

# Brennstoffzellen im Unterricht

*Grundlagen, Experimente, Arbeitsblätter*

*Cornelia Voigt, Stefan Höller, Uwe Küter*

**Mit 78 Abbildungen und 20 Tabellen**

**H<sub>2</sub>YDROGEIT**  
Verlag

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Autoren und des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle in diesem Buch enthaltenen Angaben, Daten, Ergebnisse usw. wurden von den Autoren nach bestem Wissen erstellt und vom Verlag mit größtmöglicher Sorgfalt geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht völlig auszuschließen. Daher erfolgen alle Angaben ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie der Autoren und des Verlages. Sie übernehmen deshalb keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige vorhandene inhaltliche Unrichtigkeiten.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Besuchen Sie auch: [www.hydrogeit-verlag.de](http://www.hydrogeit-verlag.de), [www.h-tec.com](http://www.h-tec.com)

Im Hydrogeit Verlag sind darüber hinaus erschienen:

*Wasserstoff & Brennstoffzellen*, 2. Aufl., Okt. 2004, ISBN 978-3-937863-04-7

*Wasserstoff-Autos*, Mai 2006, ISBN 978-3-937863-07-8

*Wasserstoff & Wirtschaft*, März 2005, ISBN 978-3-937863-02-3

*Erneuerbare Energien und alternative Kraftstoffe*, 2. Aufl., Jan. 2005, ISBN 978-3-937863-05-4

*Die Wasserstoff-CD*, 2. Aufl., Apr. 2007, ISBN 978-3-937863-03-6

*Alternative Kraftstoffe*, Okt. 2008, ISBN 978-3-937863-12-2

3. Auflage

ISBN 978-3-937863-13-9

© Copyright: h-tec Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH, Lübeck, 2008

Herausgegeben vom Hydrogeit Verlag, 16727 Oberkrämer, Germany, 2008

Druck: QuickPrinter GmbH, Overath

Titelgestaltung und Buchsatz: Dipl.-Des. Andreas Wolter, Weimar

Alle Rechte vorbehalten!

holz- und chlorfreies Papier, alterungsbeständig nach ISO 9706, erfüllt Reinheitsbestimmungen EN 71-3

## VORWORT

Die Brennstoffzelle wandelt einen Brennstoff direkt in elektrische Energie und Wärme – ohne den Umweg über die Dampferzeugung, die Turbine und den Generator, wie in typischen Kraftwerken üblich. Bevorzugter Brennstoff allerdings ist Wasserstoff, einer der wenigen Energieträger, die an einem Platinkatalysator bereits bei Raumtemperatur mit ausreichender Geschwindigkeit reagieren. So ist die Brennstoffzelle untrennbar mit der Wasserstofftechnologie verbunden und die Diskussion, woher der Wasserstoff für den Brennstoffzellenprozess kommen kann, nimmt zurzeit breiten Raum ein. Noch steht nicht genügend regenerative Energie zur Verfügung, so dass für erste Brennstoffzellen-Prototypen der Wasserstoff aus fossilen Energieträgern stammt.

Das Buch „Brennstoffzellen im Unterricht“ gibt eine Einleitung in diese Thematik, hauptsächlich jedoch wird die Brennstoffzelle anschaulich erklärt. Das Buch ist Bestandteil eines Lehrsystems, das Experimente zur Wasserstofferzeugung aus Solarenergie und der Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen ermöglicht. Mit diesem Experimentalsatz und dem vorliegenden Buch ist eine Einführung in eine der wichtigen Zukunftstechnologien gelungen. Spielerisch können die theoretischen und praktischen Grundlagen gelernt werden und Grenzen und Möglichkeiten der Technologie erfahren werden.

Als High-Tech-Gesellschaft brauchen wir technologiebegeisterte Menschen. Sie sind die Basis für die Innovationsfähigkeit Europas. Das Unterrichtsmaterial zum Thema Brennstoffzellentechnologie leistet einen Beitrag zu einem interessanten Physik- oder Chemie-Unterricht durch gute graphische Präsentationen und plausibel beschriebene Experimente.



A handwritten signature in black ink, which appears to read 'A. Heinzel'.

Prof. Dr. rer. nat. Angelika Heinzel,

*Leiterin des Zentrums für BrennstoffzellenTechnik ZBT gGmbH  
Duisburg*

# INHALT

## TEIL 0 EINLEITUNG

0.1. Hinweise zur Buchbenutzung .....	10
0.2. Erneuerbare Energien .....	11
0.2.1. <i>Sonnenenergie</i> .....	12
0.2.2. <i>Windkraft</i> .....	13
0.2.3. <i>Wasserkraft</i> .....	15
0.3. Solar-Wasserstoff-Kreislauf .....	16

## TEIL 1 GRUNDLAGEN DER BRENNSTOFFZELLEN-TECHNIK

1.1. Geschichte der Brennstoffzellen-Technik .....	20
1.2. Brennstoffzellen-Typen .....	20
1.2.1. <i>PEM-Brennstoffzelle</i> .....	24
1.2.2. <i>Brennstoffzellen-Stack</i> .....	25
1.2.3. <i>Direkt-Methanol-Brennstoffzelle</i> .....	26
1.3. Anwendungen .....	27
1.4. PEM-Elektrolyseur .....	30
1.5. Wasserstoffspeicherung .....	31

## TEIL 2 EXPERIMENTE

2.1. Zersetzung von Wasser unter Betrachtung des entstehenden Wasserstoff- und Sauerstoff-Gasvolumens .....	36
2.2. Strom-Spannungs-Kennlinie, Leistungskurve und Wirkungsgrad des Solarmoduls .....	38
2.3. Strom-Spannungs-Kennlinie des PEM-Elektrolyseurs .....	45
2.4. Energetischer und faradayscher Wirkungsgrad des PEM-Elektrolyseurs .....	50
2.5. Strom-Spannungs-Kennlinie und Leistungskurve der PEM-Brennstoffzelle .....	57
2.6. Energetischer und faradayscher Wirkungsgrad der PEM-Brennstoffzelle .....	62
2.7. Strom-Spannungs-Kennlinie der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle .....	70

## TEIL 3 ARBEITSBLÄTTER

3.1. Unterrichtsvorlagen .....	74
3.1.1. <i>Solar-Wasserstoff-Kreislauf</i> .....	74
3.1.2. <i>Wasserstoff</i> .....	76
3.1.3. <i>Brennstoffzelle</i> .....	79

3.1.4. <i>Elektrolyse</i> .....	81
3.2. <i>Lehrerarbeitsblätter</i> .....	83
3.2.1. <i>Solar-Wasserstoff-Kreislauf</i> .....	83
3.2.2. <i>Wasserstoff</i> .....	85
3.2.3. <i>Brennstoffzelle</i> .....	86
3.2.4. <i>Elektrolyse</i> .....	88
3.3. <i>Schülerarbeitsblätter für Sekundarstufe 1 und 2</i> .....	90
3.3.1. <i>Solar-Wasserstoff-Kreislauf</i> .....	90
3.3.2. <i>Wasserstoff</i> .....	91
3.3.3. <i>Brennstoffzelle</i> .....	92
3.3.4. <i>Elektrolyse</i> .....	93
3.4. <i>Experimentierarbeitsblätter für Sekundarstufe 1</i> .....	94
3.4.1. <i>Zersetzung von Wasser unter Betrachtung des entstehenden Wasserstoff- und Sauerstoff-Gasvolumens</i> .....	94
3.4.2. <i>Strom-Spannungs-Kennlinie, Leistungskurve und Wirkungsgrad des Solarmoduls</i> .....	96
3.4.3. <i>Strom-Spannungs-Kennlinie des PEM-Elektrolyseurs</i> .....	99
3.4.4. <i>Energetischer Wirkungsgrad des PEM-Elektrolyseurs</i> .....	102
3.4.5. <i>Strom-Spannungs-Kennlinie und Leistungskurve der PEM-Brennstoffzelle</i> .....	106
3.4.6. <i>Energetischer Wirkungsgrad der PEM-Brennstoffzelle</i> .....	109
3.5. <i>Experimentierarbeitsblätter für Sekundarstufe 2</i> .....	112
3.5.1. <i>Strom-Spannungs-Kennlinie, Leistungskurve und Wirkungsgrad des Solarmoduls</i> .....	112
3.5.2. <i>Strom-Spannungs-Kennlinie des PEM-Elektrolyseurs</i> .....	115
3.5.3. <i>Energetischer und faradayscher Wirkungsgrad des PEM-Elektrolyseurs</i> .....	119
3.5.4. <i>Strom-Spannungs-Kennlinie und Leistungskurve der PEM-Brennstoffzelle</i> .....	124
3.5.5. <i>Energetischer und faradayscher Wirkungsgrad der PEM-Brennstoffzelle</i> .....	127
3.5.6. <i>Strom-Spannungs-Kennlinie der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle</i> .....	132

#### TEIL 4 ANHANG

Glossar .....	136
Stichwortverzeichnis .....	142
Empfehlungen/Links .....	143
Bild- und Textquellenverzeichnis .....	143



# 0

## Einleitung

---

0.1. Hinweise zur Buchbenutzung .....	10
0.2. Erneuerbare Energien.....	11
0.3. Solar-Wasserstoff-Kreislauf.....	16

## 0.1. HINWEISE ZUR BUCHBENUTZUNG

### Das vorliegende Buch ist dreigeteilt:

Der **erste Teil** des Buches beschreibt die **Grundlagen** der Brennstoffzellen-Technologie.

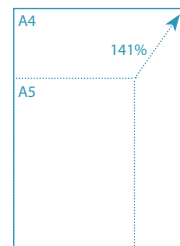
Im **zweiten Teil** werden **Experimente** zur Solarzelle, Elektrolyse und Brennstoffzelle beschrieben. Zur Veranschaulichung der Experimente sind sowohl die Werte als auch die Ergebnisse der Versuche exemplarisch aufgeführt. Die Berechnungen sind mit Beispielwerten durchgerechnet worden, damit alles gut nachvollziehbar und verständlich ist.

Der **dritte Teil** umfasst eine große Anzahl von **Arbeitsblättern**:

- 3.1. Die Unterrichtsvorlagen fassen die wichtigsten Aussagen zum jeweiligen Thema zusammen.
- 3.2. Die Lehrer-Arbeitsblätter bestehen aus gezielten Fragen mit dazugehörigen Antworten.
- 3.3. Die Schüler-Arbeitsblätter wiederholen die Fragen der Lehrer-Arbeitsblätter. Die Antworten sind nicht dabei. Für eine Wissensabfrage können diese Blätter einfach kopiert und ausgehändigt werden.
- 3.4. Die Experimentier-Arbeitsblätter für die Sekundarstufe 1 sind Arbeitsanleitungen zur Durchführung von Experimenten. Sie beinhalten Anweisungen zum benötigten Versuchsmaterial, zu Aufbau, Durchführung und Fragen zur Auswertung. Die Experimentier-Arbeitsblätter sind stark an Teil 2 (**Experimente**) angelehnt.
- 3.5. Die Experimentier-Arbeitsblätter für die Sekundarstufe 2 sind wie 3.4 aufgebaut. Die Versuche sind aber etwas umfangreicher.

Die gesamten Vorlagen können durch Kopieren oder Herunterladen aus dem Internet ([www.h-tec.com](http://www.h-tec.com)) als Arbeitsblätter genutzt werden.

Bitte senden Sie uns Ihre Meinung. Wenn Sie Anregungen oder Kritikvorschläge haben, schicken Sie bitte Ihre E-mail an: [fcbook@h-tec.com](mailto:fcbook@h-tec.com)





## 0.2. ERNEUERBARE ENERGIE

### Nutzung erneuerbarer Energie durch Solarzellen, Windkraftanlagen und Wasserkraftwerke.

Abb. 1 | Sonnenergie



Regenerative Energien werden durch natürliche, so genannte *Primärenergiequellen* ständig erneuert. Sie sind somit für den Menschen nahezu „unerschöpflich“. Zu den Primärenergiequellen zählen:

- Sonnenenergie
- Gezeitenenergie
- Geothermie

### SONNENENERGIE – Kernfusion in der Sonne: Umwandlung von Wasserstoffatomen in Heliumatome

Die Sonnenenergie tritt auf der Erde durch natürliche Energieumwandlungen in verschiedenen Formen auf, wie z. B.:

- Solarstrahlung (Photovoltaik, Solarthermie)
- Windkraft aus Atmosphärenbewegung
- Wasserkraft aus Verdunstung/Niederschlag
- Biomasse aus Photosynthese

Auch die fossilen Energieträger sind letztendlich nur gespeicherte Sonnenenergie. Im Gegensatz zu regenerativen Energien werden sie jedoch nicht in menschlichen Zeiträumen erneuert, sondern es bedarf vieler Millionen Jahre für ihre Entstehung. Die heute am häufigsten eingesetzten Energiewandler für regenerative Energien sind Solarzellen (s. Kap. 0.2.1), Windkraftanlagen (s. Kap. 0.2.2) und Wasserkraftwerke (s. Kap. 0.2.3).

### GEZEITENENERGIE – Gravitationswechselwirkung von Erde und Mond

Gezeitenkraftwerke nutzen die durch das Sinken oder Steigen des Wasserspiegels entstehenden Strömungen bei Ebbe und Flut.

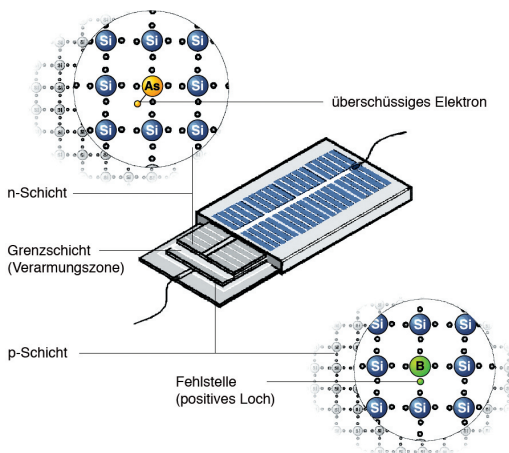
## GEOthermISCHE ENERGIE – Radioaktivität im Erdinnern

Mit zunehmender Tiefe steigt die Temperatur an. In geothermischen Anlagen wird die Wärme aus der Tiefe zu Heizzwecken oder zur Erzeugung elektrischer Energie (Dampfturbine) genutzt.

### 0.2.1. SONNENENERGIE

**Der Begriff *Photovoltaik* bezeichnet die direkte Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie durch Solarzellen.**

Abb. 2 | Prinzip der Solarzelle



Grundlage dieser Technik sind so genannte *Halbleitermaterialien* (z. B. Silizium).

Eine Solarzelle besteht aus zwei verschieden dotierten Halbleitern. *Dotieren* nennt man das bewusste, kontrollierte Verunreinigen von Halbleiterkristallen. Dazu wird der vorher erzeugte hochreine Kristall mit Atomen versetzt, die im Vergleich zum Ursprungskristall ein *Valenzelektron* (Elektronen, die für die chemische Bindung verantwortlich sind) mehr oder ein Valenzelektron weniger besitzen.

Haben die Fremdatome auf der äußeren Schale ein zusätzliches Elektron, spricht man von *n-Dotierung* (negative Dotierung). Im umgekehrten Fall, wenn das Fremdatom ein Valenzelektron weniger als der Kristall hat, handelt es sich um eine *p-Dotierung* (positive Dotierung). Auf diese Weise entstehen n- und p-leitende Substanzen (ein n-Leiter ist elektronenleitend, ein p-Leiter ist löcherleitend). Entweder sind dann die Elektronen oder die Löcher für

die elektrische Leitung verantwortlich. Strom selbst ist nichts anderes als bewegte Ladungen.

Bringt man einen p- und einen n-Leiter zusammen, entsteht ein *pn-Übergang*. Dies ist die Schicht, in der sich die Leiter berühren. Jede Seite für sich betrachtet ist elektrisch neutral, denn es gibt immer genauso viele Elektronen wie Protonen. Weil positive und negative Ladungen sich aber anziehen, bildet sich am pn-Übergang ein Bereich, in dem die freien Elektronen die freien Löcher besetzen. Diese Schicht, die fast frei von Ladungsträgern ist, nennt man *Verarmungszone*. Es bleiben also im n-Bereich positive und im p-Bereich negative Ladungen zurück. Auf diese Weise entsteht eine innere elektrische Spannung, die man als *Diffusionsspannung* bezeichnet. Sie ist von außen nicht abgreifbar.

Wird die Solarzelle beleuchtet, entstehen durch den so genannten *inneren Photoeffekt* weitere Ladungsträgerpaare, die das vorherige Gleichgewicht stören. Die Elektronen der Ladungsträgerpaare werden durch die Diffusionsspannung aus dem p- in das n-Gebiet gezogen. Die Löcher wandern aus dem n- in das p-Gebiet. Jetzt liegt eine äußere Spannung an der Solarzelle an. Dies ist die Leerlaufspannung. Eine Siliziumsolarzelle hat eine Leerlaufspannung von ca. 0,5 V. Sie ist nicht von der Fläche der Solarzelle abhängig. Höhere Spannungen können durch eine Serienschaltung einzelner Zellen erreicht werden.

Der Strom ist proportional zur Intensität des einstrahlenden Lichts. Eine Erhöhung des Stromes kann durch Parallelschaltung der Zellen erreicht werden.

Für Solarzellen wird als Grundmaterial meist Silizium eingesetzt. Es wird unterschieden in:

- 1 – monokristallines Silizium (Zellenwirkungsgrade: ca. 17 % - 20 %)
- 2 – polykristallines Silizium (Zellenwirkungsgrade: ca. 14 % - 16 %)
- 3 – amorphes Silizium (Zellenwirkungsgrade: ca. 5 % - 7 %)

## 0.2.2. WINDKRAFT

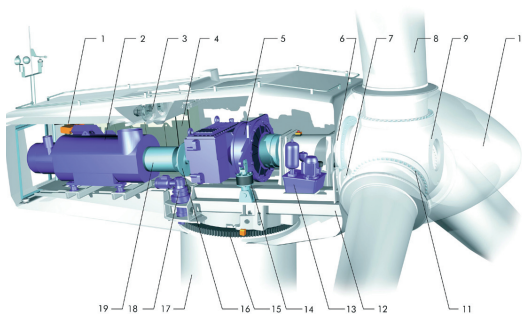
**Windkraft wird schon seit Jahrhunderten genutzt. Früher wurde mit Windmühlen die Kraft des Windes in mechanische Energie umgewandelt. Heute wandelt man die Windenergie mittels Windkraftanlagen in elektrische Energie um.**

Die wichtigsten Komponenten einer Windkraftanlage sind:

<b>Fundament</b>	Es sorgt für die ausreichende Verankerung der Anlage im Boden.
<b>Mast</b>	Er besteht meistens aus Stahl und/oder Beton, Höhe: 10 bis 120 m, in Zukunft noch höher.
<b>Gondel</b>	Sie bildet den Rahmen für den Generator, das Getriebe und anderes Zubehör.
<b>Rotor</b>	Er wandelt mit Hilfe eines oder mehrerer Rotorblätter die im Wind enthaltene Energie in eine mechanische Drehbewegung um. Die Rotorwelle verbindet Rotor und Getriebe.
<b>Getriebe</b>	Es übersetzt die geringe Drehzahl des Rotors auf die notwendige höhere Drehzahl für den Generator. Es gibt auch Windkraftanlagen, bei denen kein Getriebe zwischen Rotor und Generator benötigt wird.
<b>Generator</b>	Er wandelt mechanische in elektrische Energie um.

Kommerzielle Windkraftanlagen haben Gesamtwirkungsgrade von 35 % bis 43 %. Die größten Verluste treten am Rotor auf. Er gibt nur 45 % bis 50 % der Windenergie weiter. Am Getriebe treten durch Reibung ca. 2,5 % Verluste auf. Am Generator kommt es dann nochmals zu ca. 5 % elektrischen Verlusten.

Abb. 3 | Aufbau der Gondel einer Windkraftanlage



## WINDKRAFTANLAGE

1. Servicekran
2. Generator
3. Kühlsystem
4. Topsteuerung
5. Getriebe
6. Hauptstrang
7. Rotorarretierungssystem
8. Rotorblatt
9. Rotornabe
10. Rotornaben-Haube
11. Rotorblattlager
12. Grundrahmen
13. Hydraulikstation mit Konverter
14. Drehmomentenstütze
15. Drehkranz
16. Bremse
17. Turm
18. Azimutgetriebe
19. Verbundkupplung

### 0.2.3. WASSERKRAFT

**Die Sonne hält den natürlichen Wasserkreislauf der Erde in Gang. Das für die Nutzung der Wasserkraft zur Verfügung stehende Energiepotential wird durch den Anteil der oberirdisch abfließenden Niederschläge gebildet, die dabei auf ein nutzbares Gebiet treffen, z. B. das Einzugsgebiet eines Stausees.**

Die potentielle Energie des Wassers wird beim Herunterfließen in kinetische Energie umgewandelt. Mit dieser kann eine Wasserturbine angetrieben werden, die die kinetische Energie des Wassers in mechanische Energie umformt und damit einen Generator antreibt. Der Generator wandelt dann die mechanische Energie in elektrische Energie um. Wasserkraftwerke erreichen Wirkungsgrade zwischen 80 % und 90 %.

Die Leistung  $P$  der Anlage ergibt sich aus folgendem Produkt:

$$P = \dot{V} \cdot h \cdot g \cdot \rho \cdot \eta$$

$\dot{V}$  = Wassermengenstrom

$h$  = Fallhöhe

$g$  = Erdbeschleunigung

$\rho$  = Dichte des Wassers

$\eta$  = Gesamtwirkungsgrad der Anlage

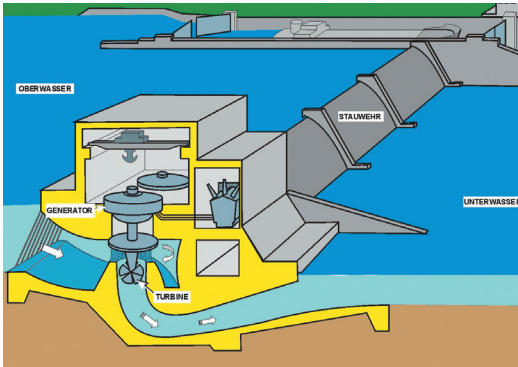
Die Wasserkraftwerkstypen werden nach der Fallhöhe unterschieden:

- Es gibt Hochdruckanlagen, die große Gefälle in Gebirgen mit Höhen über 50 m nutzen.
- Mitteldruckanlagen nutzen Gefälle mit Höhen zwischen 10 m und 50 m.
- Bei Gefällen unter 10 m wird von Niederdruckanlagen gesprochen.

Hochdruck- und Mitteldruckanlagen werden als Speicherkraftwerke ausgelegt, wohingegen Niederdruckanlagen als Laufwasserkraftwerke arbeiten. Laufwasserkraftwerke finden Anwendung an Flüssen mit vergleichsweise kleinen Fallhöhen, aber großen Durchflussmengen. Sie werden rund um die Uhr betrieben und eignen sich somit auch als Grundlastkraftwerke.

Speicherkraftwerke werden so bezeichnet, weil sie in natürlichen oder künstlichen Wasserreservoirs (Oberbecken) die potentielle Energie des Wassers speichern. So las-

Abb. 4 | Laufwasserkraftwerk



sen sich Unregelmäßigkeiten im Wasserzufluss ausgleichen, und die Stromproduktion kann an den Bedarf angepasst werden. In Spitzenlastzeiten, wenn also viel elektrische Energie gebraucht wird, kann das Wasser aus dem Oberbecken über eine Turbine in ein niedriger gelegenes Unterbecken geleitet werden. Die Turbine treibt dann einen Generator an, der die mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt. Die Speicherkraftwerke bieten sich als Spitzenlastkraftwerke an.

Ein Spezialfall der Speicherkraftwerke ist das Pumpspeicherkraftwerk. Es pumpt in Schwachlastzeiten (z. B. nachts bei Stromüberangebot) Wasser vom Unterbecken in das Oberbecken (höher gelegenes Speicherbecken). Die dafür notwendige Energie wird aus dem Stromnetz genommen. In Spitzenlastzeiten (hohe Stromnachfrage) wird das Wasser aus dem Oberbecken wieder in das Unterbecken geleitet. Das strömende Wasser setzt dabei die Turbine in Bewegung, die den Generator antreibt, der dann den Strom erzeugt. Der Wirkungsgrad von Pumpspeicherkraftwerken beträgt bis zu 75 %.

### 0.3. SOLAR-WASSERSTOFF-KREISLAUF

**Schwindende Ressourcen, eine zunehmende Umweltbelastung und ein stetig wachsender Energiebedarf führen zum Umdenken in der Energiewirtschaft.**

Die weltweiten Vorräte der fossilen und nuklearen Energieträger sind begrenzt (s. Abb. 5). Eine zügige Umorientierung bei der Energienutzung ist daher unbedingt notwendig.

Durch die Etablierung regenerativer Energien (z. B. Solar-, Wind- und Wasserenergie) auf dem europäischen Energiemarkt ist die erforderliche Wende bereits erfolgreich eingeleitet worden.