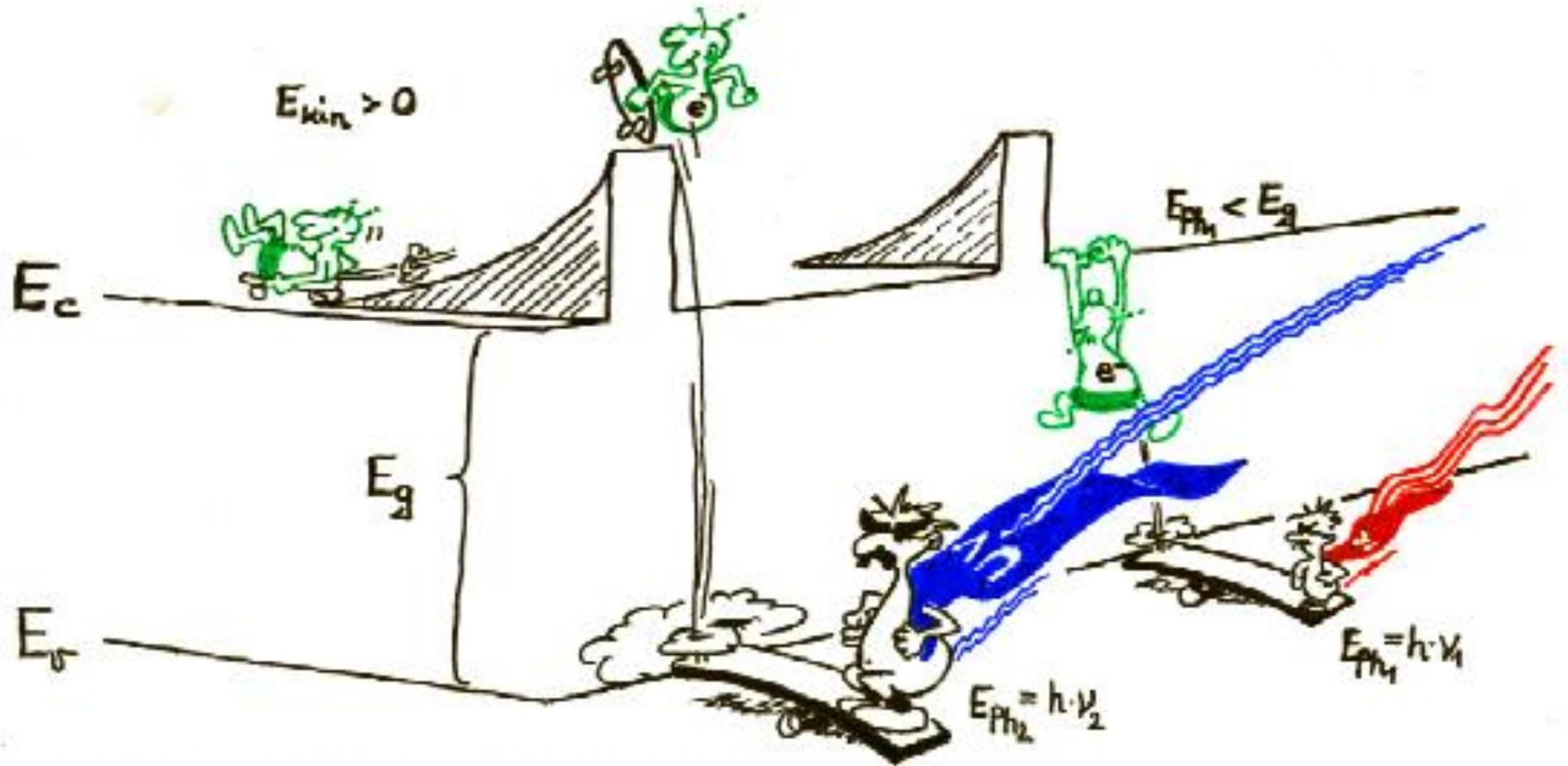


Photovoltaik



SS 2016 Vorlesung Photovoltaik (Nr. 23737)

Prof. Dr.-Ing. Michael Powalla, Prof. Dr. Ulrich Lemmer

Karlsruher Institut für Technologie, Lichttechnisches Institut
Engesserstraße 13, Geb. 30.34, Raum 113, 76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-4-1997 (2530)
e-mail: michael.powalla@kit.edu, ulrich.lemmer@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. M. Powalla
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Baden-Württemberg,
Leiter Geschäftsbereich Photovoltaik
Mitglied des Vorstands
Industriestraße 6, 70565 Stuttgart
Tel.: 0711 7870-263
e-mail: michael.powalla@zsw-bw.de

Tobias Abzieher: Tel.: 0721 608-44056
e-mail: tobias.abzieher@kit.edu



www.zsw-bw.de

Die Vorlesung war in den Jahren 2003 bis 2010 beim Maschinenbau angehängt. Seit 2010 an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik (ETIT). Seit 2014 wurde die Solarenergie (U. Lemmer/WS) mit der Photovoltaik zusammengelegt.



**Institut für Kerntechnik
und Reaktorsicherheit**
o. Prof. Dr. Dr. h. c. mult.
Dan G. Cacuci



Institut für Fusionstechnologie und Reaktortechnik (IFRT)
Prof. X. Cheng: +49 721 608-45356 or -45135
sharp@kit.edu

Maschinenbauer(innen) sind weiterhin herzlich willkommen (Physik für Ingenieure). Prüfungen gemeinsam mit Energiesysteme (Dr. Badea, PD Ron Dagan) oder andere Kombinationen sind weiter möglich. Für E-Techniker weisen wir darauf hin, dass aufgrund der großen inhaltlichen Überlappung nur eine der drei Lehrveranstaltungen anerkannt werden kann: 23711 Solarenergie (Colsmann, wird nicht mehr angeboten), 23737 Photovoltaik (Powalla), 23745 Solar Energy (Richards)

Tutor : Tobias Abzieher, LTI

Einführung: Termine im SS 2016

Zeit:	Montag 14.00 bis 15.30 Uhr Freitag 11.30 bis 13.00 Uhr
Ort:	Montag: HS III Geb. 30.41, Raum 105 Freitag: Criegee- HS Geb. 30.41, Raum 106
	3+1 SWS / 6 ECTS
Beginn:	18. April 2016

Vorlesung /Saalübung im Verhältnis 3:1

Vorlesungsunterlagen: <http://www.zsw-bw.de/infoportal/vorlesungen.html>

Alle Studierenden müssen sich im ILIAS Kurs „Photovoltaik 2016“ anmelden.

ILIAS-Portal unter: Organisationseinheiten → Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik → SS 2016 → Photovoltaik.

Das Passwort für den Zugang lautet: „Perowskit16“.

Prüfungsanmeldung: freigeschaltet ab 01.07. im QISPOS bis 02.09.
abmelden bis 09.09. Danach nur NOTFALLS
persönlich (siehe auch ILIAS-Kurs).

Stoffverteilungsplan: Photovoltaik (Nr. 23737) im SS 2016

Einheit	Inhalt	Kapitel	Datum	Dozent
1	Einführung, Historie PV, Energie	1.1 + 1.2	18.04.2016	Prof. Powalla
2	Photovoltaik Überblick	1.3	22.04.2016	Prof. Powalla
3	Photonen, Sonne als Strahlungsquelle	2.1 bis 2.4	25.04.2016	Prof. Powalla
4	Übungen zu PV im Energiesystem, Photonen, Sonnenlicht		29.04.2016	T. Abzieher
5	Halbleiter	2.5	02.05.2016	Prof. Lemmer
6	Minoritäten, Rekombination	2.6	06.05.2016	Prof. Lemmer
7	Übungen zu Halbleitern, Minoritäten, Rekombination		09.05.2016	T. Abzieher
8	Energiewandlung und pn-Übergang	3 und 4	13.05.2016	Prof. Powalla
	Exkursionswoche, keine Vorlesung		20.01.2016	
9	Solarzellen: Kennlinie, Verluste	5	23.05.2016	Prof. Powalla
10	Siliziumsolarzellen, Industriezellen, Produktionstechnik	6.1 bis 6.2	27.05.2016	Prof. Powalla
11	Si Hochleistungszellen	6.3	30.05.2016	Prof. Lemmer
12	Übungen zu Energiewandler, p/n, I/U-Kennlinien		03.06.2016	T. Abzieher
13	Modultechnik/Modultests	6.4 und 6.5	06.06.2016	Prof. Powalla
14	Übungen zu Si-Solarzellen und Modulen		10.06.2016	T. Abzieher
15	Dünnschichtsolarzellen: Si, CdTe	6.6.1. bis 6.6.3	13.06.2016	Prof. Powalla
16	Dünnschichtsolarzellen: CIGS, TCO	6.6.4, und 6.6.5	17.06.2016	Prof. Powalla
17	Konzentratorzellen (CPV), Organische Photovoltaik (OPV)	6.7 bis 6.81	20.06.2016	Prof. Lemmer
18	Farbstoff-Solarzellen, Perowskite, Neue Ideen (3rd generation PV)	6.8.2 und 6.9	24.06.2016	Prof. Lemmer
19	Übungen zu Dünnschichtsolarzellen		27.06.2016	T. Abzieher
20	PV Systemtechnik, Allgemein, Leistungselektronik, Systemkonfiguration	7.1 bis 7.3	01.07.2016	Prof. Powalla
21	PV Systemtechnik, Zusatzstromerzeugung, Integration	7.4 bis 7.7	04.07.2016	Prof. Powalla
22	Übungen zur PV Systemtechnik		08.07.2016	T. Abzieher
23	Solarthermie, Grundlagen, Niedertemperatur	8.1	11.07.2016	Prof. Lemmer
24	Solarthermie, Solarthermische Kraftwerke	8.2	15.07.2016	Prof. Lemmer
25	Übungen zu Solarthermie, Wdh/Klausurvorbereitung		18.07.2016	T. Abzieher
26	Exkursion ZSW Stuttgart Widderstall, Solartestfeld		22.07.2016	Prof. Powalla
27	Klausur: 11:00 Uhr - 13:00 Uhr / Hörsaal am Fasanengarten		14.09.2016	T. Abzieher

Inhaltsverzeichnis

- 1. Einführung: Energieversorgung und Photovoltaik**
- 2. Physikalische Grundlagen**
- 3. Energiewandlung**
- 4. p-n – Übergang**
- 5. Solarzellen, allgemein**
- 6. Realisierungskonzepte/Technologien**
- 7. Photovoltaik Systemtechnik**
- 8. Solarthermische Kraftwerke**

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung

1.1 Historie der Photovoltaik

1.2 Energie

1.2.1 Weltenergieverbrauch und Ressourcen

1.2.2 Erneuerbare Energien

1.2.3 Emissionen und Treibhauseffekt

1.2.4 Energieszenarien, Energiewende

1.2.5 Warum Photovoltaik zur Energiekonversion?

1.3 Photovoltaik Überblick

1.3.1 Kosten, Preise und Märkte

1.3.2 Markteröffnungsmaßnahmen in Deutschland

1.3.3 Übersicht PV-Technologien

1.3.4 Netzintegration und Nutzungspotenziale

2. Physikalische Grundlagen

2.1 Photonen

2.2 Die Sonne als Strahlungsquelle

2.2.1 Direkte, diffuse Strahlung

2.2.2 Sonnenspektrum, Air Mass Faktor

2.2.3 Das Referenzspektrum der PV

2.3 Licht an Grenzflächen und in Materie

2.4 Basisgleichungen

2.4.1 Maxwellgleichungen

2.4.2 Kontinuitätsgleichung

2.5 Halbleiter

2.5.1 Grundsätzliche Eigenschaften

2.5.2 Physikalische Beschreibung

2.5.3 Absorptionskoeffizient für verschiedene Halbleiter

2.5.4 Dotierung

2.5.5 Fermienergie und elektrochemisches Potential

2.6 Minoritäten, Rekombination, Lebensdauer

2.6.1 Strahlende Rekombination

2.6.2 Nichtstrahlende Rekombination

2.6.3 Bedingungen für eine hocheffiziente Solarzelle

3. Energiewandlung

- 3.1 Thermische Strahlung und chemische Energie
- 3.2 Maximaler Wirkungsgrad
- 3.3 Umwandlung chemischer in elektrische Energie
- 3.4 Gesamtladungsstrom
- 3.5 Separation von Elektron-Lochpaaren

4. p-n Übergang

- 4.1 Potenzialverlauf, Schottky-Näherung
- 4.2 Stromspannungskennlinie
- 4.3 Halbleiterheterostruktur

5. Solarzellen

- 5.1 Ersatzschaltbild für Solarzellen
- 5.2 Solarzellenkenngrößen
- 5.3 Die reale Solarzelle
- 5.4 Temperaturabhängigkeit
- 5.5 Der optimale Bandabstand
- 5.6 Verlustanalyse
- 5.7 Auswahlkriterien für Solarzellen

6 Realisierungskonzepte

6.1. Si-Solarmodul Herstellungssequenz

6.1.1 Herstellung von reinem Silizium

6.1.2 Kristallzuchtverfahren für Si

6.1.3 Herstellung von Si-Scheiben

6.1.4 Herstellung von Si-Bändern

6.1.5 Neue Verfahren und experimentelle Grenzen

6.2 Industrielle Fertigung von Si-Siebdruck-Solarzellen

6.3 Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen

6.4 Von der Zelle (Wafer) zum Modul, Modultechnik

6.5 Standardisierte Testverfahren

6.6 Dünnschichtsolarzellen

6.6.1 Kristalline Si-Dünnschichttechnik (Abscheideverfahren für c-Si)

6.6.2 a-Si Solarzellen

6.6.3 CdTe-Solarzellen

6.6.4 Cu(In,Ga)Se₂-Solarzellen

6.6.5 Kontaktschichten: Transparent leitfähige Oxyde

6.7 Solarzellen unter konzentriertem Licht

6.7.1 Optik

6.7.2 III-V-Solarzellen

6.8 Neue Solarzellenkonzepte

6.8.1 Organische Solarzellen

6.8.2 Farbstoffsolarzellen, Perowskite

6.9 Neue Ideen zur Überwindung der prinzipiellen Limits

7. Systemtechnik

- 7.1 Allgemein, Einstrahlung und Verbrauch
- 7.2 Wechselrichter und Netzkopplung
- 7.3 Systemkonfiguration
- 7.4 Zusatzstromerzeuger
- 7.5 Energieausbeute und Performance Ratio
- 7.6 Gebäudeintegration
- 7.7 Solare Nachführung

8. Solarthermische Systeme

- 7.1 Grundlagen, Niedertemperatursysteme
- 7.2 Solarthermische Kraftwerke

Literaturliste (eine Auswahl)

1) Energie und PV

A. Bubenzer, J. Luther, *Photovoltaics Guidbook for decision makers* (Springer, Berlin 2002)
Frithjof Staiß, *Jahrbuch Erneuerbare Energien* (Biberstein-Verlag, Radebeul, 2002), sowie 2006
Jeffrey Gordon, *Solar Energy*, (James & James, London, 2001)
Thomas, B. Johansson, Henry Kelly, Amulya K. N. Reddy, Robert H. Williams, *Renewable Energy*,
(Island Express, Washington, 1993)
Wolf D. Franke, *Kompendium Erneuerbare Energien*, (F.A.Z.-Institut, Frankfurt 2010)

http://www.bmu.de/	(Umweltministerium Deutschland)
http://www.dgs.de	(Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie)
http://www.epia.org/	(Europäischer Industrieverband PV)
http://www.nrel.gov/	(wichtigstes FuE Institut PV in USA)
http://www.fvee.de/	(Forschungsverband Erneuerbare Energien Deutschland)
http://www.eurosolar.org/	(europäischer Verband zur Förderung Erneuerbarer Energien)
http://www.eere.energy.gov/	(US Department of Energy)
http://ec.europa.eu/index_de.htm	(EU Plattform)
http://www.giz.de	(Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit)

Empfehlung: Studien, Statistiken zu Erneuerbarer Energie und PV

<http://www.erneuerbare-energien.de>

<http://www.energie-studien.de/>

<http://www.iea-pvps.org/> (International Energy Agency)

2) Physikalische Grundlagen und Solarzellen

- John Perlin, *From Space to Earth*, (Ann Arbor, Michigan, 1999)
Falk, Ruppel, *Energie und Entropie* (Springer, Berlin, 1976)
K. Kopitzki, *Einführung in die Festkörperphysik*, (B.G. Teubner Stuttgart, 1986)
Ibach, Lüth, *Festkörperphysik*, (Springer, Berlin, 1988)
Dieter Meissner, *Solarzellen*, (Vieweg, Braunschweig, 1993)
RJ Van Overstraeten, RP Mertens, *Physics, Technology and Use of Photovoltaics* (Adam Hilger Ltd, Bristol, 1986)
Hans-Joachim Möller, *Semiconductor for solar cells* (Artech House, Norwood MA, 1993)
Alan Fahrenbuch, Richard Bube, *Fundamentals of Solar Cells* (Academic Press, New York, 1983)
Martin A. Green, *Solar Cells*, (Centre for Photovoltaics, New South Wales, 1992)
Martin A. Green, *Silicon Solar Cells*, ((Centre for Photovoltaics, New South Wales, 1995)
Martin A. Green, *Third Generation Photovoltaics*, (Springer, Berlin, 2003)
C. Brabec, V. Dyakonov, J. Parisi, N.S. Sariciftci, *Organic Photovoltaics*, (Springer Berlin, 2003)
Rolf Brendel, *Thin-Film Crystalline Solar Cells*, (Wiley, Weinheim, 2003)
Sam-Shajing Sun, Niyazi Serdar Sariciftci, *Organic Photovoltaics*, (CRC Press Taylor & Francis , Boca Raton, 2005)
Jef Poortmans, Vladimir Arkhipov, *Thin Film Solar Cells*, (Wiley, West Sussex England, 2007)
A. Luque, S. Hegedus, *Handbook of PV Science and Engeneering*, (Wiley, West Sussex, 2003)
P. Würfel, *Physics of Solar Cells*, (Wiley-VCH, Weinheim, 2009))
M. Paglario, G. Palmisano, R. Ciriminna, *Flexible Solar Cells*, (Wiley-VCH, Weinheim, 2008)
A. De Vos, *Thermodynamics of Solar Energy Conversion*, (Wiley-VCH, Weinheim, 2008)
Y. Hamakawa, *Thin-Film Solar Cells*, (Springer, Berlin 2010)
F. Thuseit, *Physik der Halbleiterbauelemente*, (Springer, Berlin 2005)
J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, (Imperial College Press, London, 2010)
R. Scheer, H.W. Schock, *Chalcogenide Photovoltaics* (Wiley, Weinheim, 2011)
D. Abou-Ras, T. Kirchartz, U. Rau *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells* (Wiley, Weinheim, 2011)
K. Ellmer, A. Klein, B. Rech, *Transparent Conductive Zinc Oxide* (Springer, Berlin, 2008)

Empfehlung

- P. Würfel, *Physik der Solarzellen, 2. Auflage* (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2000)
P. Würfel, *Physics of Solar Cells*, (Wiley-VCH, Weinheim, 2009))
R. Sauer, *Halbleiterphysik*, (Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2009)
H.J. Lewerenz, H. Jungblut, *Photovoltaik* (Springer, Berlin, 1995)
H.G. Wagemann, *Photovotoltaik*, (Vieweg, Wiebaden, 2010)
S. J. Fonash, *Solar Cell Device Physics*, (Elsevier, Burlington, 2010)



Physikalische Grundlagen und Solarzellen

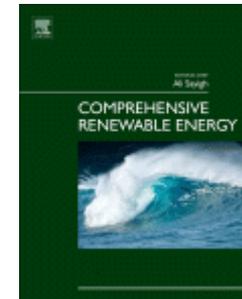
http://www.tfp.ethz.ch/Lectures/pv/	(Schweizer Lernplattform PV)
http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/	(Daten verschiedener Halbleiter)
http://britneyspears.ac/lasers.htm	(Halbleiterphysik Überblick)
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/pnjon.html	(Physik Plattform pn Kontakte, etc.)
http://www.play-hookey.com/	(Halbleiter, Bauelemente)
http://pvcell.wikispaces.com/pvcell	(Wiki-Seite über Solarzellen)

Empfehlung für „E-Lerner“

<http://pveducation.org/pvcdrom> (gute PV Seite)

E-Book:

<http://www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780080878737#ancv1>
(allgemein EE, guter aktueller Überblick über PV, auch Technologie)

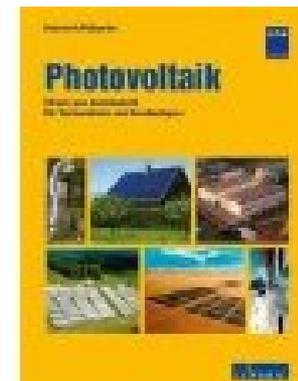


3) **PV Systeme und Anwendung**

- F. Jäger, A. Räuber, *Photovoltaic Strom von der Sonne* (C.F. Müller, Karlsruhe, 1990)
Roger Messenger, Jerry Ventre, *Photovoltaic System Engineering*, (CRC Press Boca Raton, 2000)
Course book for the seminar, Photovoltaic Systems (Fraunhofer ISE, Freiburg, 1995)
Thomas Markvart, *Solar Electricity*, (Wiley & Sons, Chichester, 1997)
Hans K. Köthe, *Stromversorgung mit Solarzellen*, (Franzis-Verlag München, 1991)
Werner-Josef Herrmann, *Zur Leistungsbemessung von Photovoltaikmodulen mit Sonnensimulationsanlagen*, (TÜV-Verlag, Köln, 2001)
OTTI Energie Kolleg, *Fachseminar Netzferne Stromversorgung mit Photovoltaik*, 2003
Udo Ringelhardt, *Photovoltaische Stromversorgung*, (Teubner, Stuttgart, 2001)
Susanne Rexroth, *Gestalten mit Solarzellen*, (C.F. Müller, Heidelberg, 2002)
Ursula Eicker, *Solare Technologien für Gebäude*, (B. G. Teubner, Stuttgart, 2001)
Ingo Hagemann, *Gebäudeintegrierte Photovoltaik*, (Müller, Aachen, 2002)
DGS, *Leitfaden Photovoltaische Anlagen*, (DGS, Berlin, 2005)
Jürgen Schmidt, *Photovoltaik Strom aus der Sonne*, (Müller, Heidelberg, 1999)
Vincent A. P. van Dijk, *Hybrid Photovoltaic Solar Energy Systems*, (Utrecht, 1996)
PV Status Report 2011, <http://ie.jrc.ec.europa.eu>

Empfehlung:

Heinrich Häberlin, *Photovoltaik*, (AZ Verlag, Aarau, 2007)



4) **Gemischt**

Tom Markvart, Luis Castaner, *Photovoltaics Fundamentals and Applications*, (Elsevier, Oxford, 2003)

Tom Markvart and Luis Castaner, *Solar Cells, Materials, Manufacture and Operation* (Elsevier, Oxford, 2005)

Antonio Luque, Steven Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, (Wiley, West Sussex, 2003)

5) **Konferenzbände**

Europäische Photovoltaik Konferenz (alle 1,5 Jahre)

Amerikanische Photovoltaik Konferenz, IEEE, (seit alle 1,5 Jahre)

Asiatische Photovoltaik Konferenz, (seit alle 1,5 Jahre)

6) **Zeitschriften:**

Photon, Solar Verlag,

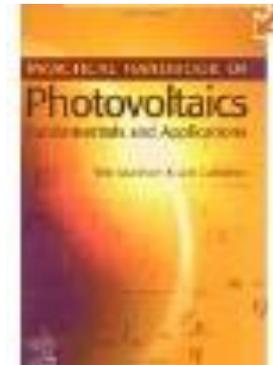
SONNE WIND & WÄRME,

Photovoltaics International,

Photovoltaik,

Solarpraxis

EP Photovoltaik



www.photon.de

www.photovoltaik.eu

<http://legacy.pv-tech.org>

Web-Sites

Firmen, Institute

http://www.solarbotics.net/starting/200202_solar_cells/200202_solar_cells.html

<http://www.pv.unsw.edu.au/>

<http://www.ise.fhg.de>

<http://www.shell.com>

<http://www.deutschesolar.de/>

<http://www.pvpower.com/pvcos.html>

<http://www.kaneka.co.jp/kaneka-e/index.html>

<http://www.nrel.gov/ncpv/>

<http://www.wuerth-solar.de>

<http://re.jrc.ec.europa.eu>

<http://www.solarbuzz.com>

<http://zsw-bw.de>

<http://www.schott.com/solar>

<http://www.asc.angstrom.uu.se/en/>

www.sunnyportal.com

www.manz.com

Zeitschriften

solar energy:

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=JournalURL&_cdi=5772&_auth=y&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=c7127b2ad51c16416022c6dc9f2af715

solar energy materials:

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=JournalURL&_cdi=5773&_auth=y&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=50534350b22b66981754cf88c63c216d

thin solid films:

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=JournalURL&_cdi=5548&_auth=y&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=208caed274db461b1f48c0419e7e9018

progress in pv: research and application:

<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jhome/5860>

