infolge sterischer Behinderung von Seitengruppen (z. B. bei Polystyrol bzw. Polystyren) niedrige Werte ergeben.

Partiell-kristalline Hochpolymere haben ähnliche Festigkeitswerte wie amorphe, jedoch sehr hohe Schlagzähigkeitswerte. Hohe Werte ergeben sich bei duroplastischen Schichtstoffen und bei faserverstärkten duro- und thermoplastischen Verbundwerkstoffen mit unidirektionaler oder nichtunidirektionaler Verstärkung (wie z. B. Matten, Vliese, Gewebe, Rovinggewebe, Stränge und Kurzfasern).

Nach DIN EN ISO 527-1 (1996) gelten beim Zugversuch folgende **Definitionen**:

- **Spannung** σ (tensile stress):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{in MPa}$$

F Kraft in Newton

A Anfangsquerschnitt in mm^2

- **Streckspannung** σ_Y (yield stress): der erste Spannungswert in MPa, bei dem ein Zuwachs der Dehnung ohne Steigerung der Spannung auftritt. σ_Y ist mit der Streckgrenze der Metalle vergleichbar.
- **Zugfestigkeit** σ_M (tensile strength) ist die Maximalspannung in MPa, die der Probekörper während des Zugversuches trägt.
- **Bruchspannung** σ_B (tensile stress at break) ist die Spannung in MPa beim Bruch der Probe.
- **Dehnung** ε (tensile strain) ist die auf die Ausgangslänge bezogene Änderung der Messlänge in Prozent.
- **Streckdehnung** ε_Y (yield strain) ist die Dehnung unter Wirkung der Streckspannung σ_Y in Prozent.
- **Bruchdehnung** ε_B (tensile strain at break) ist der Dehnungswert bei Bruch der Probe, d. h. unter Wirkung der Bruchspannung σ_B .
- **Elastizitätsmodul** oder **Zugmodul** E_t (modulus of elasticity in tension); E_t berechnet sich zu

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

σ_1 Spannung, gemessen bei $\varepsilon_1 = 0,0005$

σ_2 Spannung, gemessen bei $\varepsilon_2 = 0,0025$

Reaktionen bei der Zementherstellung und bei der Verfestigung von Zement-Wasser-Gemischen

Brennen der aufbereiteten und gemischten Rohstoffe Kalkstein und Ton mit einem bestimmten Gehalt an Rohstoffoxiden CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 und SiO_2 . Nachdem H_2O und CO_2 bis 1000°C ausgetrieben sind, reagieren diese Oxide, meist unter Sinterung, zu folgenden *Klinkermineralien*:

$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Tricalciumsilikat (C_3S)
$2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Dicalciumsilikat (C_2S)
$3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Tricalciumaluminat (C_3A)
$4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Tetracalciumaluminatferrit (C_4AF)

Feinmahlen der gekühlten Zementklinker unter Zusatz von Gipsstein zur Erhärtungsregulierung bis zur Teilchengröße $0,1 \dots 10 \mu\text{m}$

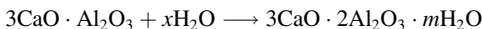
Verfestigung der Zement-Wasser-Gemische (Zementleim)

1. Phase: Erstarren

Durch Reaktion der Klinkermineralien mit dem Anmachwasser entstehen bei C_3S und C_2S unter Abspaltung von Calciumhydroxyd (Hydrolyse) Calciumsilikathydrate. Die Art der entstehenden Silikathydrate wird vom Wasser-Zement-Wert beeinflusst. Durch Wasseranlagerung bilden sich um die einzelnen Zementkörner Gelhüllen, die sich nach einer gewissen Zeit berühren. Es bildet sich eine Struktur heraus, bei der Zementbrei eine schneidbare, aber nicht mehr formbare Masse darstellt.

2. Phase: Erhärten

Mit fortschreitender Reaktion verdichtet sich die Gelphase, d. h., trockene Bezirke saugen aus dem wasserhaltigen Gel freies Wasser, um selbst ein Gel zu bilden. Es kommt zu einer Strukturvergrößerung des anfangs gebildeten kolloid-amorphen Gels, die ein Zusammenziehen der Masse, das Schrumpfen des Zements, bewirkt. Durch diese fortschreitende Gelbildung werden Zwischenräume weitgehend ausgefüllt. Einfluss auf das Verfestigungsverhalten haben die Art der Zemente und die Erhärtungsbedingungen. Zusammenfassend und vereinfacht kann gesagt werden, dass die Klinkermineralien mit dem Anmachwasser unter Hydrolyse bzw. Hydratation zu sich verfestigenden Hydrogelen und wasserhaltigen Kristallen nach folgenden Gleichungen reagieren:



Die vollständige Hydratation kann sich über einen längeren Zeitraum erstrecken (Nacherhärten). Wichtig ist für die Anwendung bei bestimmten Betonar-

3. Vorhandensein einer örtlich unterschiedlichen Intensität des angreifenden Mediums, wie örtliche Unterschiede in der Konzentration des gelösten Sauerstoffes oder örtliche Unterschiede in der Temperatur des Elektrolyten
4. Vorhandensein von örtlich unterschiedlichen Spannungen (Verarbeitungszustände) im Werkstoff

Ein Ergebnis von Untersuchungen an solchen Ketten ist die elektrochemische Spannungsreihe der Metalle. Wenn auch eingeschränkt werden muss, dass sich die Metalle nur näherungsweise bei der Korrosion entsprechend dieser Reihe verhalten, so ist die galvanische Kette ein brauchbares Modell für die Korrosionsvorgänge. Nach Bild 7.2 wirkt das Eisen in der Kombination mit Kupfer als Anode, da es entsprechend der Spannungsreihe das Metall mit dem negativeren Potenzial darstellt. Das dabei mit Kupfer gebildete Gleichgewichtspotenzial hat den Charakter eines Redoxpotenzials. Bei diesem Korrosionsfall wird das Eisen anodisch oxidiert (aufgelöst) und dafür äquivalent am Kupfer Wasserstoffionen zu Wasserstoffatomen bzw. Molekülen kathodisch reduziert (abgeschieden).

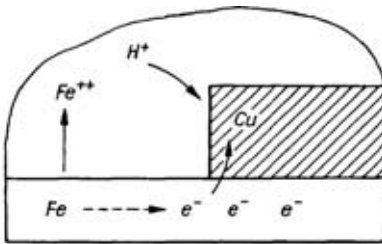
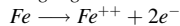
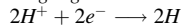


Bild 7.2 Darstellung des Wasserstoffkorrosionstyps Fe/H₂O/Cu

Vorgänge an der Anode (Fe):



Vorgänge an der Kathode (Cu):



Bei der elektrochemischen Korrosion können nach Art der Elektronennehmer im Elektrolyten unterschieden werden:

Wasserstoffkorrosionstyp

Hier sind die Wasserstoffionen (H^{+} bzw. H_3O^{+}) die vorherrschende Art der Elektronennehmer (Elektronenakzeptoren), die die kathodischen Vorgänge beeinflussen und eine Korrosion unter Wasserstoffgasentwicklung bedingen. Sie erfolgt bei einem pH-Wert unter 4 und tritt besonders bei der Korrosion von unedlen Metallen in stark sauren Medien auf, siehe Bild 7.2.

Sauerstoffkorrosionstyp

Hier sind die elektrochemischen Vorgänge an der Kathode nur unter Beteiligung des Elektronenakzeptors Sauerstoff (O_2) möglich und führen in der Primärreaktion zur Bildung von Hydroxydionen, die in Sekundärreaktionen mit anodisch gebildeten Ionen weiter reagieren können. Diese Korrosion läuft