

Physikalisches Grundpraktikum für Physiker/innen

Teil II

Alternative Energiequellen



Grundpraktikum Physik: <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/>



ALTERNATIVE ENERGIEQUELLEN

Themengebiet

- **Solarzelle**

- Halbleiter
- Bändermodell und Fermi-Verteilung
- Diode
- Gleichstrom
- Wechselwirkung mit Licht, Photometrie, optische Strahlung

- **Brennstoffzelle**

- Katalyse
- Elektrolyse
- Elektronenleitung, Ionenleitung
- Elektroden, Grenzflächen
- Wirkungsgrade

1 Vorbereitung

1.1 Literatur:

- **Wolfgang Demtröder: Experimentalphysik 2**
Elektrizität und Optik; Springer Lehrbuch 1995
 - Kapitel 2.8.5 S. 70
- **Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik**
16. Auflage (1989)
 - Kapitel 8.1, 12.3, 14.3, 14.4
- **C. Kittel: Einführung in die Festkörperphysik**
München, 1980
 - Kapitel 6,7,8

1.2 Fragen:

1. Erklären Sie den Unterschied zwischen Isolatoren, Halbleitern und Leitern anhand des Bändermodells. Welcher Statistik unterliegen Elektronen? Was versteht man unter Fermienergie bzw. Fermienergie? Erklären Sie damit die prinzipiellen Unterschiede bzgl. der Leitfähigkeit von Halbleitern und Metallen.
2. Erläutern Sie die Begriffe Eigenleitung, Störstellenleitung, Dotierung, Akzeptor, Donator, Raumladungszone, Erklären Sie die physikalischen Eigenschaften eines p-n-Übergangs. Verwenden Sie dazu u.a. das Energiebandenschema. Nennen Sie Beispiele aus der Technik.
3. Skizzieren Sie den prinzipiellen Aufbau einer Solarzelle und erklären sie ihre Wirkungsweise. Welche Materialien verwendet man und warum. Wie unterscheidet sich die Kennlinie einer Solarzelle von der einer Diode? Leiten Sie die zur Solarzellenkennlinie gehörige Gleichung her.
4. Erklären Sie den grundlegenden Unterschied zwischen Strahlungsfeldgrößen und photometrischen Größen?
5. Skizzieren Sie die spektrale Strahlungsdichte $\partial B / \partial \lambda(\lambda)$ der Sonne und einer Glühlampe. Tragen Sie die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges sowie diejenige von Germanium und Silizium mit in die Grafik ein.

6. Was versteht man unter Tandemsolarzellen und wie sind sie aufgebaut?
7. Skizzieren Sie den Aufbau einer Brennstoffzelle und erklären Sie ihre Wirkungsweise.
8. Skizzieren und erklären Sie die Kennlinie $I(U)$ eines Elektrolyseurs. Was versteht man unter der chemischen Bindungsenergie und der elektrochemischen Spannungsreihe?
9. Skizzieren Sie die Kennlinie $U(I)$ einer Brennstoffzelle. In welche Bereiche läßt sie sich zerlegen und welche physikalischen Effekte dominieren diese Bereiche?
10. Nennen Sie die dominierenden Effekte, die den Wirkungsgrad sowohl für Solarzelle, als auch für Brennstoffzelle/Elektrolyseur maßgeblich bestimmen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Solarzelle

2.1.1 Aufbau und Wirkungsweise einer Solarzelle

Eine Solarzelle dient der direkten Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Idealerweise sollte eine Solarzelle folgende Bedingungen erfüllen:

- Die Zelle soll Licht absorbieren und in freie Ladungsträger unwandeln.
- Sie soll einen geeigneten Mechanismus besitzen, die erzeugten Ladungsträger auch zu trennen.
- Sie sollte auf das angebotene Lichtspektrum optimiert sein, um bestmögliche Lichtausbeute zu gewährleisten.

Zum Aufbau von Solarzellen benutzt man geeignete **Halbleiter**, die durch **Dotierung** manipuliert werden, um den geforderten Trennungsmechanismus zu erzielen. Unter Dotierung versteht man den gezielten Einbau von Fremdatomen, in der Regel 3- bzw. 5-wertige Elemente (Akzeptoren, z. B. Indium bzw. Donatoren, z. B. Phosphor) wobei das Halbleitermaterial selbst in der Regel 4-wertig ist (z.B. Silizium). Die Folge einer solchen Dotierung ist, daß sich das thermische Gleichgewicht der Elektronen und damit das **Fermi-niveau** im Halbleiter anhebt (n-Dotierung) oder absenkt (p-Dotierung).

Bringt man nun einen n- und einen p-dotierten Halbleiter in (innigen) Kontakt, so diffundieren Elektronen nahe der Grenzschicht vom n-Gebiet in das p-Gebiet, wodurch eine **Raumladungszone** entsteht. Im n-Gebiet bleiben die positiven Donator-Rümpfe, im p-Gebiet die negativen Akzeptor-Rümpfe zurück, beide ortsfest. Es entsteht ein elektrisches Feld, das weitere Diffusion verhindert. Die dadurch entstandene Potentialdifferenz wird **Diffusionsspannung** U_D genannt. Sie ist materialabhängig und entspricht der Differenz der beiden zugrundeliegenden Fermi-niveaus. Durch diese Potentialdifferenz werden die Energiebänder verbogen, da das Fermi-niveau des Systems sowohl im p- als auch im n-Gebiet auf gleicher Höhe liegen muß.



Abbildung 1: Raumladungszone und Potentialverlauf eines p-n-Übergangs.

Fällt Licht genügender Energie auf einen Halbleiter, so entstehen Elektron-Loch-Paare, die normalerweise in kürzester Zeit wieder rekombinieren. Erzeugt Licht nun aber freie Ladungsträger in der Nähe dieses p-n-Übergangs, so können die gebildeten Elektron-Loch-Paare durch die Raumladungszone getrennt werden.

In der Technik diffundiert man in ein mindestens $200\mu\text{m}$ dickes p-Substrat eine sehr dünne ($0.3 - 0.5\mu\text{m}$) n-Schicht ein. Diese liegt auf der lichtzugewandten Seite, wird in kammartiger Struktur kontaktiert und in der Regel zusätzlich mit einer antireflektierenden Schicht bedampft. Die lichtabgewandte p-Schicht wird gewöhnlich auf der Rückseite mit Metall als Elektrode bedampft.

2.1.2 Kennlinie einer Solarzelle

An einem **unbeleuchteten, ungeschalteten p-n-Übergang** einer Halbleiterdiode treten folgende Ströme auf:

- Diffusionsstrom I_{D_p} , der mit der Wahrscheinlichkeit $\exp(-eU_D/k_B T)$ Löcher (p) vom p- ins n-Gebiet transportiert, also abhängig von der Potentialschwelle U_D ist.
- Feldstrom I_{F_p} aufgrund der Raumladungszone. Löcher, die in die Nähe der Raumladungszone gelangen, werden vom n-Gebiet ins p-Gebiet gezogen.

- Gleiches gilt für die Elektronen (n) im Leitungsband und die resultierenden partiellen Ströme I_{F_n} bzw. I_{D_n} , aber mit umgekehrtem Vorzeichen.

In obigem Fall ist der Gesamtstrom Null, der Diffusionsstrom und der Feldstrom kompensieren sich. Außerdem sind im stationären Fall die Löcherströme $I_{(D,F)_p}$ gleich den jeweiligen Elektronenströmen $I_{(D,F)_n}$.

$$I_{F_{p,n}} = I_{D_{p,n}} \quad (1)$$

Beleuchtet man nun den p-n-Übergang, so erhöht sich aufgrund der zusätzlich erzeugten Elektron-Loch-Paare der Feldstrom $I_{F_{n,p}}$, und das Gleichgewicht aus (1) verschiebt sich, so daß zwei prinzipielle Fälle unterschieden werden müssen:

1. Ist die Diode **kurzgeschlossen**, so bleibt der Diffusionsstrom $I_{D_{n,p}}$ gleich, da sich die Potentialschwelle zunächst nicht ändert. Der Überschuß an Feldstrom durch die zusätzlichen freien Ladungsträger fließt in Form des sogenannten Photostroms I_K ab.

$$I_{F_{n,p}} \rightarrow I_{F_{n,p}} + I_{K_{n,p}} \quad (2)$$

$$I_{Ges} = I_F + I_K - I_D = I_K \quad (3)$$

2. Im **Leerlauf** erzeugt das eingestrahelte Licht eine Spannung. Es muß dann nämlich $I_{Ges} = 0$ und somit

$$I_D = I_F + I_K \quad (4)$$

gelten. Eine Erhöhung von I_D bedingt aber eine verminderte Potentialschwelle und somit eine Spannung U_0 .

Im Fall eines beliebigen Verbrauchers an der beleuchteten Solarzelle wird sich also ein Photostrom $I < I_K$ und eine Spannung $U < U_0$ an der Zelle einstellen.

Die Kennlinie der Solarzelle ergibt sich also aus derjenigen der idealen Diode, sowie dem Anteil durch den Photostrom I_K :

$$\boxed{I_{Solar}(U) = I_{Diode}(U) - I_K} \quad \text{mit} \quad (5)$$

$$I_{Diode}(U) = I_R (\exp(eU/k_B T) - 1) \quad (6)$$

Wobei die Größe I_R proportional ist zu der Ladungsträgerkonzentration, der Diffusionslänge der Ladungsträger sowie deren inverser Lebensdauer. Unter Diffusionslänge versteht man die mittlere freie Wegstrecke bis zu der Rekombination der Ladungsträger,

die Lebensdauer ist durch die mittlere Zeitspanne definiert, in der die Ladungsträger frei sind.

Als Ersatzschaltbild einer Solarzelle ergibt sich somit:

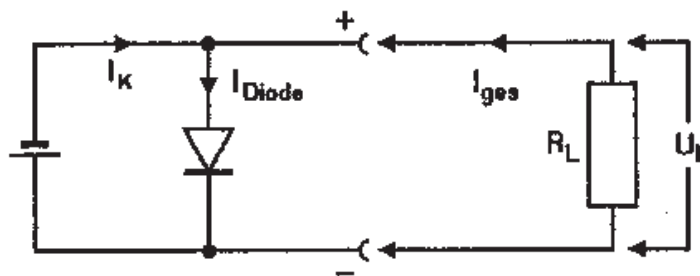


Abbildung 2: Ersatzschaltbild einer Solarzelle: R_L ist ein äußerer Lastwiderstand, I_K der durch Licht erzeugte Photostrom (als Stromquelle symbolisiert). Dieser addiert sich mit dem Diodenstrom (die Differenz von Diffusions- und Feldstrom) zum Gesamtstrom I_{ges} .

Um der Solarzelle maximale Leistung zu entnehmen, muß man denjenigen Punkt auf der Kennlinie finden, der das Produkt $P(U) = UI_{Ges}$ maximiert. Dies entspricht dem günstigsten **Arbeitspunkt** der Solarzelle, d.h. dem Punkt, bei dem die Solarzelle die größte Leistung abgibt. Dieser Punkt ist allerdings von der Strahlungsintensität abhängig.

Man definiert den sogenannten **Füllfaktor**

$$FF = \frac{I_{P_{max}} U_{P_{max}}}{I_K U_0} \quad \text{mit} \quad (7)$$

I_K : Kurzschlussstrom

U_0 : Leerlaufspannung.

der bei guten Solarzellen und definierter Einstrahlungsintensität ca. 0.8 beträgt, bei schlechteren Strahlungsbedingungen jedoch abnimmt.

Ziel dieses Versuches ist es, einen Kreislauf zu demonstrieren, der die mit ökologischen Mitteln (in diesem Fall der Solarzelle) gewonnene Energie einem Verbraucher zuführt. Da dieser Verbraucher i.d.R. örtlich getrennt vom Energieerzeuger fungiert, ist es in der Praxis unabdingbar, diese Energie in transportfähiger Weise zu speichern. Zunehmend von Interesse ist in diesem Zusammenhang die Wasserstoffwirtschaft, in der der Energieträger H_2 als transportfähiges **chemisches Speichermedium** genutzt wird. Dieser Energieträger kann im Verbraucher mit O_2 (zu 16% in Luft enthalten) in der sogenannten **Knallgasreaktion** zu Wasser oxidieren und die gespeicherte Energie wieder freisetzen. Seinerseits erzeugt wird H_2 mittels **Elektrolyse**, bei der z.B. durch Solarenergie oder andere alternative Energieformen Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt wird.

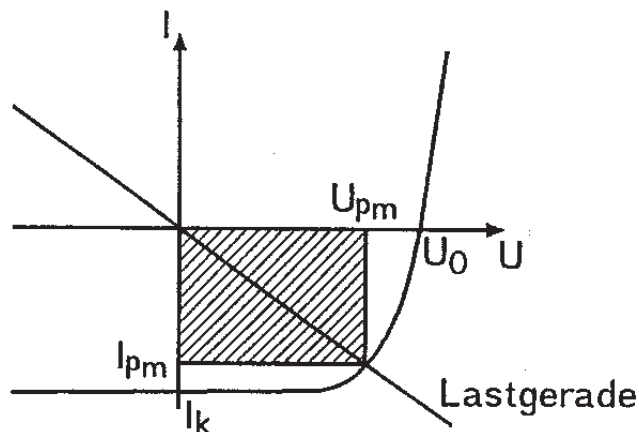


Abbildung 3: Kennlinie einer Solarzelle.

Die Katalyse, d.h. die kontrollierte Oxidation von Wasserstoff geschieht in der sogenannten **Brennstoffzelle**, die den Umkehrprozess bzgl. der im **Elektrolyseur** ablaufenden Elektrolyse darstellt.

2.2 Brennstoffzelle und Elektrolyseur

2.2.1 Allgemeine Wirkungsweise der Brennstoffzelle

Brennstoffzellen sind hocheffiziente elektrochemische Stromerzeuger. Sie haben gegenüber konventionellen Stromerzeugern ein viel einfacheres Funktionsprinzip: Die direkte katalytische Umwandlung des chemischen Energieträgers in elektrische Energie, im Gegensatz zu beispielsweise konventionellen „Kraftwerken,“ in denen der Umweg über Wärme und mechanische Energie zu einem wesentlich schlechteren Wirkungsgrad führt.

Das Grundprinzip der Brennstoffzelle ist die direkte Stromerzeugung aus einem **Brennstoff** (z. B. Wasserstoff) und einem **Oxidant** (z. B. Sauerstoff) in einem elektrochemischen Prozess. Die Zelle besteht aus zwei **Elektroden** und dem **Elektrolyten**. Die Anode wird mit dem Brennstoff und die Kathode mit dem Oxidanten versorgt, der Elektrolyt verbindet die beiden Elektroden miteinander. Er ermöglicht Ionentransport und ist gleichzeitig für Elektronen ein Isolator. An der Anode wird der Brennstoff oxidiert. Die dabei abgegebenen Elektronen fließen über einen äußeren Stromkreis zur Kathode. Hier wird der Oxidant durch Elektronenaufnahme reduziert. Durch den Elektronenfluss kann im äußeren Stromkreis Arbeit verrichtet werden. Der Ladungstransport **in** der Brennstoffzelle wird durch Ionenbewegung im Elektrolyten realisiert.

Eine Brennstoffzelle liefert also wie **Batterie** und **Akkumulator** Energie aus einem elektrochemischen Prozess. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass bei der Brenn-

stoffzelle die Elektroden selbst nicht umgewandelt werden, die Brennstoffzelle also nicht entladen werden kann. Sie ist vielmehr auf die externe Zufuhr von Brennstoff angewiesen.

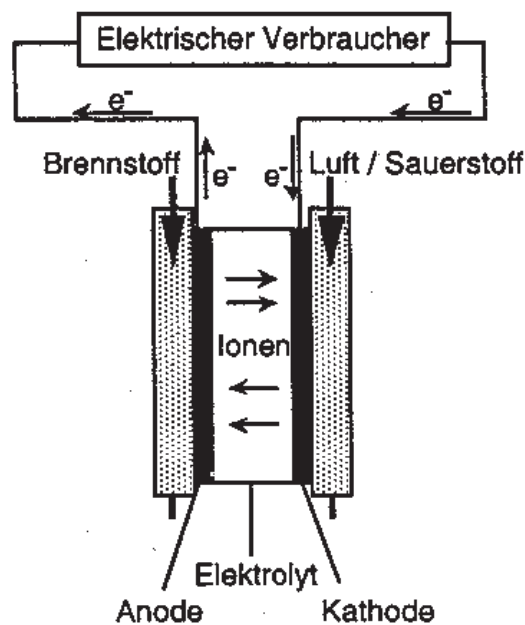


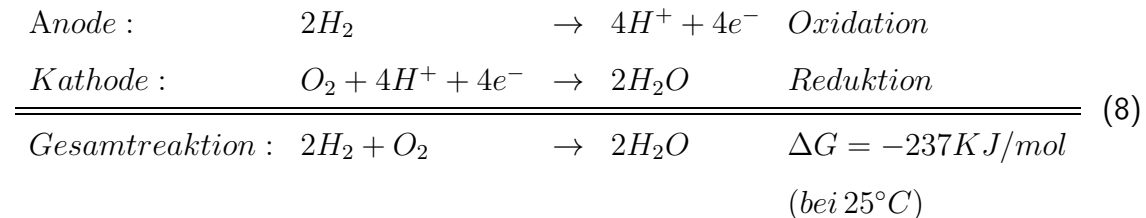
Abbildung 4: Schematisches Funktionsprinzip und grundlegender Aufbau einer Brennstoffzelle.

2.2.2 Funktionsprinzip der PEM Brennstoffzelle

Die hier vorliegende Brennstoffzelle ist in der Polymerelektrolyt-Membran-Technologie ausgeführt. Der Begriff **PEM** bezieht sich auf die protonenleitende Polymerfolie, die als Elektrolyt dient und bedeutet „Proton-Exchange-Membrane,“ im Gegensatz zu z.B. alkalischen Brennstoffzellen (6% Kalilauge).

Die PEM-Brennstoffzelle wird mit Wasserstoff und Sauerstoff betrieben. Die elektrochemische Umwandlung ist also praktisch der Umkehrprozess der Wasserelektrolyse im **Elektrolyseur**. Die an der Anode unter Abgabe von Elektronen oxidierten Wasserstoffionen diffundieren durch die ionenleitende Polymerelektrolytmembran (Elektrolyt) zur Kathode, wo sie mit Sauerstoff und den aus dem elektrischen Leiter zurückgeführten

Elektronen zu Wasser reagieren.



Die theoretisch erreichbare Maximalspannung einer Einzelzelle ergibt sich aus den thermodynamischen Daten der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser. Der Wert für eine Einzelzelle beträgt unter Standardbedingungen

$$U_0 = \frac{\Delta G}{zF} = 1.23 \text{ V} \quad (9)$$

Dabei ist F die **Faradaykonstante**. Sie gibt die pro Mol eines einwertigen Ions abgegebene Ladung an und beträgt 96484 C . z bezeichnet die Zahl der Elektronen, die zur Abscheidung eines Teilchens an der Elektrode ausgetauscht werden. Im Betrieb kommt es bei Stromfluss zu Verlusten (Überspannungen), z. B. durch Reaktionshemmungen, Innenwiderstände oder eine ungenügende Gasdiffusion. Dies führt in der Praxis zu niedrigeren Zellspannungen. Sie betragen in der Regel für die Einzelzelle $0.4 - 0.9 \text{ V}$.

Das Herzstück einer PEM-Brennstoffzelle ist die Membran-Elektroden-Einheit. Die Membran wird dabei mit fein verteiltem **Platinkatalysator** beschichtet (etwa $0.1 - 0.5 \text{ mg}$ Platin pro cm^2). Die so beschichteten Membranen werden anschließend mit porösen **Kohlenstoffelektroden** in der Brennstoffzelle verpresst. Dabei entsteht ein elektrischer Kontakt.

Die Polymerelektrolytmembran reicht durch den Anpressdruck teilweise in die porösen Elektrodenstrukturen hinein, es bildet sich eine Grenzfläche Gas/Katalysator/Elektrolyt aus. Der Katalysator muß sowohl zum Gas als auch zu den Protonen-Leitern (Polymerelektrolytmembran) und den Elektronen-Leitern (Elektroden) Kontakt haben. An diesen Stellen laufen die elektrochemischen Reaktionen ab (Abb. 5 rechts).

In der Reaktion werden Wasserstoff und Sauerstoff katalytisch umgesetzt, die Elektroden werden selbst nicht verändert. Die Platin-Teilchen wirken dabei als **katalytische Zentren**, die umso wirksamer sind, desto größer ihre Oberfläche ist.

Die Elektrolytmembran selbst arbeitet wie ein **Ionentauscher**. Die Protonen der in der Membran enthaltenen Säuregruppen sind beweglich. Ist die Membran feucht, so transportiert sie Protonen zwischen Anode und Kathode. Der elektrische Kontakt erfolgt über Stromableiter, in diesem Fall spezielle Edelstahllochbleche. Die Stromableiter müssen auch bei großen Brennstoffzellen den Gastransport und den Wasserabtransport gewährleisten, d. h. gas- und flüssigkeitsdurchlässig sein. Der Strom einer Brennstoffzelle ist proportional zur Fläche der Elektroden und erreicht Werte von bis zu 2 A/cm^2 .

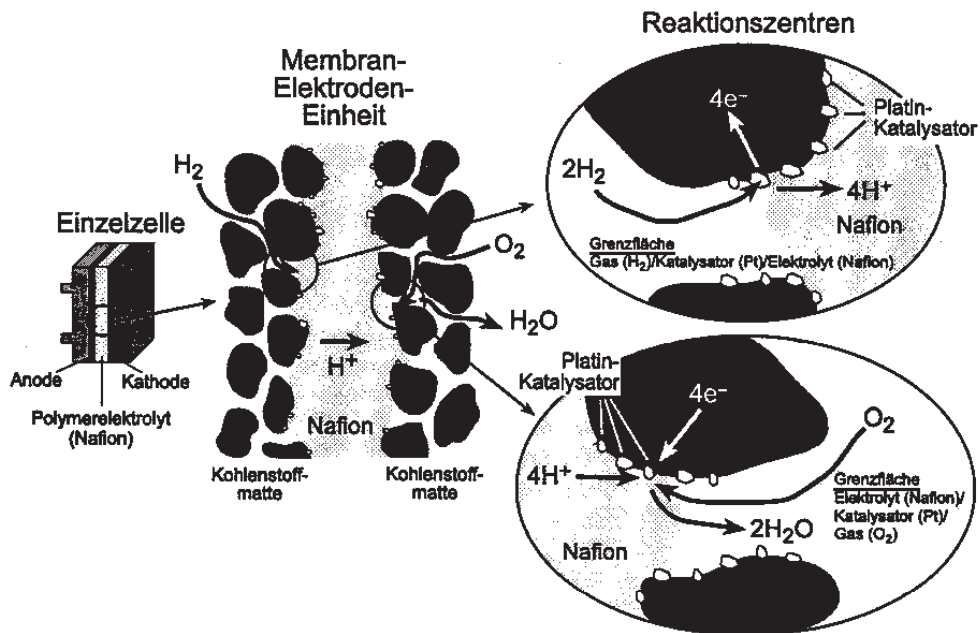


Abbildung 5: Schnitt durch eine (Polymerelektrolyt-)Membran-Elektroden-Einheit unter Verdeutlichung der bei der Brennstoffzellenreaktion ablaufenden Prozesse.

2.2.3 Spannungs-Strom-Kennlinie einer Brennstoffzelle

In Abb. 6 ist die Spannungs-Strom-Kennlinie der Brennstoffzelle schematisch dargestellt. Sie besteht aus 3 Bereichen, die typisch für elektrochemische Kennlinien sind.

U_0 ist die thermodynamisch maximal erreichbare Spannung, die eine Brennstoffzelle liefern kann. Dieser Wert ergibt sich aus der elektrochemischen Spannungsreihe $H_2/H_3O^+ // H_2O/O_2$ und beträgt $1.23V$. Die tatsächliche Zellspannung liegt wie gesagt stets darunter. Die Differenz zwischen gemessener und theoretischer Zellspannung bezeichnet man als **Überspannung**. Die Größe der Überspannung ist das entscheidende Merkmal für die Leistungsfähigkeit und Güte einer Brennstoffzelle. Sie setzt sich aus verschiedenen Beiträgen zusammen, deren Größe in Abhängigkeit vom Stromfluß den Verlauf der Kennlinie bestimmt. Die Einzelbeiträge sind:

1. Durchtrittsüberspannung - Einfluß des Katalysators

Bei kleinen Strömen und bei Spannungen nahe der thermodynamischen Spannung bestimmen die katalytischen Vorgänge an den Elektroden den Verlauf der Kennlinie. Dieser Verlauf ist in Abb. 6 durch einen exponentiellen Anstieg des Stromes mit der Überspannung gekennzeichnet. Entscheidend für die Höhe des Stroms ist die Geschwindigkeit der katalytischen Umsetzung der Gase H_2 und O_2 , d. h. die Geschwindigkeit, mit der die Elektronen durch die Grenzfläche Platin/Elektrolyt/Gas

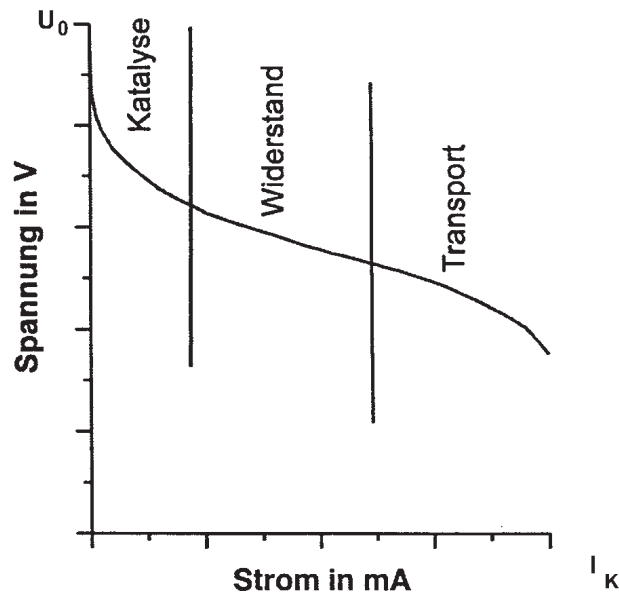


Abbildung 6: Spannungs-Strom-Kennlinie einer Brennstoffzelle eingeteilt in die drei Bereiche Katalyse, Innenwiderstand und Transport der Reaktanten.

hindurchtreten (in Abb. 5 rechts dargestellt). Die damit verbundene Überspannung bezeichnet man als **Durchtrittsüberspannung**. Die Größe der Oberfläche des Katalysators bestimmt somit maßgeblich die Gesamthöhe des erreichbaren Stroms.

2. Innenwiderstand - Einfluß des Aufbaus der Zelle

Jede Brennstoffzelle hat einen Innenwiderstand (Elektrolyt, Stromableiter, innerer Aufbau, externe Verkabelung, ...), der sich bei höheren Strömen zunehmend bemerkbar macht. Die Spannungs-Strom-Kennlinie ist in diesem Fall linear, d. h. die Spannungsabnahme ist proportional der Stromerhöhung. Dieser Widerstand muß gerade bei großen Brennstoffzellen gering gehalten werden, da es sonst zu großen Leistungseinbußen kommt.

3. Diffusionsüberspannung - Einfluß des Stofftransportes

Bei höheren Strömen wird der Antransport der Gase durch die poröse Elektrodenstruktur bestimmt (Abb. 5 Mitte). Eine **Diffusionsüberspannung** tritt dann auf, wenn die Gase am Katalysator schneller verbraucht werden, als sie dorthin diffundieren können. Typisches Indiz für das Auftreten einer Diffusionsüberspannung ist das „Abknicken“ der Spannungs-Strom-Kennlinie nach unten. Die Spannung der Brennstoffzelle wird mit zunehmendem Strom dann sehr schnell kleiner, die Zelle „verhungert.“

Ziel jeder Brennstoffzellenentwicklung ist es also, diese drei Überspannungsbeiträge zu minimieren. Dies erreicht man durch bessere Elektrokatalysatoren, gut leitende Materialien und Kontakte, sowie durch Optimierung der Elektrodenstrukturen und der Gasführungen.

2.3 Der Umkehrprozess - Elektrolyse

Der Umkehrprozess, also die Erzeugung von chemischer Energie aus elektrischer Energie geschieht im **Elektrolyseur**. Dieser ist im Prinzip wieder eine Brennstoffzelle, jedoch umgekehrt betrieben: Dazu wird dem System, statt es mit Brennstoff zu versorgen, das Endprodukt angeboten. Dieses wird unter Stromzufuhr elektrolysiert und zu Brennstoff umgewandelt.

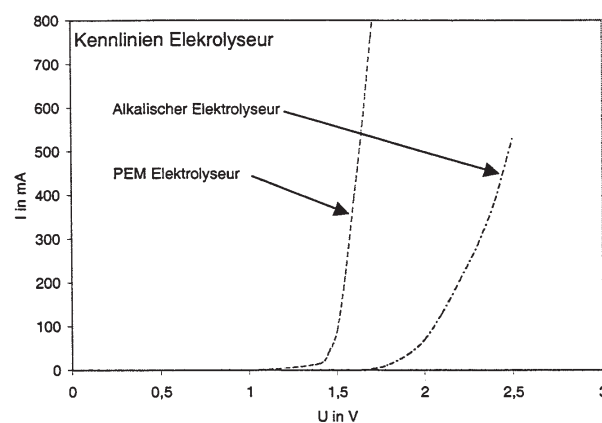


Abbildung 7: Strom-Spannungs-Kennlinie eines Elektrolyseurs.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseprozesses sieht wie folgt aus: Unterhalb einer gewissen Spannung fließt überhaupt kein Elektrolysestrom, da die notwendige **Zersetzungsspannung** (im H_2O -Fall $U_0 = 1.23V$) nicht erreicht wird. Die bei Spannungen $U \approx U_0$ entstehenden Gase werden von den Elektroden zunächst adsorbiert, es entsteht eine galvanische Zelle. Diese galvanische Zelle hat eine bestimmte Zellspannung (**Polarisationsspannung**), die einen Strom bewirkt. Dieser innere Strom wirkt dem Elektrolysestrom entgegen. Erhöht man die äußere Spannung, wird mehr Gas adsorbiert. Ab einem bestimmten Punkt erreicht der Gasdruck an den Elektroden den Wert des äußeren Luftdrucks, und an den Elektroden beginnen Gasblasen aufzusteigen. Oberhalb von $1.23V$ führt eine weitere Steigerung der äußeren Spannung dann zu einer kontinuierlichen Gasentwicklung mit einem steilen exponentiellen Anstieg der Stromstärke.

3 Experiment

Solarzelle

Aufgabe 1:

Messen Sie den Kurzschlussstrom einer Solarzelle in Abhängigkeit vom Abstand a der Lichtquelle. In wie weit beeinflussen Kontaktwiderstände etc. das Meßergebnis? Tragen Sie $\ln(I_K)$ gegen $\ln(a)$ auf und bestimmen Sie die Steigung. Vergleichen Sie ihren Wert mit dem theoretisch zu erwartenden.

Aufgabe 2:

Nehmen Sie $I(U)$ -Kennlinien einer Solarzelle auf. Bestimmen Sie dazu zuerst die Diodenkennlinie einer unbestrahlten Solarzelle. Wiederholen Sie die Messung danach für eine bestrahlte Solarzelle und mindestens zwei verschiedene Abstände zur Lichtquelle. Erklären Sie die Verschiebung des Stromes $I(U)$ mit zunehmender Bestrahlung. Bestimmen Sie aus den Meßkurven die Leistung $P(U)$. Wann gibt die Solarzelle die maximale Leistung ab? Wie groß ist bei P_{max} ihr Innenwiderstand? Bestimmen Sie den Füllfaktor.

Elektrolyseur & Brennstoffzelle

Achtung!!!

- Der Strom am Elektrolyseur darf **niemals 1A** überschreiten. Das entspricht einer Eingangsspannung von ca. **1.9V**.
- Unbedingt **POLUNG** der Geräte beachten!
- Sie haben es mit **hochentzündlichem Knallgas** zu tun, also Vorsicht!

Aufgabe 3:

Messen Sie die Kennlinie des Elektrolyseurs, indem Sie die Spannung zwischen 0 und ca. 1.75V variieren ($I < 1A$). Beobachten Sie bei Änderung der Spannung stets die Variation des Stromes, um stationäres Verhalten der Zelle zu gewährleisten.

Aufgabe 4:

Bestimmen Sie den Wirkungsgrad des Elektrolyseurs, indem Sie die erzeugte Gasmenge pro Zeit bestimmen. Stellen Sie dazu am Netzgerät einen konstanten Strom (ca. 500mA) ein und messen Sie das entstandene Wasserstoffvolumen in Abhängigkeit der Zeit. Dazu müssen Sie mittels der Absperrventile die Gasabfuhr zur Brennstoffzelle unterbrechen.

Ausstattung

- Rechner, Power-CASSY, Sensor-CASSY
- Solarzelle
- Lampe
- Elektrolyseur
- Brennstoffzelle
- Variabler Widerstand $0.1 - 10\Omega$
- Luxmeter