

Hauptfach- und APMB-Versuch

**Elektrolyse
und
Brennstoffzelle**

**M. Ohl, D. Özdemir,
N. Hartmann, M. Henßler,
B. Fleischer, J. Güsewell**

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Theoretische Grundlagen.....	3
2.1	Die Solarzelle	3
2.1.1	Physikalische Grundlagen.....	3
2.1.2	Technische Umsetzung	5
2.1.3	Die Solarzelle im Sonnenlicht.....	6
2.1.4	Kennlinien und Wirkungsgrad einer Solarzelle	8
2.2	Die Elektrolyse.....	9
2.2.1	Physikalische Grundlagen.....	9
2.2.2	Technische Umsetzung	9
2.2.3	Wasserstoffspeicherung	11
2.2.4	Kennlinien der Elektrolyse.....	12
2.3	Die Brennstoffzelle	14
2.3.1	Physikalische Grundlagen.....	14
2.3.2	Technische Umsetzung	15
2.3.3	Kennlinien von Brennstoffzellen	16
3	Versuchsdurchführung.....	18
3.1	Messungen an der Solarzelle.....	19
3.2	Messungen an der Elektrolyse-Zelle.....	20
3.3	Messungen an der Brennstoffzelle	23
4	Versuchsauswertung	25
4.1	Wirkungsgradberechnung der Versuchsanordnung	25
4.1.1	Solarzelle.....	25
4.1.2	Elektrolyse-Zelle	25
4.1.3	Brennstoffzelle	26
4.2	Wirkungsgradvergleich mit anderen fiktiven Energiesystemen	26
4.2.1	Solare Stromerzeugung	27
4.2.2	Wasserstoffgewinnung.....	27
	Literaturverzeichnis.....	29
	Datenblätter & Diagramme	30

1 Einführung

Zur Verhinderung des globalen Treibhauseffekts wurde im Jahr 1992 die Konferenz von Rio einberufen, mit dem Ziel, durch internationale Vereinbarungen den Ausstoß von Treibhausgasen nachhaltig zu reduzieren. Die BRD verpflichtete sich daraufhin, ihren CO₂-Ausstoß bis zum Jahr 2005 um 25 % (bezogen auf das Jahr 1990) zu vermindern. In dem anschließenden Protokoll von Kyoto wurde eine Reduzierung der Emissionen in dem Zeitraum von 2008 – 2012 um 21 % gegenüber dem Jahr 1990 zugesagt. An der gesamten CO₂-Emission sind in der BRD als größte CO₂-Quellen die Bereiche Verkehr und Energieerzeugung zu nennen.

Eine Möglichkeit zur Reduktion des Treibhausgases CO₂ ist die bessere Energieausnutzung bei Kraftwerken durch Verbesserung des durchschnittlichen Wirkungsgrads. So erreichen beispielsweise moderne GuD-Kraftwerke hohe Wirkungsgrade von über 57 % und damit geringere spezifische CO₂-Emissionen.

Als langfristige Möglichkeit wird der Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft diskutiert. Wasserstoff kann gespeichert werden und ist damit in Spitzenlastzeiten zur Energiegewinnung verfügbar. Das Problem, den Wasserstoff möglichst CO₂-neutral zu erzeugen, bestimmt hierbei Richtung und Tempo der Forschungen auf den Gebieten Photovoltaik, Elektrolyse- und Brennstoffzellen-Technologie.

Als Energiewandler für Wasserstoff besitzt die Brennstoffzelle einen entscheidenden Vorteil: Die meisten Brennstoffzelltypen können auch mit reformiertem Erdgas betrieben werden. In einer Übergangsphase besteht so bspw. die Möglichkeit, Brennstoffzellensysteme auf Erdgasbasis zu errichten, um diese dann nach dem Einstieg in eine Wasserstoffenergiewirtschaft gegebenenfalls direkt mit Wasserstoff zu betreiben. Vor allem durch den Einsatz von Brennstoffzellensystemen in Blockheizkraftwerken verspricht man sich einen hohen elektrischen Wirkungsgrad bei gleichzeitiger Einspeisung und Nutzung der entstehenden Wärme in Nahwärmenetzen zur Bereitstellung von Heizwärme in Wohnbauten und industrieller Prozesswärme. Aus der Nutzung der anfallenden Strom- und Wärmemengen gleichermaßen ergibt sich ein hoher Gesamtnutzungsgrad der eingesetzten Primärenergie und der zur Verfügung stehenden Anlagenkapazität.

Die Vor- und Nachteile beim Einsatz von Wasserstoff als Energieträger sollen in einem Versuch dargestellt werden. Hierzu wurde ein Versuchsstand aufgebaut, der im kleinen Maßstab verschiedene Messungen ermöglicht. In dem durchzuführenden Versuch wird in einem ersten Schritt elektrische Energie mit einer Solarzelle aus Strahlungsenergie gewonnen. Danach erfolgt die Umwandlung mit einer Elektrolyse-Zelle in chemische Energie (Wasserstoff, Sauerstoff) und in einem dritten Schritt mit einer Brennstoffzelle wieder in elektrische Energie.

Zunächst werden die technischen Grundlagen der Solarzelle, der Elektrolyse und der Brennstoffzelle erläutert. Der Versuch beinhaltet Messungen an

- einer Solarzelle,
- einer Elektrolyse-Zelle und an
- einer Brennstoffzelle,

die im Anschluss dargestellt werden. Die Auswertung der Messergebnisse im Rahmen der Versuchszeit besteht aus der Bestimmung des Gesamtwirkungsgrads für das Versuchsmodell und einem groben Vergleich mit ähnlichen Energiesystemen:

- Solare Stromerzeugung
- Wasserstoffgewinnung

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt sollen die technischen Grundlagen der Solarzelle, der Elektrolyse sowie der Brennstoffzellentechnologie dargestellt werden. Neben den physikalischen Zusammenhängen werden auch verschiedene Bauformen von Solarzellen, Elektrolyse-Apparaten und Brennstoffzellen kurz vorgestellt.

2.1 Die Solarzelle

Der physikalische Effekt, der der Photovoltaik zugrunde liegt, wurde bereits 1839 von Becquerel entdeckt. Allerdings konnte erst 1877 ein Stromfluss bei der Bestrahlung von Selen nachgewiesen werden und bis zur Erfindung des Transistors 1949 schenkte man den beobachteten Effekten keine weitere Beachtung. Erst im Zeitalter der Halbleitertechnik Anfang der fünfziger Jahre wurde die Idee von Becquerel wieder aufgegriffen und im Jahre 1954 die erste Solarzelle in den USA aus kristallinem Silizium entwickelt.

Zu Anfang kam die Solarzelle überwiegend zur Energieversorgung von Satelliten zum Einsatz. Erst die Ölkrise 1973 brachte die Endlichkeit fossiler Ressourcen wieder in das Blickfeld der Gesellschaft und führte zu verstärkten Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Photovoltaik. Ziel ist es seither, die noch hohen Kosten, die einer weiten Verbreitung der Technologie entgegenstehen, zu senken /1/.

2.1.1 Physikalische Grundlagen

Der physikalische Effekt, dem die Photovoltaik zugrunde liegt, beruht auf dem Verhalten des p-n-Übergangs einer Diode unter der Einwirkung von Licht. In diesem Übergangsbereich treffen freie Elektronen aus dem n-leitenden Material auf Elektronen-Fehlstellen im p-leitenden Bereich. Aufgrund des Konzentrationsgefälles erfolgt ein Ladungsausgleich in einer schmalen Schicht, der sogenannten *Diffusionszone* (vgl. Abb. 1).

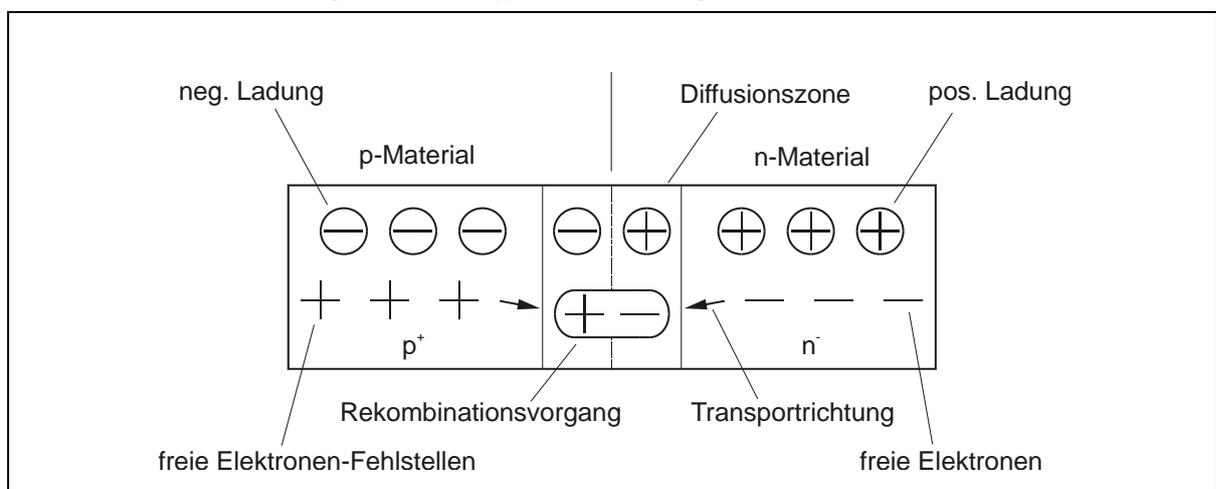


Abb. 1: Darstellung des p-n-Übergangs bei Ausbildung der Diffusionsspannung

Durch diesen Ausgleich, der als *Rekombination* bezeichnet wird, bildet sich in der Diffusionszone die sogenannte *Diffusionsspannung* aus. Treffen nun bei Lichteinfall Photonen auf den Halbleiterkristall, geben diese ihre Energie an das Kristallgitter ab. Die absorbierte Energie regt einzelne Kristallatome dazu an, Valenzelektronen freizusetzen, so dass ein positiv geladenes Atom zurückbleibt (*innerer Photoeffekt*); es entstehen *Ladungsträgerpaare*.

Die Diffusionsspannung trennt nun diese Paare; Elektronen-Fehlstellen werden vom n-Bereich in den p-Bereich und umgekehrt Elektronen aus dem p-Bereich in den n-Bereich transportiert (*photovoltaischer Effekt*), wodurch die Leerlaufspannung der Solarzelle entsteht. Werden nun beide Enden der Diode über einen Widerstand miteinander verbunden, findet ein Stromfluss statt.

In Stichworten zusammengefasst, gestaltet sich der Vorgang nach der in Abb. 2 dargestellten Abfolge.

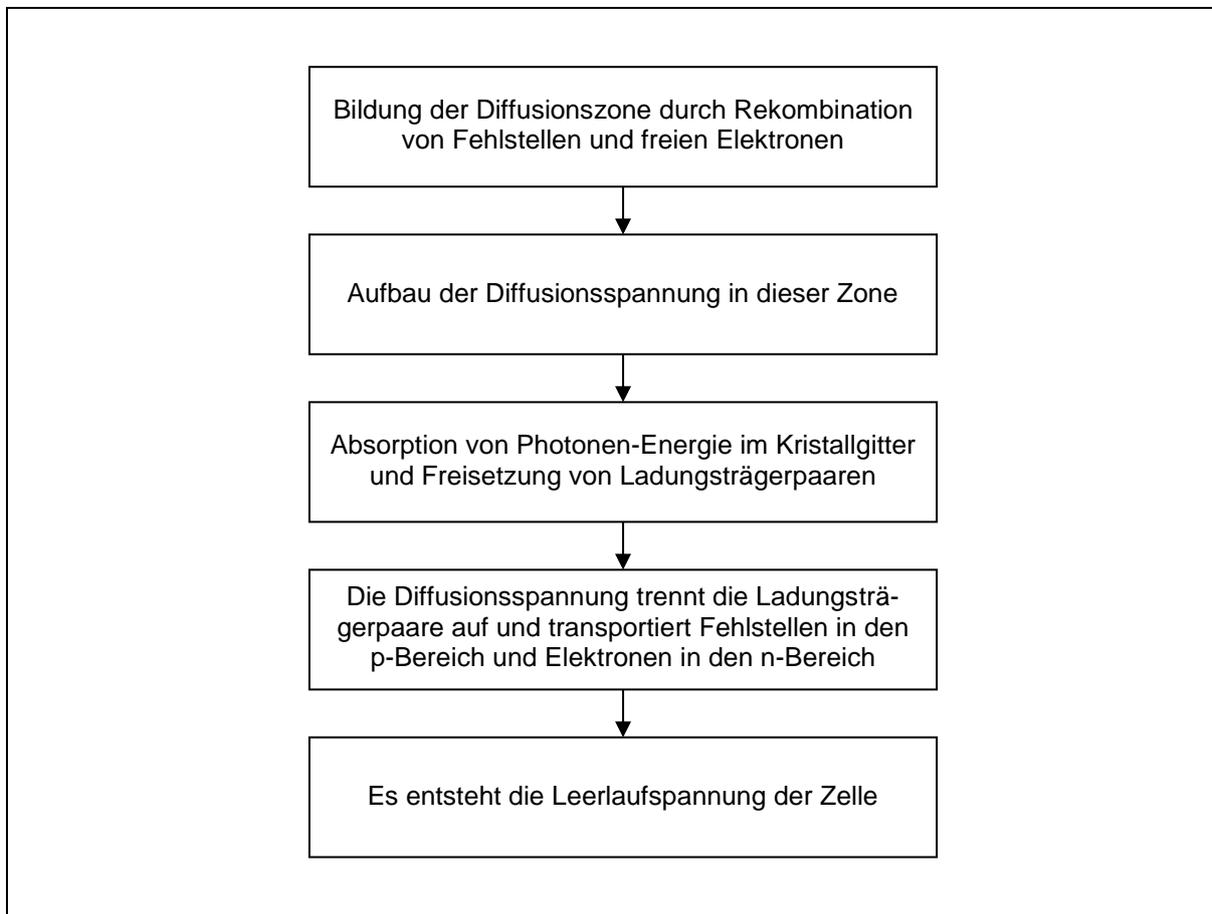


Abb. 2: Abfolge der Vorgänge in einer Solarzelle beim photovoltaischen Effekt

2.1.2 Technische Umsetzung

Der Aufbau von Solarzellen unterscheidet sich hinsichtlich des verwendeten Halbleitermaterials und des Herstellungsverfahrens. Beispielsweise besitzen monokristalline Solarzellen bessere Wirkungsgrade als polykristalline Zellen, jedoch ist die Herstellung eines großen Monokristalls sehr kostspielig und somit die monokristalline Zelle teuer.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Solarzellen und deren Eigenschaften. Die als *Laborzellen* bezeichneten Zellen haben in der Regel eine Größe von unter 10 cm² und weisen deutlich höhere Wirkungsgrade auf als Zellen aus großtechnischer Produktion. Dies beruht darauf, dass sich Laborwirkungsgrade aufgrund des bei großflächiger Herstellung nur schwer steuerbaren Beschichtungsprozesses nicht einfach umsetzen lassen. Zudem beeinflussen Veränderungsprozesse im Kristallbereich den Wirkungsgrad, der dadurch bei Bestrahlung innerhalb eines bestimmten Zeitraumes auf den sogenannten *stabilen Wirkungsgrad* absinkt.

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Solarzellen-Typen /4/, /5/

Solarzellentyp, Werkstoffe	Aufbau, Eigenschaften	Modul-Wirkungsgrade	Bemerkungen
Monokristalline Silizium-Solarzelle	Dicke: 250-350 µm	großflächig 10-15 %	<ul style="list-style-type: none"> Eingeführte Zelle Module werden im industriellen Maßstab gefertigt und sind auf dem Markt verfügbar
Polykristalline Silizium-Solarzelle		10 – 15 %	<ul style="list-style-type: none"> Eingeführte, preiswerte Zelle für Kleinanwendungen (Taschenrechner, Uhren) mit geringem Energiebedarf
Amorphes Silizium, (a-Si)	Dünnschichttechnologie, < 5 µm	großflächig 5 – 6 %, Labor 7,5-13 %	<ul style="list-style-type: none"> Einziges Dünnschichtzelle, die in größeren Stückzahlen gefertigt wird Marktanteil ca. 20 %
Galliumarsenid, (GaAs)	Dünnschichttechnologie, < 5 µm	Labor 24-30 %	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungsstadium, zunehmender Einsatz im Weltraum-Markt Teurer als andere Dünnschicht-SZ (CIS) Forschung dominiert die USA und neuerdings Japan Es wird erwartet, mit dieser Materialgruppe 30-40 % Wirkungsgrad zu erreichen
Kupferindium (Gallium) diselenid, CuIn(Ga)S ₂	CIS bzw. CIGS-Zelle, Dünnschichttechnologie, < 5 µm	großflächig 10 – 12 %, Labor 12-17 %	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungsstadium, unmittelbar vor der Fertigung Es wird erwartet, großflächige Zellen mit Wirkungsgraden um 10 % herstellen zu können
Galliumtellurid, (CdTe)	Dünnschichttechnologie, < 5 µm	Labor 9-16 %	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungsstadium, jedoch ist der Einsatz von Cadmium umweltproblematisch
Kristalliner Siliziumfilm	Dünnschichttechnologie, 20-30 µm	Labor 9-21 %	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungsstadium Verbindet Si-Zelle auf Waferbasis (Elektronikindustrie) mit der Dünnschichttechnologie

Aufgrund des hohen Materialverbrauchs der 250-350 µm dicken monokristallinen Solarzellen geht der Trend hin zur Dünnschichttechnologie mit Dicken unter 10 µm. Ein Problem stellt

allerdings die großflächige Abscheidung der verwendeten Halbleitermaterialien dar, das vor dem Übergang zur Großproduktion von Dünnschichtsolarzellen gelöst werden muss.

2.1.3 Die Solarzelle im Sonnenlicht

Wird eine Solarzelle dem Sonnenlicht ausgesetzt, wirkt auf sie eine Einstrahlung abhängig von der Witterung und geographischen Position. Abb. 3 stellt das Strahlungsspektrum der Sonne außerhalb der Erdatmosphäre (Extraterrestrische Sonne) sowie auf der Erde (Terrestrische Sonne) dar. Vergleichend ist das Spektrum eines schwarzen Körpers dargestellt, wobei die Temperatur von 5.900 K ungefähr der Temperatur der Sonnenstrahlung entspricht. Deutlich sichtbar ist bei der Terrestrischen Strahlung der Einfluss der atmosphärischen Gase, welche einen Teil der Wellenlänge absorbieren und somit die Strahlung vermindern.

Mit dem Strahlungsspektrum der Terrestrischen Sonnenstrahlung werden die Solarzellen im Labor beleuchtet und die Wirkungsgrade ermittelt, um realistische Werte für den tatsächlichen Einsatz von Solarzellen zu erhalten. Würde stattdessen ein Strahler mit 3.200 K Farbtemperatur verwendet, wären die gemessenen Wirkungsgrade der Solarzelle nicht mehr vergleichbar. Daher ist bei der Bestimmung von Kenngrößen bei Solarzellen die Kenntnis des verwendeten Strahlungsspektrums wichtig.

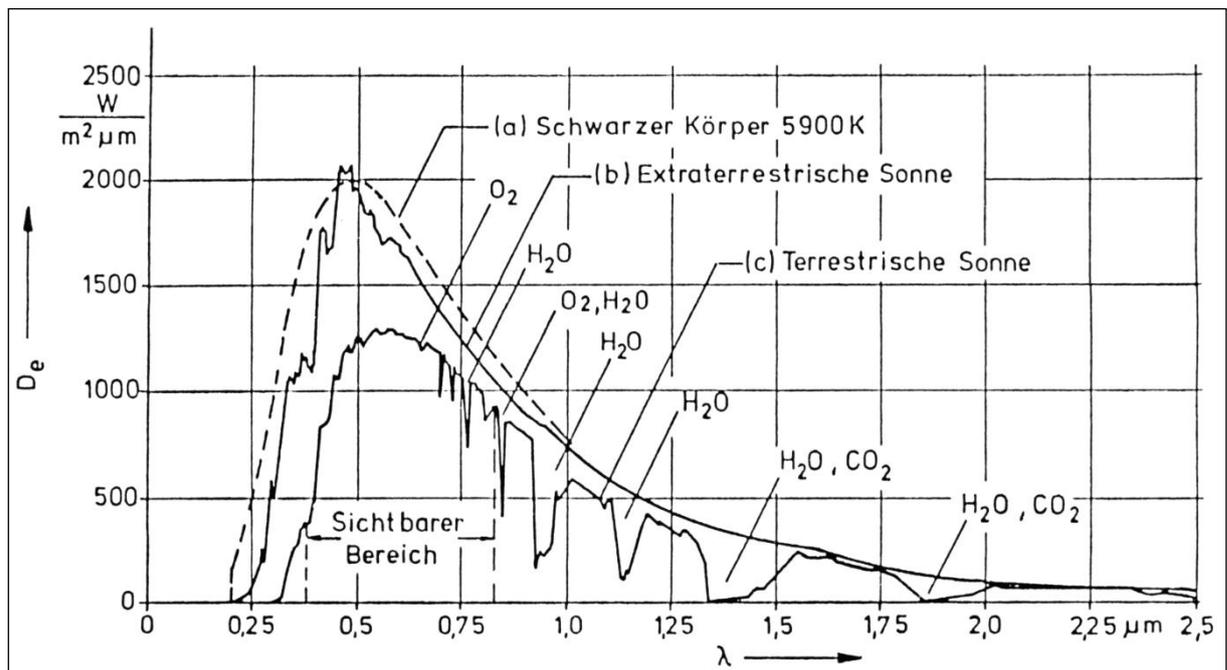


Abb. 3: Strahlungsspektrum der Sonne vor und nach dem Passieren der Erdatmosphäre /3/

Einfluss auf die Energieausbeute von Solarzellen hat auch die Aufstellung einer Photovoltaik-Anlage. Dabei sind die Werte der jährlichen horizontalen Globalstrahlung relevant (vgl. Abb. 4). Der Bereich von Baden-Württemberg ist hier grau schraffiert und hat mit 1.130-1.174 kWh pro Quadratmeter und Jahr höhere Werte als die nördlichen Bundesländer, so dass im Südwesten eine vergleichsweise höhere Energieausbeute erzielt werden kann. Entscheidend ist zudem die korrekte Ausrichtung der Anlage nach Süden. Dabei variieren die Empfehlungen für den Ausrichtungswinkel zwischen 30° und 45° .

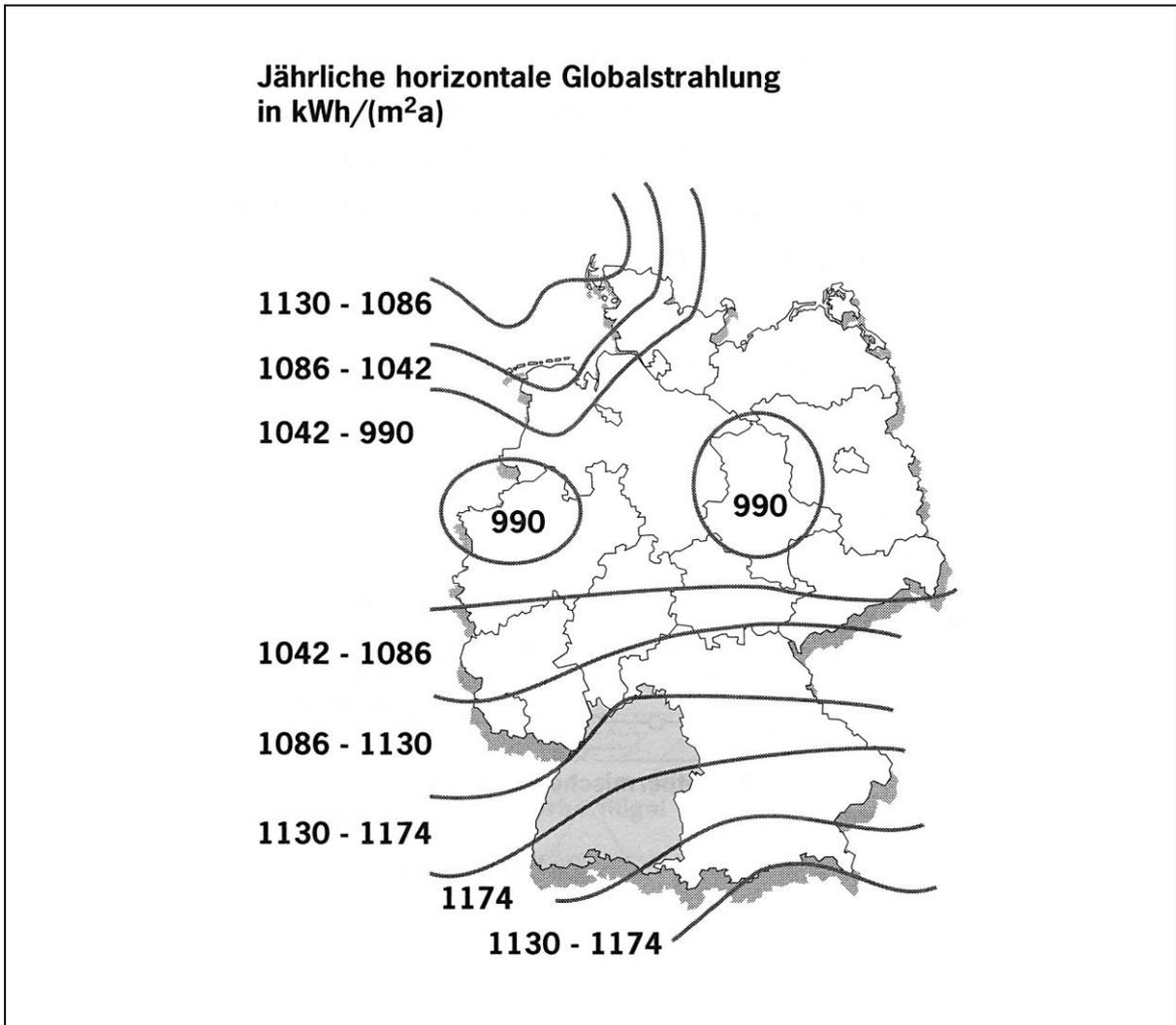


Abb. 4: Jährliche horizontale Globalstrahlung in den verschiedenen Regionen der BRD /6/

2.1.4 Kennlinien und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Messungen an der Solarzelle erfolgen stets durch die Bestimmung der Spannungs-Strom-Kennlinie, die in Abb. 5 am Beispiel der Solarzelle Siemens SM 144/36 dargestellt ist.

In diesem Schaubild kann der Einfluss unterschiedlicher Temperatur und Einstrahlung auf die Solarzelle abgelesen werden. Weiterhin sind Linien konstanter Leistung und der Punkt der maximalen Leistung (MPP = Maximum Power Point) eingezeichnet.

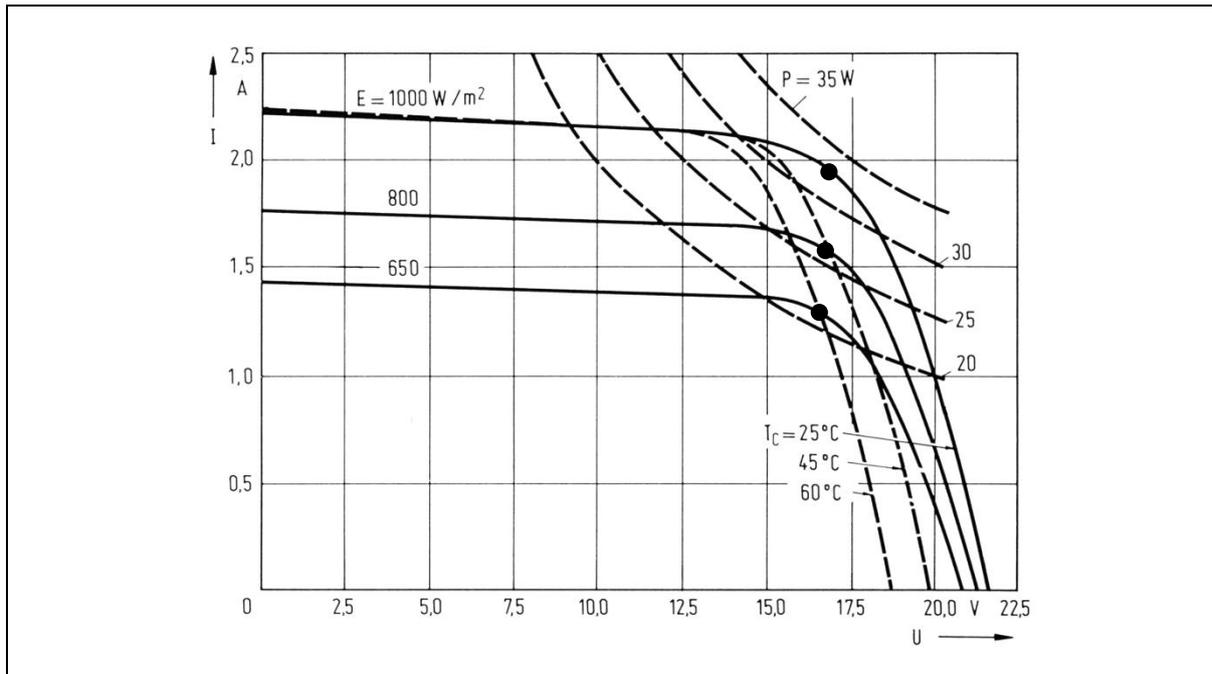


Abb. 5: Spannungs-Strom-Kennlinie der Solarzelle Siemens SM 144/36

Zur Ermittlung der Kennlinien wird die Spannung und der Strom unter Last nach der in Abb. 6 gezeigten Messanordnung bei verschiedenen Lastzuständen ermittelt und aufgetragen. Bei steigender Belastung (kleinere Werte von R_L) steigt der Strom I_L , die Spannung U_L wird geringer. Aufgrund der Belastung mit R_L entsteht ein Spannungsteiler, der die nutzbare Zellenspannung verringert. Dieser Spannungsabfall unter Belastung wird durch den Innenwiderstand R_i der Solarzelle verursacht (vgl. Abb. 6).

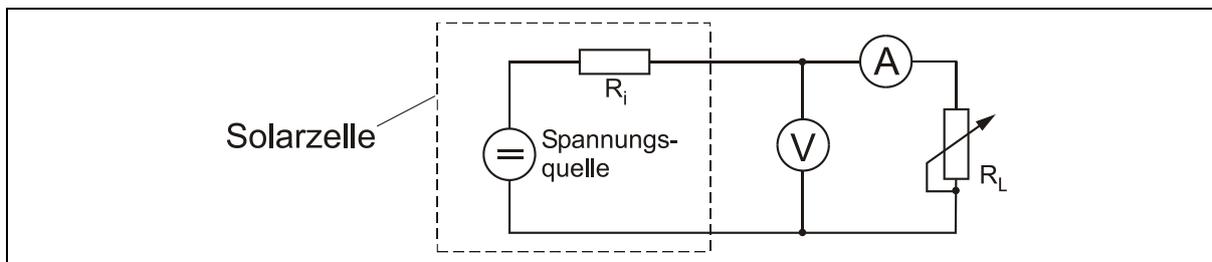


Abb. 6: Innenschaltbild einer Solarzelle mit Spannungsquelle und Innenwiderstand sowie äußerer Beschaltung zur Ermittlung der Spannungs-Strom-Kennlinie

Für die Bestimmung des Wirkungsgrads der Umsetzung von Strahlungsenergie in elektrische Energie ist die erzeugte elektrische Leistung als Produkt aus Spannung und Strom zu ermitteln. Der Punkt mit der maximalen Leistung (MPP) wird dazu aus dem aufgezeichneten Schaubild abgelesen.

Um den Wirkungsgrad der Solarzelle schließlich zu berechnen, ist zudem der Wert der zugeführten Strahlung zu ermitteln. Der Wirkungsgrad berechnet sich dann gemäß der Formel (2-1).

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV,MPP}}{\dot{E}_{PV,zu}} \quad (2-1)$$

2.2 Die Elektrolyse

Seit mehr als 80 Jahren wird die Elektrolyse in ihrer konventionellen Form, der alkalischen Elektrolyse, eingesetzt. Kennzeichnend für die Elektrolyse ist die Anwendung der Gesetze von Faraday (1791 bis 1867), die den Zusammenhang zwischen abgeschiedener Stoffmasse, Stromfluss und Zeit herstellen, und somit zu den Grundlagen elektrochemischer Reaktionen gehören.

2.2.1 Physikalische Grundlagen

Chemisch betrachtet stellt die Elektrolyse eine besondere Redoxreaktion dar. Im Gegensatz zu herkömmlichen Redoxreaktionen zwischen chemischen Elementen spricht man bei der Elektrolyse von einer *erzwungenen* Redoxreaktion, da hier die Reaktion nur durch Elektronenaustausch in einer ionischen Lösung stattfindet, hervorgerufen durch einen von außen erzwungenen Stromfluss.

Ein einfaches Beispiel soll die Vorgänge bei der Elektrolyse veranschaulichen: Werden zwei Metallstreifen aus unterschiedlichem Material links und rechts in ein mit Salzlösung gefülltes Glas getaucht, kann zwischen den beiden Metallstreifen eine elektrische Spannung gemessen werden. Es findet eine elektrochemische Reaktion statt, bei der sich eine der beiden Metallplatten allmählich auflöst und in ionischer Form in der Lösung vorliegt.

Diese Form der Energiespeicherung kennen wir als Batterien bzw. Akkumulatoren. Kehrt man dieses Experiment um, findet ebenfalls eine elektrochemische Reaktion statt, mit dem Unterschied, dass nun die verwendete Salzlösung elektrochemisch zerlegt wird.

Sehr weit verbreitet ist die Chlor-Alkali-Elektrolyse, ein Verfahren, mit dem aus NaCl- bzw. KCl-Lösungen Chlor und Natronlauge gewonnen werden kann. Entsprechend kann mit Hilfe der Elektrolyse auch Wasser in seine Ausgangsbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt werden, wobei die Reaktion der Formel (2-2) entspricht.



2.2.2 Technische Umsetzung

In der Anlagentechnik existieren verschiedene Elektrolyseverfahren, wobei eine Unterscheidung hauptsächlich aufgrund unterschiedlich hoher Arbeitsdrücke und Temperaturen für

die Umsetzung von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff erfolgt /2/. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal stellt die Art des verwendeten Elektrolyten dar, wobei folgende Arten zur Anwendung kommen:

- die alkalische Elektrolyse,
- Elektrolysezellen mit Protonenaustauschmembranen sowie
- die Hochtemperaturelektrolyse in Festoxid-Elektrolysezellen.

Bei der *alkalischen Elektrolyse* trennt eine poröse Keramik- bzw. Asbestmembran die beiden Elektrodenräume und verhindert die Vermischung der Gase an Anode und Kathode. Als Elektrolyt wird hauptsächlich Kalilauge verwendet. Die Alkalielektrolyse arbeitet mit geringen Arbeitsüberdrücken von 0,2 - 0,5 MPa.

Bei Elektrolysezellen mit *Protonenaustauschmembran* (PEM) erfolgt die Trennung der Elektrodenräume durch eine spezielle Kunststoffmembran, die einerseits eine Vermischung der beiden Gase verhindert, andererseits den für die Reaktion notwendigen Protonenaustausch zwischen Kathode und Anode ermöglicht. In der Praxis werden hier Effizienzkennwerte zwischen 50 und 70 % erreicht.

Festoxid-Elektrolysezellen eignen sich ebenfalls zur Trennung von Wasserstoff und Sauerstoff bei Arbeitstemperaturen von 800 - 1.000 °C. Zugrunde liegt die Technologie der Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die einen Oxidkeramik-Elektrolyten besitzen, der erst bei den hohen Arbeitstemperaturen für elektrochemische Vorgänge genügend leitfähig wird.

Wird die Elektrolyse, entsprechend dem durchzuführenden Versuch, mit Hilfe einer Protonenaustausch-Elektrolysezelle betrieben, bildet sich an der Anode Sauerstoff



und an der Kathode Wasserstoff



Abb. 7 zeigt den Aufbau einer Protonenaustausch-Elektrolyse-Zelle (PEM-Zelle) mit einer Solarzelle als Stromquelle.

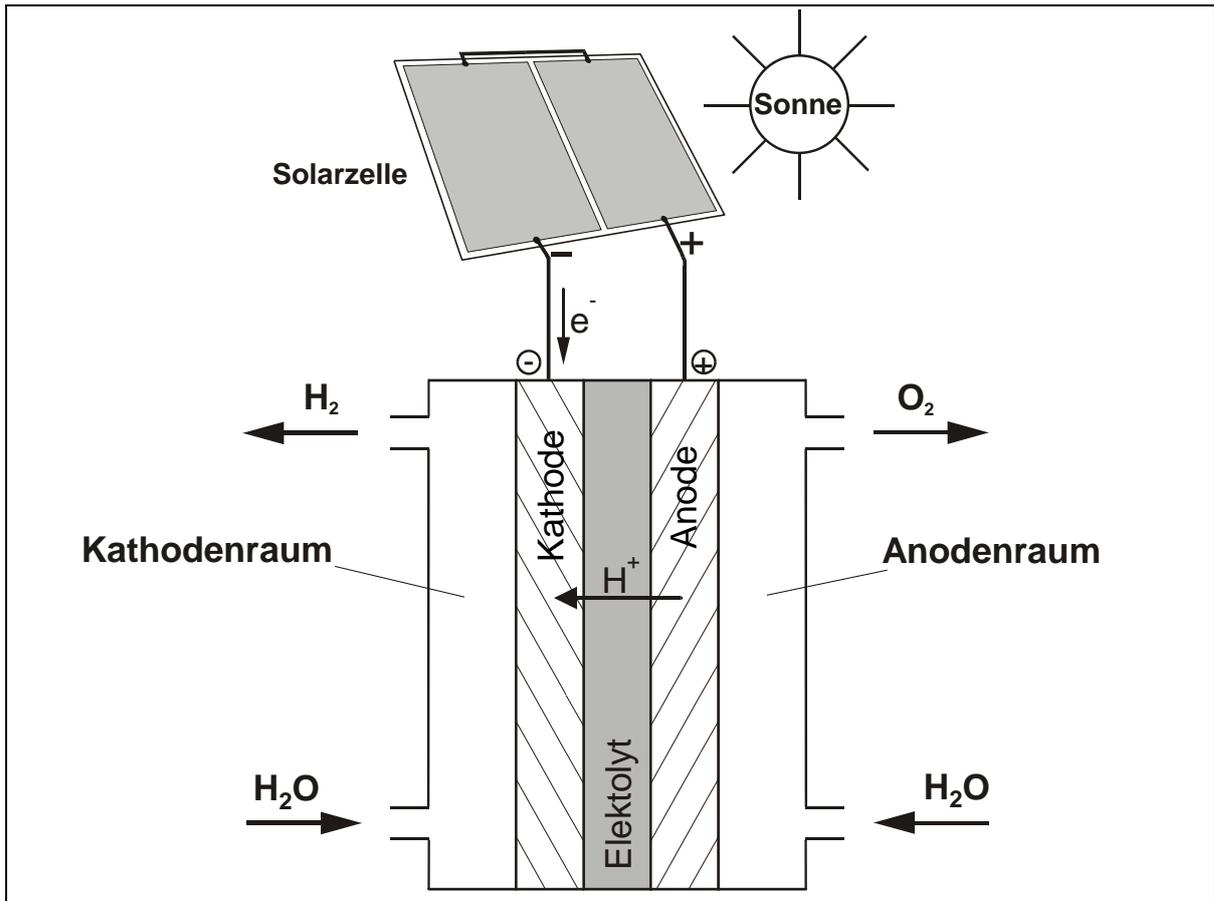


Abb. 7: Schematischer Aufbau einer Elektrolyse-Zelle mit Protonenaustauschmembran

2.2.3 Wasserstoffspeicherung

Bei einer Energieversorgung mit Wasserstoff als Energieträger stellt sich die Problematik der möglichst platzsparenden Speicherung von Wasserstoff. Diese kann bei gasförmigen oder flüssigen Zustand von H₂, sowie als chemische Verbindung des Wasserstoffs in Hydridspeichern erfolgen.

Beim Vergleich der in Tabelle 2 aufgeführten Energiedichten fallen die hohen volumenbezogenen Energiedichten für fossile Kraftstoffe im Vergleich zu Wasserstoff deutlich auf. Da besonders bei mobilen Anwendungen auf eine hohe volumenbezogene Energiedichte im Interesse kleiner Speichervolumina geachtet wird, liegen hier die Vorteile konventioneller Kraftstoffe auf der Hand. Dahingegen liegt die massenbezogene Energiedichte von Wasserstoff mit 33,3 kWh/kg deutlich höher als bei Erdgas bzw. Benzin mit 13,9 bzw. 12,7 kWh/kg, was den Einsatz von H₂ in der Raumfahrt erklärt, bei dem ein möglichst geringes Gewicht angestrebt wird.

Je nach Art der Speicherung stellt die oft aufwendige Handhabung beim Verteilen des Wasserstoffs unter hohem Druck bzw. bei niedrigen Temperaturen ein Problem dar.

Tabelle 2: Übersicht der Speichermöglichkeiten und Energiedichten von Wasserstoff im Vergleich zu anderen Brennstoffen /2/

Energieträger	Speicherform	Massenbezogene Energiedichte [kWh/kg]	Volumenbezogene Energiedichte [kWh/l]
Wasserstoff	gas (300 bar)	33,3	0,75
	flüssig (-273 °C)	33,3	2,36
	Metallhydrid	0,58	3,18
Erdgas	gas (300 bar)	13,9	3,38
	flüssig (-162 °C)	13,9	5,80
Methanol	flüssig	5,6	4,42
Benzin	flüssig	12,7	8,76
Diesel	flüssig	11,6	9,70

2.2.4 Kennlinien der Elektrolyse

Wird ein Elektrolysevorgang gestartet und die Betriebsspannung langsam erhöht, kann beobachtet werden, dass eine Stoffabscheidung erst eintritt, wenn die Spannung einen bestimmten Wert erreicht hat. Die Höhe dieser sogenannten *Zersetzungsspannung* hängt ab von der elektrochemischen Potentialdifferenz der beiden Halbzellen (Anode–Kathode) und beträgt für die Wasserzersetzung bei neutralem pH-Wert ($\text{pH} = 7$) 0,82 V. Nach Erreichen der Zersetzungsspannung steigen Stromstärke und damit auch Stoffabscheidung mit zunehmender Spannung linear an (vgl. Abb. 8). Steigen die Stoffströme weiter an, behindern sich die Moleküle an den Elektroden zunehmend (*Diffusionshemmung*), mit der Folge, dass sich trotz zunehmender Spannung die Stoffabscheidung auf einen Maximalwert einstellt.

Für die Bestimmung der Effizienz der Elektrolyse-Zelle gibt das 1. Faraday-Gesetz Auskunft über Zusammenhänge zwischen Stromfluss I , Zeit t und der elektrochemisch abgeschiedenen Gas- bzw. Feststoffmenge m :

$$m = k \cdot I \cdot t \quad (2-5)$$

Die Konstante k wird als elektrochemisches Äquivalent bezeichnet und ist für verschiedene chemische Elemente definiert. Die Berechnung nach Formel 2-5 ergibt die Stoffmenge, die theoretisch maximal abgeschieden werden kann, in der Praxis vermindern jedoch Verluste (z.B. die Diffusionshemmung) die Effizienz der Elektrolyse.

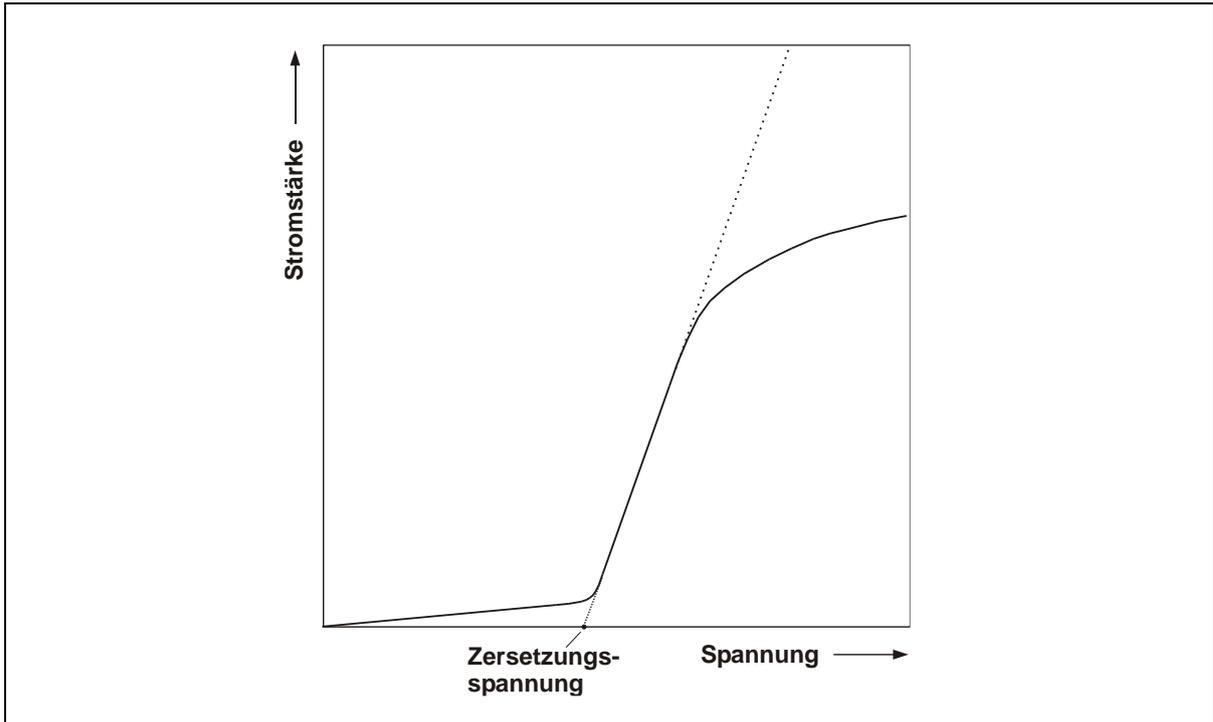


Abb. 8: Spannungs-Strom-Kennlinie bei einer Elektrolyse /7/

Für die Bestimmung der Effizienz wird der theoretisch erzeugbaren Menge an Wasserstoff nach dem 1. Faraday-Gesetz die tatsächlich erzeugte Wasserstoffmenge gegenübergestellt. Dazu ist es erforderlich, die entstandene Wasserstoffmenge in einem betrachteten Zeitraum zu messen. Die Effizienz kann dann gemäß der Formel (2-6) ermittelt werden.

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\text{Menge des erzeugten H}_2}{\text{Menge H}_2 \text{ nach dem Faraday-Gesetz}} \quad (2-6)$$

Der energetische Wirkungsgrad der Elektrolyse errechnet sich durch Gegenüberstellung der Menge an erzeugter chemischer Energie mit der aufgewendeten elektrischen Leistung nach der Formel (2-7).

$$\eta_{EZ} = \frac{\dot{Q}_{H_2}}{P_{EZ}} \quad (2-7)$$

Die Menge an erzeugter chemischer Energie entspricht dabei dem Brennwert des erzeugten Wasserstoffs.

2.3 Die Brennstoffzelle

Ebenfalls im Jahr 1839 entdeckte der englische Physiker Grove (1811 bis 1896) das Prinzip der Brennstoffzelle. Er hatte zunächst Wasserdampf an einem Platindraht erhitzt und damit in Sauerstoff und Wasserstoff getrennt. Anschließend konnte er nachweisen, dass diese Reaktion umkehrbar ist und wandelte die chemische Energie direkt über eine kalte Verbrennung in elektrische Energie um.

Das Prinzip der elektrochemischen Energieerzeugung geriet danach in Vergessenheit, zugunsten des von Werner von Siemens entdeckten elektrodynamischen Prinzips und der Entwicklung entsprechender Generatoren. Erst in den sechziger Jahren wurde für Sonderanwendungen z.B. Raumfahrzeuge und Unterseeboote die Brennstoffzelle wiederentdeckt.

2.3.1 Physikalische Grundlagen

Die Erzeugung von elektrischem Strom mit Hilfe der Brennstoffzelle basiert auf elektrochemischen Vorgängen zwischen Wasserstoff und Sauerstoff. Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff ist elektrochemisch betrachtet ein Vorgang mit Elektronenübergang. Werden beide Stoffe miteinander in Verbindung gebracht, findet eine heftige, explosionsartige Reaktion (Knallgas-Reaktion) statt. Der Wasserstoff reagiert unter Elektronenabgabe (Oxidation) mit dem Sauerstoff, der seinerseits Elektronen aufnimmt (Reduktion).

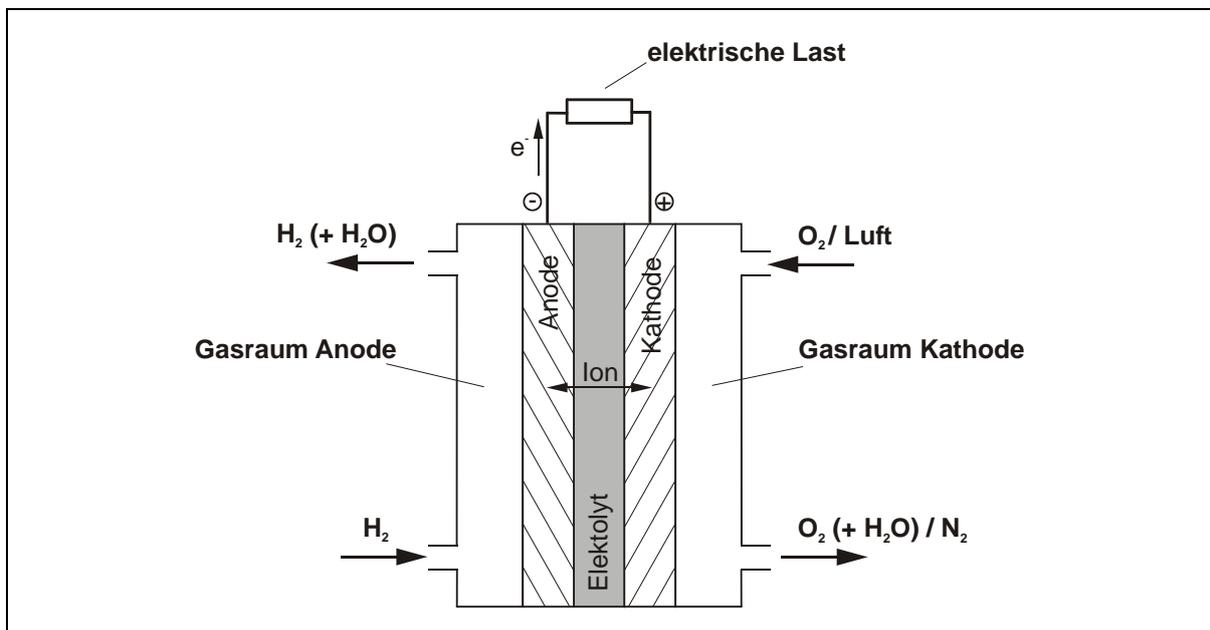
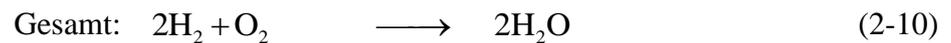


Abb. 9: Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle

Wird nun diese freie Reaktion durch Trennung des Reaktionsraumes verhindert und mit Hilfe eines Elektrolyten lediglich eine Übertragung von Ionen zugelassen, können die Elektronen über einen Lastwiderstand geleitet und so ein Stromfluss erzwungen werden (vgl. Abb. 9). Dabei wird die (temperaturabhängige) freie Enthalpie der Reaktion zur Stromgewinnung genutzt.

Die im durchzuführenden Versuch verwendete Brennstoffzelle beruht auf dem Protonenaustausch-Prinzip über eine spezielle Kunststoffmembran. Diese Zellen werden als PEMFC bzw. PEM-Brennstoffzellen bezeichnet. Die Anoden- und Kathodenreaktionen einer solchen Brennstoffzelle mit Protonenaustausch-Membran zeigen nachfolgende Formeln (2-8) bis (2-10).



2.3.2 Technische Umsetzung

Eingeteilt werden die verschiedenen Brennstoffzellen in der Regel anhand der unterschiedlichen Betriebstemperaturen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Brennstoffzellen-Typen, mit den jeweiligen Betriebstemperaturen, Elektrolyten, Brennstoffanforderungen und Besonderheiten.

Tabelle 3: Übersicht der verschiedenen Brennstoffzellen-Typen /8/, /9/

Parameter	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	wässrige KOH-Lösung	Protonenaustauschmembran (fest)	Konzentrierte Phosphorsäure in poröser Matrix (SiC-PTFE)	Mischung aus Li_2CO_3 - und KCO_3 -Schmelze in LiAlO_2 -Matrix	Keramischer Festkörper ZrO_2 (Y_2O_3)
Betriebstemperatur	80 °C	60-120 °C	160-220 °C	600-660 °C	800-1.000 °C
Brennstoff	Wasserstoff, Hydrazin	Wasserstoff, Methanol (reformiert)	Erdgas (reformiert), Kohlegas (reformiert)	Erdgas, Kohlegas, Biogas	Erdgas, Kohlegas, Biogas
Oxidationsmittel	O_2	O_2 , Luft	O_2 , Luft	O_2 , Luft	O_2 , Luft
Wirkungsgrad der Zelle	70 %	50 – 68 %	55 %	65 %	60 – 65 %
Systemwirkungsgrad	62 %	30 – 50 %	40 %	47 %	50 %
Besondere Eigenschaften	CO_2 -empfindlich	CO-empfindlich	CO-empfindlich	CO_2 -Kreislauf erforderlich	externe Reformierung kann entfallen

Es kann auch unterschieden werden zwischen dem Niedertemperaturbereich (30 - 220°C), zu dem die alkalische Brennstoffzelle (AFC), die Membranbrennstoffzelle (PEM) und die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) gehört, und dem Hochtemperaturbereich (600-

1.000°C) mit der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) sowie der Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC).

Um eine Brennstoffzelle zu betreiben, wird Wasserstoff als Brennstoff benötigt. Entweder wird der Wasserstoff direkt erzeugt, z.B. mittels Elektrolyse aus elektrischer Energie, oder durch eine Umwandlung von Erdgas, Methanol oder Kohle in einem chemischen Prozess zu einem wasserstoffreichen Brenngas. Da einige Brennstoffzellen empfindlich auf CO bzw. CO₂ und Stickstoffverbindungen im Brenngas reagieren, muss dabei deren Anteil am Brenngas durch zusätzliche Reinigungsschritte geringgehalten werden.

2.3.3 Kennlinien von Brennstoffzellen

Um Brennstoffzellen ihrer Leistungsfähigkeit nach vergleichen zu können, wird die Brennstoffzelle einer Messreihe unterzogen und die Messwerte mit Hilfe der sogenannten Stromdichte-Spannungs-Kennlinie dokumentiert.

Abb. 10 zeigt beispielhaft die Kennlinie einer Protonenaustausch-Membran-Brennstoffzelle für den Betrieb mit reinem Sauerstoff (obere Kurve) sowie mit Luft (untere Kurve). Die Steilheit der Kurve charakterisiert den Innenwiderstand einer Zelle. Je flacher eine Kurve im mittleren Bereich verläuft, umso geringer ist der Innenwiderstand einer Zelle, was geringere ohmsche Verluste zu Folge hat.

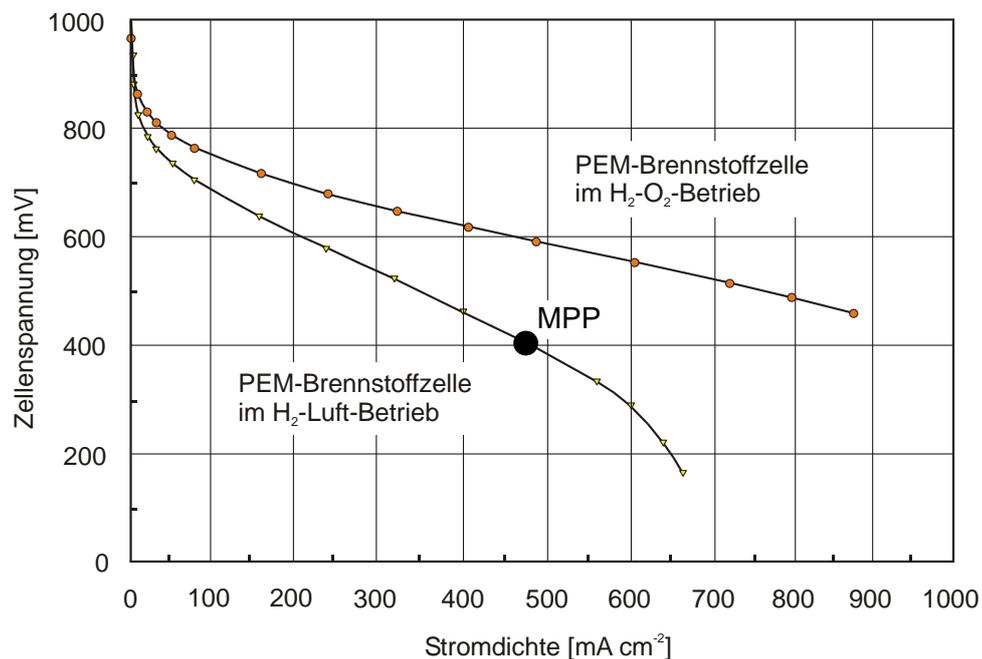


Abb. 10: Stromdichte-Spannungskennlinie einer PEMFC bei Luft- / Sauerstoffbetrieb. Ergänzend wurde in der unteren Kurve der Punkt der maximalen Leistung (MPP) eingezeichnet.

Für die Messung wird die Brennstoffzelle mit Lastwiderständen unterschiedlich stark belastet und dabei die Spannung und der Laststrom aufgezeichnet. Abb. 11 zeigt die Brennstoffzelle als Spannungsquelle mit Innenwiderstand und die äußere Beschaltung zur Messung. Ist das

Stromdichte-Spannungsdiagramm erstellt, kann der Punkt mit der maximalen Leistung (MPP) der Brennstoffzelle aus dem Diagramm abgelesen werden.

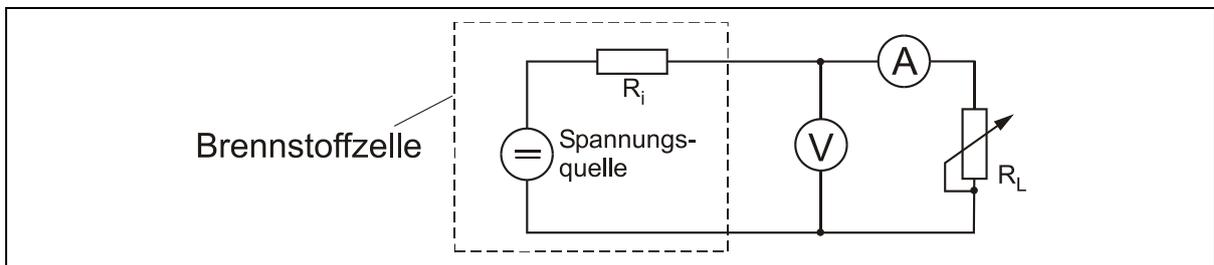


Abb. 11: Innenschaltbild einer Brennstoffzelle mit Spannungsquelle und Innenwiderstand sowie äußerer Beschaltung zur Ermittlung der Stromdichte-Spannungs-Kennlinie

Für eine Wirkungsgradbestimmung wird der Leistung der Brennstoffzelle die zugeführte Energie des Brennstoffs gegenübergestellt. Sind beide Werte bekannt, kann der Wirkungsgrad durch Division zwischen der erzeugten elektrischen Energie und der eingesetzten chemischen Energie gemäß der Formel (2-11) berechnet werden.

$$\eta_{BZ} = \frac{P_{BZ}}{\dot{Q}_{H_2}} \quad (2-11)$$

3 Versuchsdurchführung

Für die Messungen an den drei Komponenten Solarzelle, Elektrolyse-Zelle und Brennstoffzelle steht ein Versuchsaufbau bereit, der in Abb. 12 schematisch dargestellt ist. In den folgenden Abschnitten werden die konkret durchzuführenden Messungen an den drei Komponenten näher erläutert.

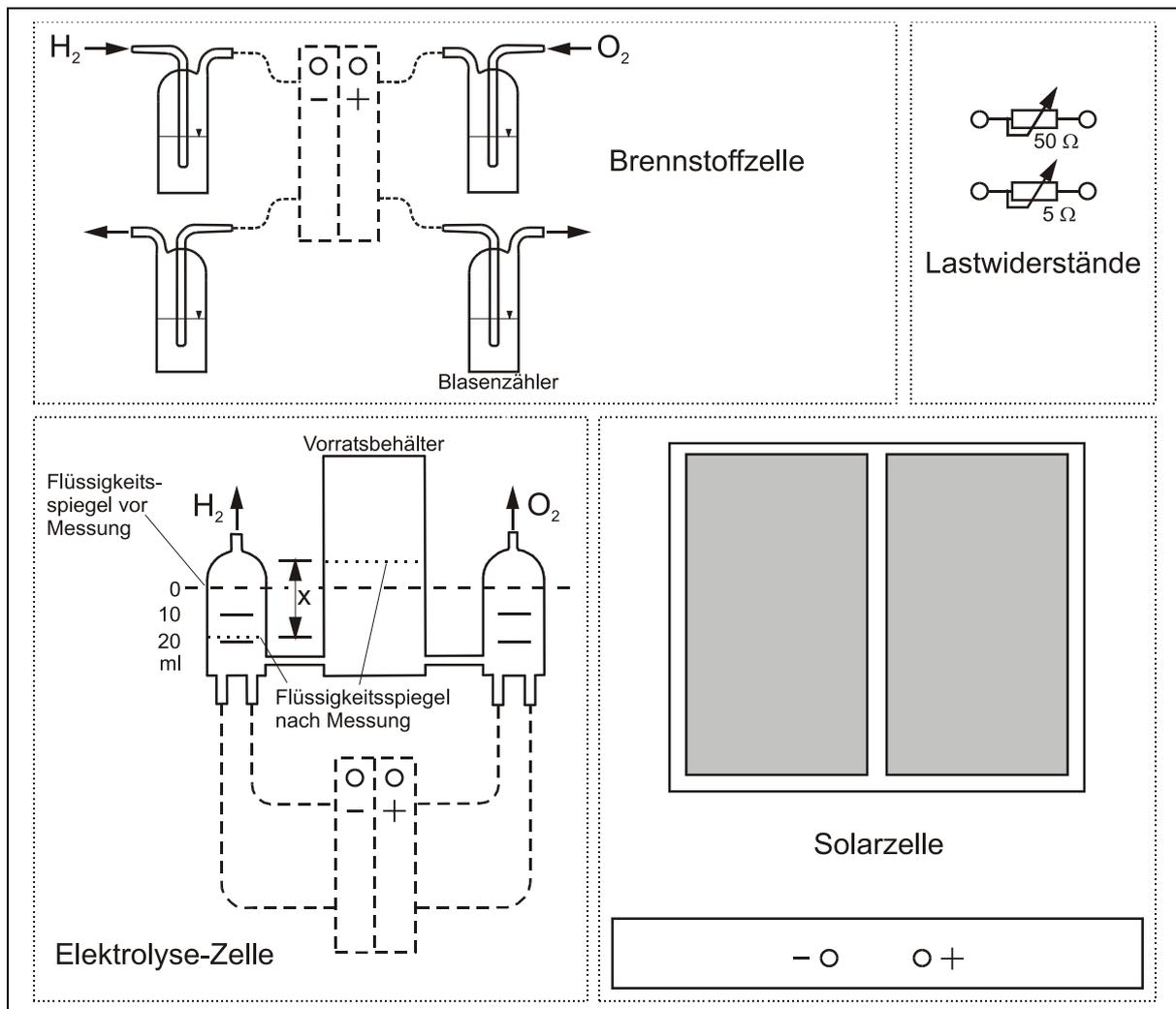


Abb. 12: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

3.1 Messungen an der Solarzelle

Für die Leistungsmessung an der Solarzelle wird zunächst die Einstrahlung auf das Photovoltaik-Panel und damit die zugeführte Leistung bestimmt. Mit einem Halogenreflektorstrahler werden dazu beide Solarzellenmodule gleichmäßig angestrahlt. Mit Hilfe eines Lux-Meters wird die Beleuchtungsstärke an mehreren Punkten bestimmt und durch Ausmessen die Fläche der Solarzellen ermittelt. Die Werte werden in das Datenblatt Solarzelle eingetragen und anschließend die Einstrahlungs-Leistung anhand dem Datenblatt Bestimmung der Bestrahlungsstärke bestimmt.

Neben einer Messung der Leerlaufspannung erfolgt die Bestimmung der Strom-Spannungskennlinie (Lastkennlinie) der Solarzelle durch Einstellen verschiedener Lastzustände über veränderbare Widerstände (vgl. Abb. 13).

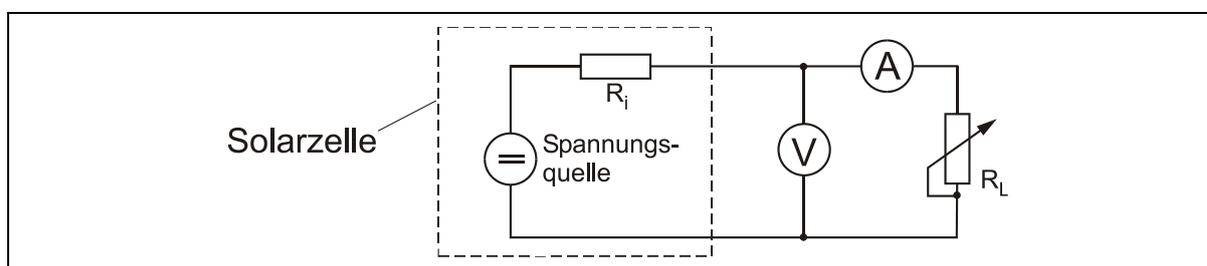


Abb. 13: Messschaltung Solarzelle

Zunächst sind beide Lastwiderstände ganz nach rechts zu drehen um den höchstmöglichen Widerstand einzustellen.

Hinweis: Auf keinen Fall dürfen beide Lastwiderstände gleichzeitig am linken Anschlag stehen, da dies zur Beschädigung der Solarzelle führen kann.

Die Grobeinstellung der Last erfolgt mit dem 50 Ohm-Einstellwiderstand, die Feineinstellung mit dem 5 Ohm-Einstellwiderstand. Für jeden der 20 Messpunkte wird durch Veränderung des Lastwiderstands eine Spannung eingestellt, der dabei fließende Strom wird gemessen und beide Werte in das Datenblatt Solarzelle eingetragen. Dabei sollte die Abstufung möglichst gleichmäßig erfolgen. Abb. 14 stellt den Versuchsablauf mit den einzelnen Arbeitsschritten schematisch dar.

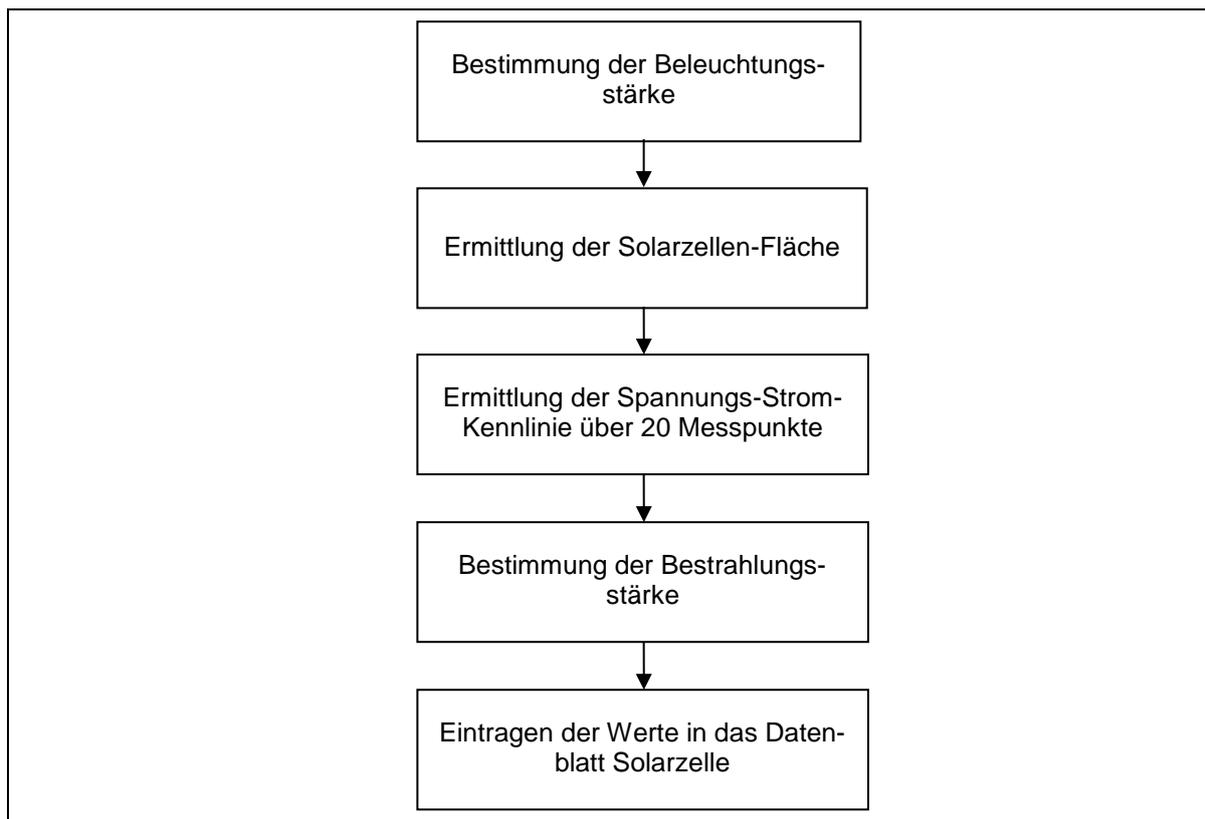


Abb. 14: Arbeitsschritte bei den Messungen an der Solarzelle

3.2 Messungen an der Elektrolyse-Zelle

Um die Leistung der Elektrolyse-Zelle zu bestimmen, wird der Wasserstoff-Massenstrom bestimmt. Als Vorbereitung wird zunächst der Wasser-Vorratsbehälter der Elektrolyse-Zelle soweit mit entionisiertem Wasser aufgefüllt, bis die 0 ml-Marke an den Messgläsern erreicht wird. Jetzt wird das Netzgerät in Betrieb genommen und ein konstanter Strom von 0,3 A eingestellt. Die Spannung sollte ebenfalls beobachtet werden (Schaltung vgl. Abb. 15).

Hinweis: Die Einstellung sollte sehr vorsichtig vorgenommen werden, da ein zu hoch eingestellter Strom die Elektrolyse-Zelle zerstören kann.

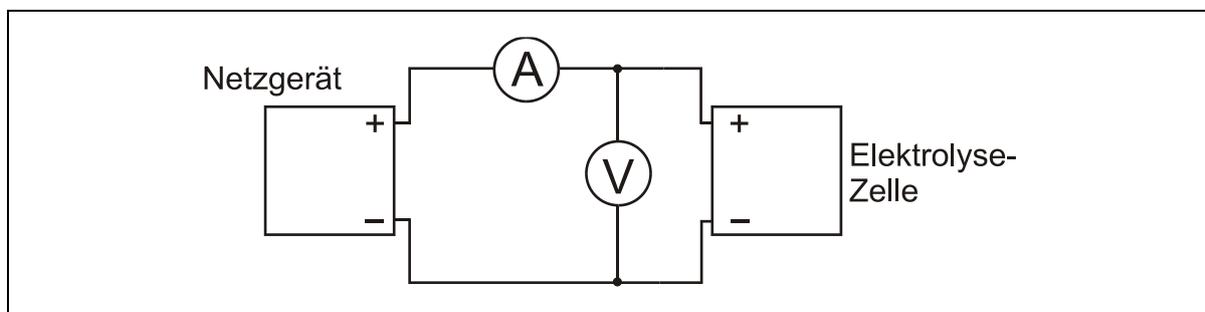


Abb. 15: Messschaltung Elektrolyse-Zelle

Bevor weitere Messungen durchgeführt werden, sollte die Elektrolyse-Zelle ca. 5 min. kontinuierlich gearbeitet haben. Diese Einlaufphase stabilisiert die elektrochemischen Vorgänge innerhalb der Zelle.

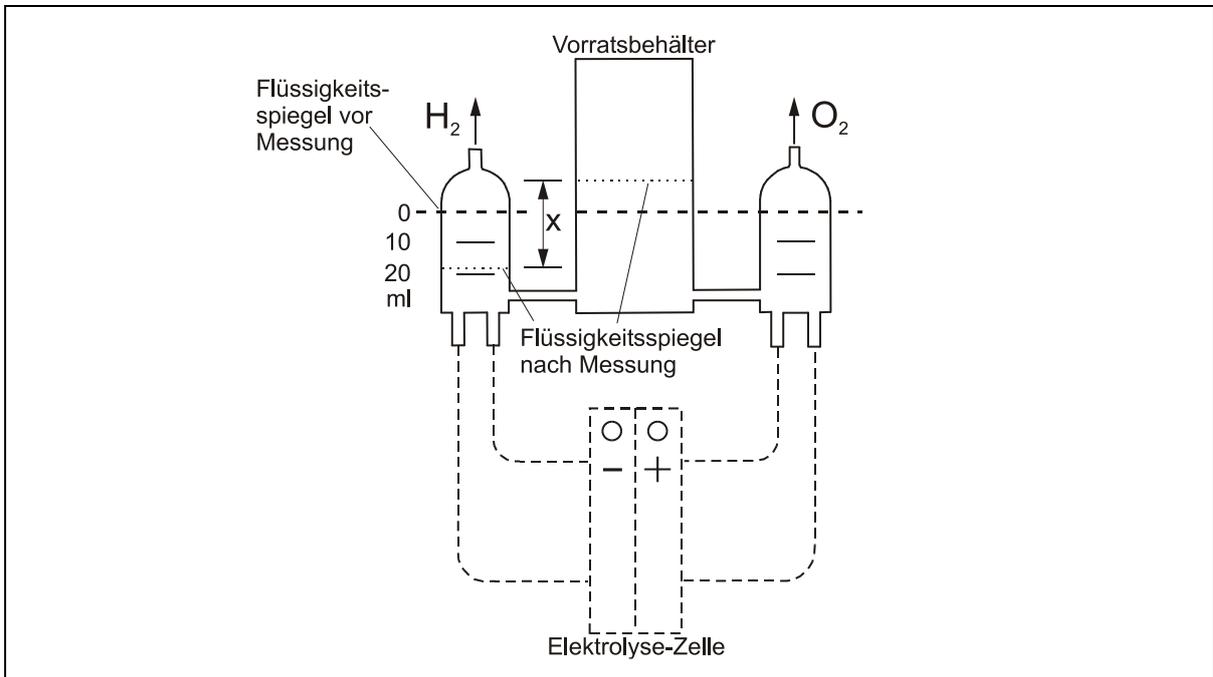


Abb. 16: Bestimmung des Wasserstoff-Massenstroms der Elektrolyse-Zelle

Vor der Bestimmung der erzeugten Wasserstoffmenge sollte nochmals der Wasserstand in den Messgläsern überprüft und gegebenenfalls auf 0 ml eingestellt werden. Nun wird der wasserstoffführende Schlauch an der Brennstoffzelle abgezogen und dicht verschlossen. Der sauerstoffführende Schlauch bleibt geöffnet. Die verstrichene Zeit bis zum Erreichen der 20 ml-Markierung am Wasserstoff-Messglas wird mit einer Stoppuhr erfasst und in das Datenblatt Elektrolyse-Zelle eingetragen.

Gleichzeitig ist der Abstand x zwischen den Wasserständen im Messglas und dem Vorratsbehälter (vgl. Abb. 16) zu bestimmen und ebenfalls in das Datenblatt einzutragen. Auf diese Weise lässt sich im Anschluss der Volumenstrom im betrachteten Zeitraum sowie der Druck des Gases im Messglas bestimmen. Für die Bestimmung der aufgenommenen elektrischen Leistung wird neben der bereits eingestellten Stromstärke die Spannung für jede Messung notiert. Für eine hinreichend genaue Bestimmung der Wasserstoffmenge wird dieser Versuchsabschnitt dreimal durchgeführt. Abb. 17 stellt den Versuchsablauf mit den einzelnen Schritten in zusammengefasster Form dar.

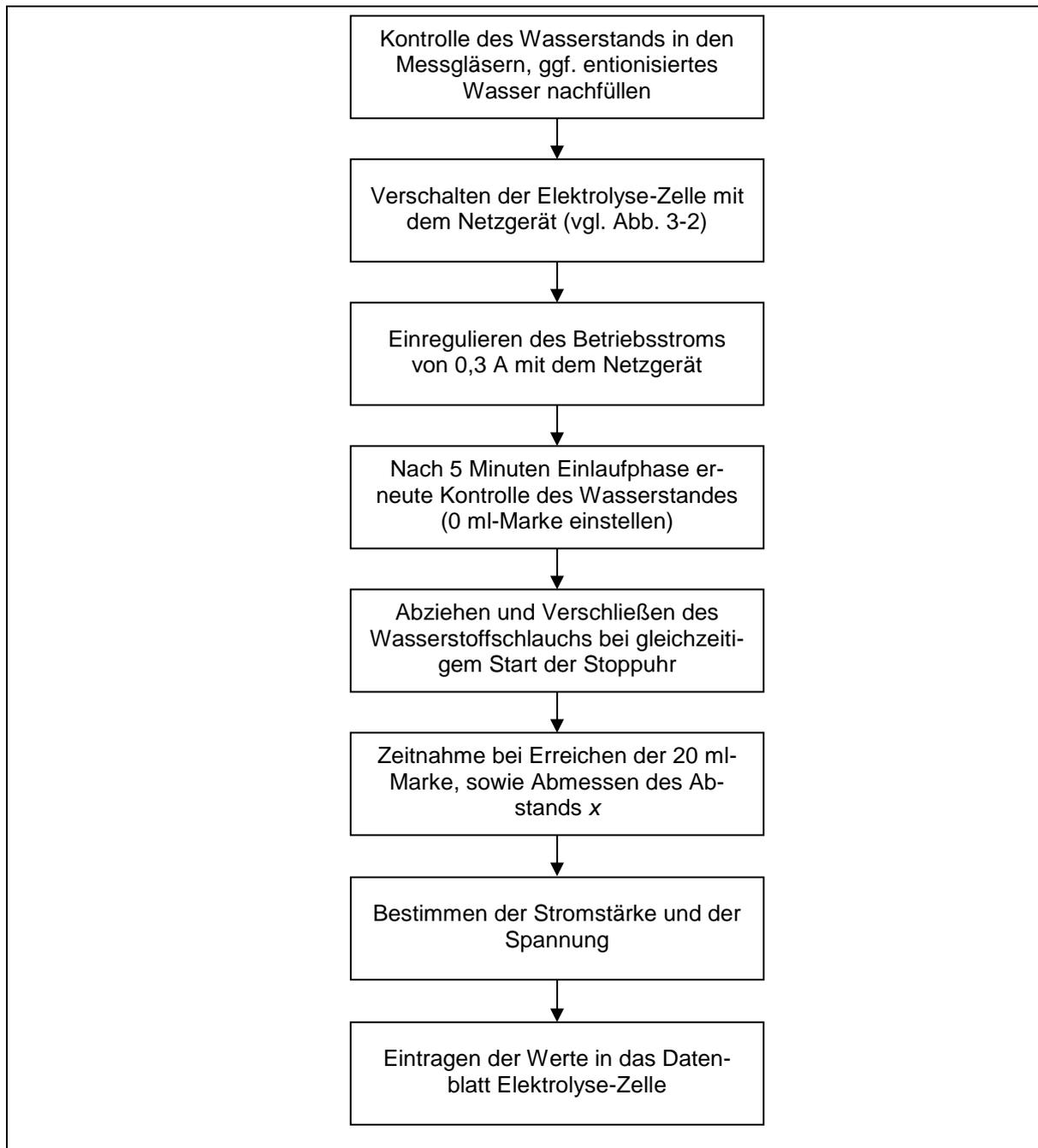


Abb. 17: Arbeitsschritte bei den Messungen an der Elektrolyse-Zelle

3.3 Messungen an der Brennstoffzelle

Zu Versuchsbeginn wird die Elektrolyse-Zelle in Betrieb genommen (Strom 0,3 A) und die Verbindungsschläuche so aufgesteckt, dass die Gasausgänge der Elektrolyse-Zelle direkt mit den Eingängen der Brennstoffzelle verbunden sind (vgl. Abb. 18).

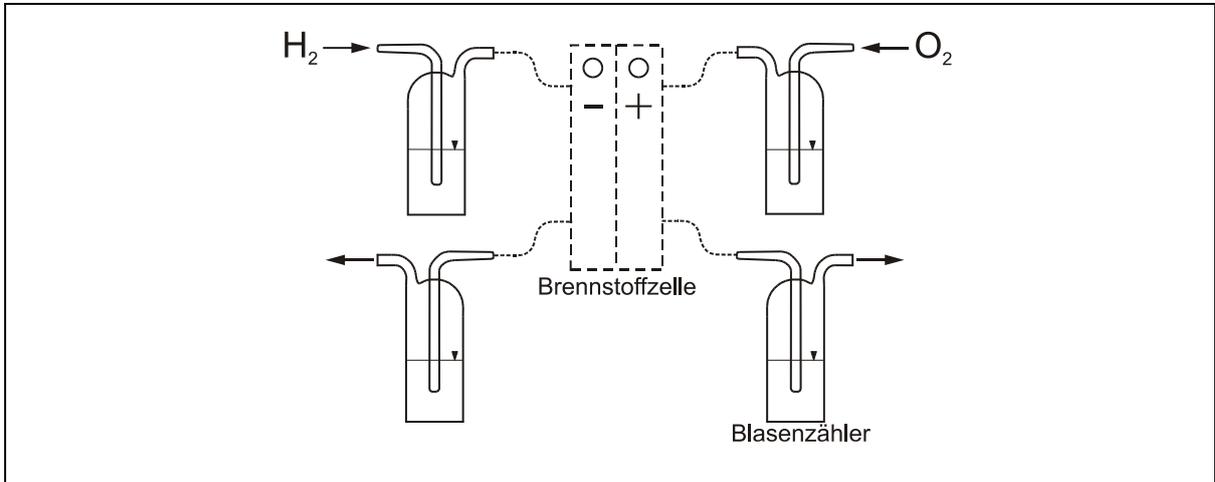


Abb. 18: Skizze der Brennstoffzelle

Die elektrische Belastung der Brennstoffzelle erfolgt nach der in Abb. 19 dargestellten Messschaltung. Die veränderbaren Lastwiderstände sind vor dem Beginn der Messung beide ganz nach rechts zu drehen um eine Überlastung der Brennstoffzelle zu vermeiden. Die Grobeinstellung der Last erfolgt mit dem 50 Ohm-Einstellwiderstand, die Feineinstellung mit dem 5 Ohm-Einstellwiderstand.

Nun wird für jeden der Messpunkte die Spannung durch Veränderung der Lastwiderstände eingestellt und der Strom gemessen. Beide Werte werden in das Datenblatt Brennstoffzelle eingetragen. Eine Zusammenfassung der einzelnen Arbeitsschritte stellt Abb. 20 dar.

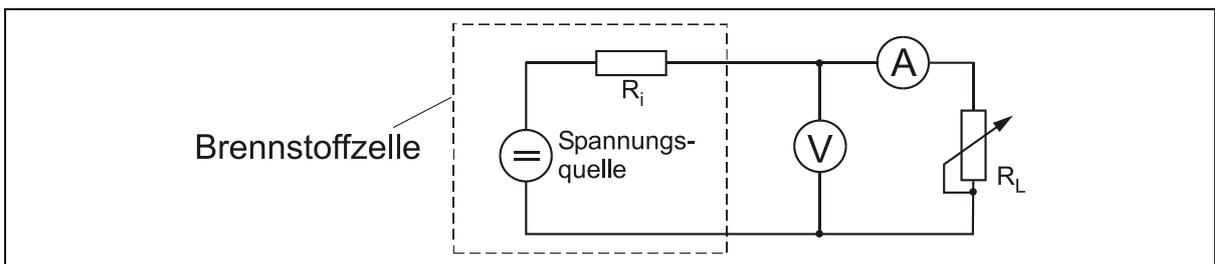


Abb. 19: Messschaltung der Brennstoffzelle

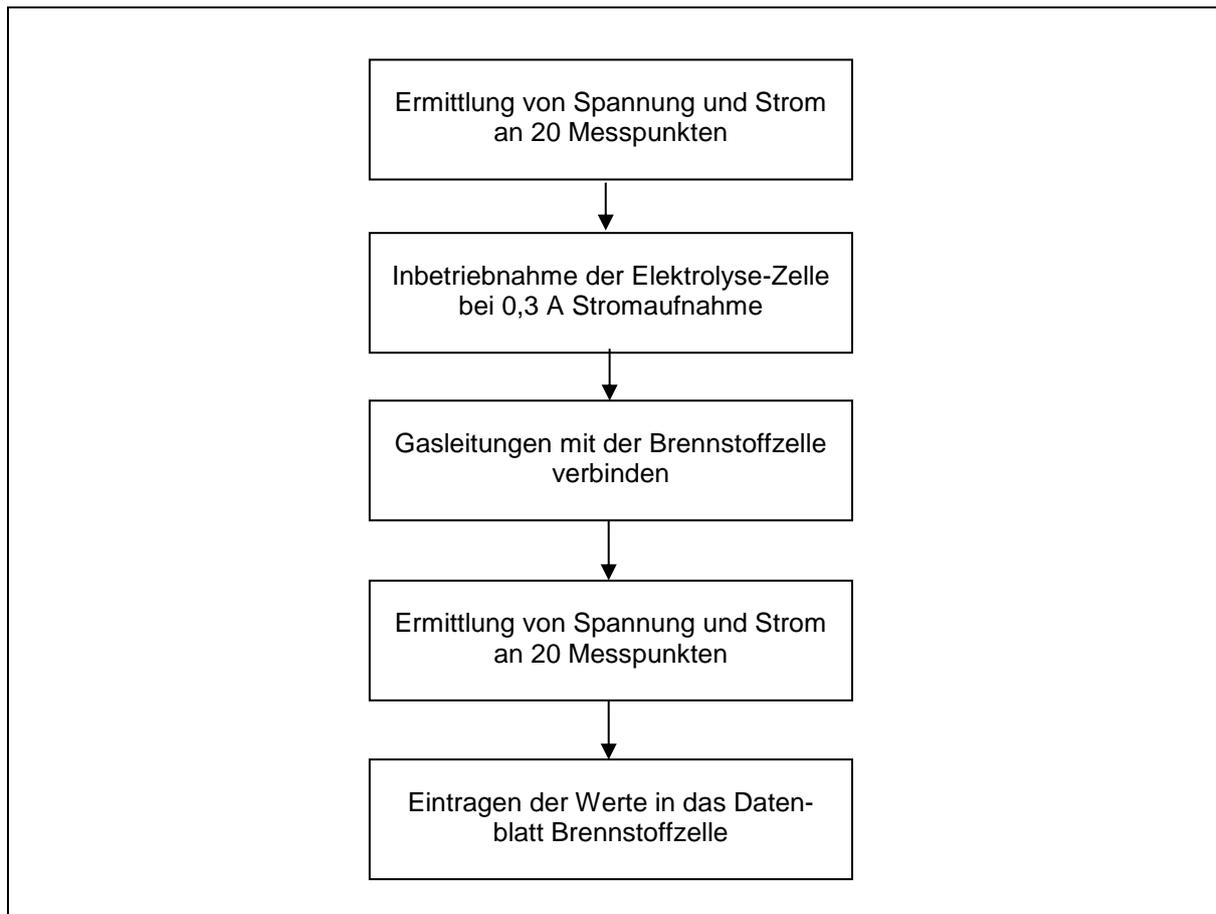


Abb. 20: Arbeitsschritte bei den Messungen an der Brennstoffzelle

4 Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung beinhaltet die Berechnung der einzelnen Arbeitsschritte zur Bestimmung des Wirkungsgrads der einzelnen Komponenten und anschließend des Gesamtwirkungsgrads des Versuchsstands. Darauf folgt eine Beispielrechnung der solaren Stromerzeugung und Wasserstoffgewinnung.

4.1 Wirkungsgradberechnung der Versuchsanordnung

Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich aus dem Produkt der Einzelwirkungsgrade von Solarzelle, Elektrolyse-Zelle und Brennstoffzelle, die im Folgenden aus den Messergebnissen berechnet werden.

4.1.1 Solarzelle

- Zunächst erfolgt das Einzeichnen der Messpunkte in das Diagramm Spannungs-Strom-Kennlinie der Solarzelle und das Skizzieren des Graphen,
- dann wird der Punkt der maximalen Leistung der Solarzelle (MPP) im Diagramm bestimmt und
- der Wirkungsgrad gemäß der Formel (4-1) berechnet.

$$\eta_{\text{solar}} = \frac{P_{\text{ab,solar,el}}}{E_{\text{zu,solar}}} \quad (4-1)$$

4.1.2 Elektrolyse

Die Berechnung erfolgt in zwei Teilschritten. Dazu wird zunächst die erzeugte chemische Energie bestimmt und anschließend der Wirkungsgrad der Elektrolyse durch Gegenüberstellung der erzeugten chemischen Energie mit der aufgenommenen elektrischen Leistung berechnet.

Erzeugte chemische Energie

- Zuerst wird der Mittelwert aus den drei durchgeführten Messungen der Wasserstoffmenge gebildet,
- dann erfolgt die Umrechnung auf einen Betrachtungszeitraum mit der Zeit $t = 60 \text{ s}$ und
- die Umrechnung auf Normvolumen ($T_0=273,15 \text{ K}$; $p_0=1,01325 \text{ bar}$) nach dem allgemeinen Gasgesetz:

$$p * V = n * R_m * T \quad (4-2)$$

Dazu ist die Raumtemperatur mit 20°C bzw. 293 K gegeben; der Druck wird aus dem Abstand x nach der Beziehung (4-3) bestimmt und kann dann als Δp in die umgestellte Gasgesetzformel (4-4) eingesetzt werden.

$$1 \text{ mm Wassersäule} = 9,81 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 9,81 \text{ Pa} = 9,81 \cdot 10^{-5} \text{ bar} . \quad (4-3)$$

$$\dot{V}_{N,H_2} = \dot{V}_{H_2} \frac{(\Delta p + p_0) \cdot T_0}{p_{\text{raum}} \cdot p_0} \quad (4-4)$$

- Für eine Berechnung der Wasserstoff-Masse ist die Dichte von Wasserstoff mit

$$\rho_{H_2} = 0,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (bei } 1,01325 \text{ bar und } 273,15 \text{ K)}$$

gegeben.

- Die Bestimmung der erzeugten chemischen Energie erfolgt mit Hilfe des Brennwertes von Wasserstoff mit:

$$H_{o,H_2} = 141,9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Bestimmung des Wirkungsgrads

- Die Berechnung erfolgt gemäß der Gleichung (4-4). Um die aufgenommene Leistung zu bestimmen, werden die Werte für Stromstärke und Spannung der drei Messungen gemittelt und miteinander multipliziert in die Formel (4-4) eingesetzt.

$$\eta_{BZ} = \frac{P_{BZ}}{\dot{Q}_{H_2}} \quad (4-4)$$

4.1.3 Brennstoffzelle

- Die Berechnung der Stromdichte (mA/cm^2) erfolgt mit der Membranfläche von $A = 20 \text{ cm}^2$ für jeden Messpunkt.
- Dann erfolgt das Einzeichnen der Messpunkte in das Datenblatt Diagramm Stromdichte-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle und das Skizzieren des Graphen,
- anschließend wird der Punkt der maximalen Leistung der Brennstoffzelle (MPP) im Diagramm bestimmt und der Wirkungsgrad gemäß der Formel (4-4) berechnet. Der Wert \dot{Q}_{H_2} wurde bereits bei der Berechnung des Elektrolyse-Wirkungsgrades ermittelt und kann daher hier eingesetzt werden.

4.2 Wirkungsgradvergleich mit anderen Energiesystemen (Zusatzaufgaben)

Als Vergleichsfälle werden eine solare Stromerzeugung und die Wasserstoffgewinnung betrachtet. Geben sie **alle Berechnungsschritte** an. Diagramme (z.B. Excel) können mit einer Software erzeugt werden und dann als Bild eingefügt werden. Daten, die aus der Literatur verwendet werden sind mit **Quellen** zu versehen.

4.2.1 Solare Stromerzeugung

In Baden-Württemberg soll ein 4 Personen-Haushalt (Jahresstromverbrauch ca. 4.000 kWh/a) durch eine Photovoltaik-Dachanlage versorgt werden. Die Gesamtkosten für die Installation einer Photovoltaikleistung von 1 kW_{peak} betragen dabei 1.600 € (Systempreis).

- Welche Photovoltaikleistung (in kW_{peak}) muss dafür auf dem Dach installiert werden? Bitte mit Rechenweg angeben.
- Wie groß muss die Dachfläche mindestens sein? Bitte mit Rechenweg angeben.
- Welche Möglichkeiten der solaren Stromerzeugung gibt es? Beschreiben Sie drei Solarzellentypen und grenzen Sie deren Eigenschaften (Materialeigenschaften, Herstellungseigenschaften, Wirkungsgrad, etc.) gegeneinander ab.
- Welche Stromgestehungskosten entstehen dabei, wenn von einer 20-Jährigen Nutzungsdauer bei konstanter Stromerzeugung ausgegangen werden kann (Die Inflationsrate ist mit 0 % anzunehmen)? Die Gestehungskosten sind in *Ct/kWh* anzugeben.
- Wie reduzieren sich die Kosten, wenn die Solaranlage in Sizilien (Süditalien) gebaut wird? Bitte Rechenweg angeben und Ergebnis wiederum in *Ct/kWh* darstellen.
- Kann die Erzeugung der oben berechneten Solaranlage zu jeder Stunde des Jahres den Stromverbrauch des Haushaltes decken? Bitte begründen Sie ihre Meinung und beschreiben Sie Möglichkeiten, wie der Stromverbrauch jederzeit gedeckt werden kann.

4.2.2 Wasserstoffgewinnung

Wasserstoff wird konventionell primär aus fossilen Quellen (96% des Bedarfs) hergestellt. Der Großteil wird durch Erdgas, Schweröl sowie Kohle gedeckt. Nur 4 % werden durch Elektrolyse und damit Strom bereitgestellt (Hamacher 2014). Die Effizienz der Wasserstoffgewinnung sind in der Tabelle 4 für verschiedene Rohstoffe aufgelistet.

Tabelle 4: Effizienz der Wasserstoffgewinnung mit verschiedenen Rohstoffen

Rohstoff	Effizienz
Holz	45%
Erdgas	74%
Kohle	53%
Strom	63%

- Welche Energiemenge (in kWh) der jeweiligen Rohstoffe wird gebraucht, wenn 9.072 MJ Wasserstoff produziert werden soll?

Die direkten Kohlenstoffdioxid Emissionen der Wasserstoffproduktion sind die Emissionen die nur bei der Umwandlung von Rohstoff (e.g. Holz oder Strom) zu Wasserstoff entstehen. In

der folgenden Aufgabe (b) werden nur die direkten Emissionen betrachtet, die wegen Kohlenstoffgehalt der Rohstoffe entstehen. Beachten Sie dabei, dass die Kohlenstoffmenge wie folgt ins Kohlenstoffdioxid umgewandelt wird ($12\text{g/mol C} + 32\text{g/mol O}_2 \rightarrow 44\text{g/mol CO}_2$).

Tabelle 5: Kohlenstoffmenge der Rohstoffe

Rohstoff	g C/MJ
Holz	27.8
Erdgas	15.0
Kohle	26.2
Strom	-

- b) Berechnen Sie für die Wasserstoffproduktion in Teil benötigte a) Menge an Rohstoff die entstehenden direkten Kohlenstoffdioxid-Emissionen in kg CO₂.
- c) Welche weiteren, indirekten Emissionen werden noch in einer Lebenszyklusanalyse über die gesamte Prozesskette beachtet? Geben Sie für jeden Rohstoff Beispiele an.
- d) Sind die direkten Kohlenstoffdioxid Emissionen für Holz relevant? Warum (nicht)?

Literaturverzeichnis

- /1/ Goetzberger, A.; Knobloch, J.; Voß, B.: Physik und Technologie der Solarzelle. Teubner-Verlag. Stuttgart, 1994
- /2/ Ludwig-Bölkow-Systemtechnik: Wasserstoffkompendium. Ottobrunn, 1997
(www.hyweb.de/gazette)
- /3/ Köthe, H. K.: Stromversorgung mit Solarzellen. Methoden und Anlagen für die Energieaufbereitung. 2. Auflage. Franzis Verlag. München, 1991
- /4/ Wettling, W.: Dünnschicht-Solarzellen: Stand der Technik und Trends. In: Sonnenenergie & Wärmetechnik 5/97. Seiten 24-28
- /5/ Diefenbach, K.H.: Marktübersicht Solarmodule. In: Photon. Das Solarstrom-Magazin 2/2005. Seiten 30 - 58
- /6/ Landesgewerbeamt Stuttgart – Informationszentrum Energie: Wasser erwärmen und heizen mit der Sonne. 3. Auflage. Stuttgart, 1999
- /7/ Christen, H. R.: Grundlagen der allgemeinen und anorganischen Chemie. 9. Auflage. Otto Salle Verlag GmbH. Frankfurt a. M., 1988
- /8/ Stimming, U.; Friedrich, K. A.; Cappadonia, M.; Vogel, R.: Brennstoffzellen-Technologie. VDI Fachtagung Energieversorgung mit Brennstoffzellenanlagen. Essen, 1998
- /9/ VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwerkswirtschaft e.V.: Brennstoffzellen. VIK-Berichte Nr. 214. Essen, 1999

Bestimmung der Bestrahlungsstärke

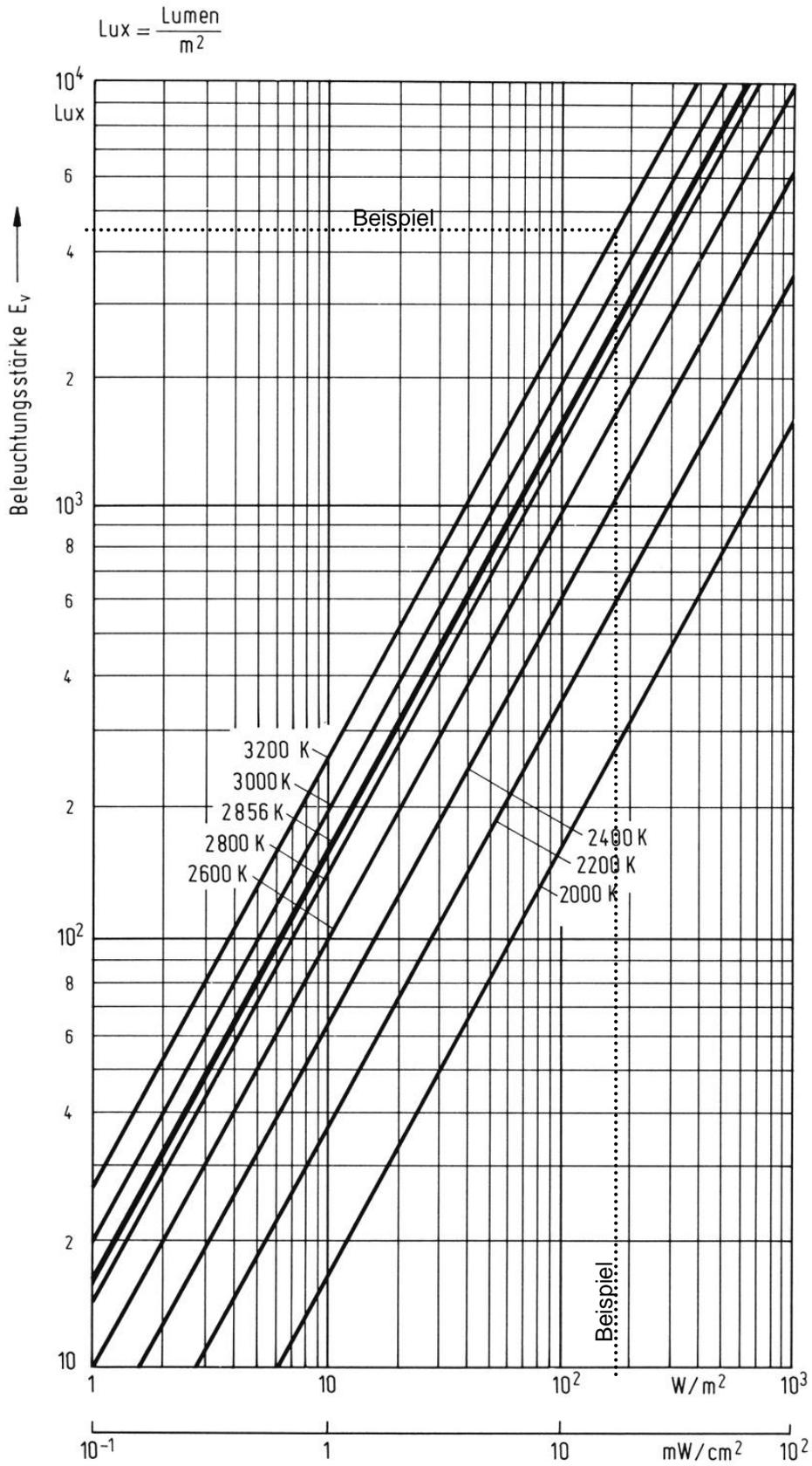
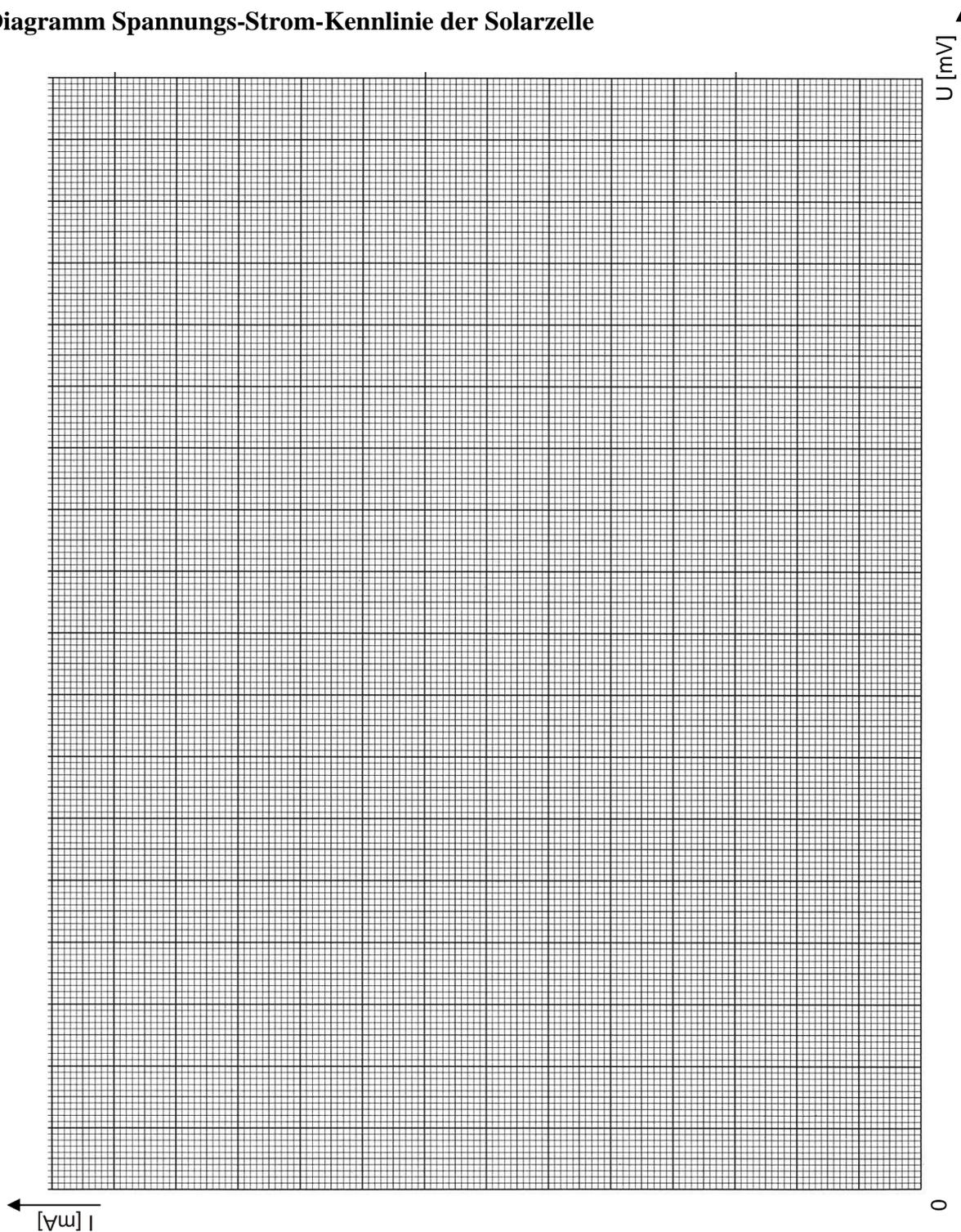


Diagramm Spannungs-Strom-Kennlinie der Solarzelle

Datenblatt Elektrolyse-Zelle

Messung Nr.	Zeit [s]	Volumen [ml]	Volumen umgerechnet auf $t = 60\text{s}$ [ml/60s]	Spannung der Zelle [V]	Stromstärke der Zelle [A]
1					
2					
3					

Arithmetischer Mittelwert der drei Messungen: _____ ml/60s

Umrechnung in m^3/s _____ m^3/s

Umgerechnet in Normvolumen: _____ Nm^3/s

Umgerechnet in Masse: _____ kg/s

Umgerechnet in Brennstoffstrom: _____ $\text{J}/\text{s} = \text{W}$

Wirkungsgrad Elektrolyse: _____ %

Diagramm Stromdichte-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle