



Zusammenfassung der Vorlesung

Photovoltaik

(Nr. 23737)

SS 2016

Vorläufige Fassung

nur zum internen Gebrauch

Prof. Dr. Michael Powalla

im Juli 2016

Mein Dank gilt vor allem folgenden Kollegen bzw. Wegbegleitern, unter deren Namen eine Menge weiterführende und vertiefende Literatur zu finden ist:

Erneuerbare Energien allgemein: Prof. Frithjof Staiß

Photovoltaik - Grundlagen und neue Konzepte: Prof. Peter Würfel

Siliziumphotovoltaik: Prof. Jürgen Werner, Prof. Stefan Glunz

Systemtechnik: Dr. Hansjörg Gabler

Solarthermische Kraftwerke: Prof. Robert Pitz-Paál

Für die Unterstützung beim Erstellen der Folien danke ich Frau Oberkofler und Frau Silec.

Für die Übungen und Unterstützung in der Vorlesung danke ich Herrn Tobias Abzieher.

Die Vorlesungen teilte ich mit meinem Kollegen Prof. Dr. Lemmer.

Im Juli 2016

Michael Powalla

Prof. Dr.-Ing. Michael Powalla

Karlsruher Institut für Technologie, Lichttechnisches Institut

Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, E-Mail: michael.powalla@kit.edu

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Baden-Württemberg,

Leiter Geschäftsbereich Photovoltaik, Mitglied des Vorstands

Industriestraße 6, 70565 Stuttgart, E-Mail: michael.powalla@zsw-bw.de

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	8
1.1	Historie der Photovoltaik.....	8
1.2	Energie.....	9
1.2.1	Weltenergieverbrauch und Ressourcen.....	9
1.2.2	Erneuerbare Energie.....	10
1.2.3	Emissionen und Treibhauseffekt.....	12
1.2.4	Energieszenarien, Energiewende	13
1.2.5	Warum Photovoltaik zur Energiekonversion?	15
1.3	Photovoltaik Überblick.....	15
1.3.1	Kosten, Preise und Märkte	15
1.3.2	Markteröffnungsmaßnahmen in Deutschland	18
1.3.3	Übersicht PV-Technologien.....	19
1.3.4	Netzintegration und Nutzungspotenziale	19
2	PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN.....	22
2.1	Photonen.....	22
2.2	Die Sonne als Strahlungsquelle	23
2.2.1	Direkte, diffuse Strahlung	23
2.2.2	Sonnenspektrum, Air Mass Faktor.....	24
2.2.3	Das Referenzspektrum der PV	24
2.3	Licht an Grenzflächen und in Materie.....	25
2.4	Basisgleichungen.....	25
2.4.1	Maxwellgleichungen	25
2.4.2	Kontinuitätsgleichung	26
2.5	Halbleiter.....	26
2.5.1	Grundsätzliche Eigenschaften	26
2.5.2	Physikalische Beschreibung.....	28

2.5.3	Absorptionskoeffizient für verschiedene Halbleiter	29
2.5.4	Dotierung von Halbleitern.....	30
2.5.5	Fermienergie und elektrochemisches Potential.....	31
2.6	Minoritäten, Rekombination, Lebensdauer.....	32
2.6.1	Strahlende Rekombination	32
2.6.2	Nichtstrahlende Rekombination	33
2.6.3	Bedingung für eine hocheffiziente Solarzelle	34
3	ENERGIEWANDLUNG	35
3.1	Thermische Strahlung und chemische Energie.....	35
3.2	Maximaler Wirkungsgrad.....	35
3.3	Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie.....	36
3.4	Gesamtladungsstrom	36
3.5	Separation von Elektron-Lochpaaren.....	36
4	P-N ÜBERGANG	37
4.1	Potentialverlauf, Schottky-Näherung.....	37
4.2	Stromspannungskennlinie	38
4.3	Halbleiterheterostruktur	40
5	SOLARZELLEN.....	42
5.1	Ersatzschaltbild für Solarzellen.....	42
5.2	Solarzellenkenngrößen.....	42
5.3	Die reale Solarzelle	43
5.4	Temperaturabhängigkeit.....	44
5.5	Der optimale Bandabstand	44

5.6	Verlustanalyse.....	44
5.7	Auswahlkriterien für Solarzellen.....	45
6	REALISIERUNGSKONZEPTE	46
6.1	Si-Solarmodul Herstellungssequenz	46
6.1.1	Herstellung von reinem Silizium.....	47
6.1.2	Kristallzuchtverfahren für Si.....	48
6.1.3	Herstellung von Si-Scheiben.....	48
6.1.4	Herstellung von Si-Bändern.....	49
6.1.5	Neue Verfahren und experimentelle Grenzen.....	50
6.2	Industrielle Fertigung von Si-Siebdruck-Solarzellen.....	50
6.3	Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen.....	52
6.3.1	Rolle des Wirkungsgrades.....	52
6.3.2	Minimierung rekombinatorischer Verluste	52
6.3.3	Optische Optimierung	52
6.3.4	Minimierung ohmscher Verluste.....	53
6.3.5	Rückseitenkontaktzellen.....	53
6.4	Von der Zelle (Wafer) zum Modul, Modultechnik	55
6.5	Standardisierte Testverfahren	57
6.6	Dünnschichtsolarzellen	59
6.6.1	Kristalline Si-Dünnschichttechnik (Abscheideverfahren für c-Si)	60
6.6.2	a-Si-Solarzellen	62
6.6.3	CdTe-Solarzellen.....	63
6.6.4	Cu(In,Ga)Se ₂ -Solarzellen	64
6.6.5	Kontaktschichten: Transparent leitfähige Oxyde.....	65
6.7	Solarzellen unter konzentriertem Licht (CPV Concentrator PV	66
6.7.1	Einleitung	66
6.7.2	Effekte der Konzentration	66
6.7.3	Multispektralzellen (III-V-Solarzellen).....	67
6.7.4	Epitaxie.....	68

6.7.5	Aktueller Stand der GaAs-Technologie	69
6.8	Organische Photovoltaik und Perowskit-Solarzellen.....	69
6.8.1	Organische Halbleiter.....	70
6.8.2	Polymere mit niedrigem Bandabstand	71
6.8.3	Semitransparente und Tandem-Zellen (OPV).....	71
6.8.4	Die OPV-Industrie.....	71
6.8.5	Farbstoffsolarzellen, Perowskit-Solarzellen.....	71
6.9	Neue Ideen zur Überwindung des Shockley-Queisser-Limits.....	73
6.9.1	Grundlegende Thermodynamische Aspekte	73
6.9.2	Spektrale Trennung/Tandemzellen/Stapelzellen.....	74
6.9.3	Heiße Ladungsträger	74
6.9.4	Stoßionisation.....	74
6.9.5	Zweistufenabsorption	74
7	SYSTEMTECHNIK.....	75
7.1	Allgemein, Einstrahlung und Verbrauch.....	76
7.2	Wechselrichter und Netzkopplung	77
7.3	Systemkonfiguration	80
7.4	Zusatzstromerzeuger	81
7.5	Energieausbeute und Performance Ratio	84
7.6	Gebäudeintegration.....	85
7.7	Solare Nachführung	85
8	SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE.....	87
8.1	Einleitung	87
8.2	Konzentration solarer Strahlung.....	87
8.3	Grundlagen Wärmetransport	87

8.4	Absorberrohre	88
8.5	Parabolrinnenkraftwerke	89
8.5.1	Speicherung	90
8.6	Fresnel-Kollektor-Kraftwerke	91
8.7	Solare Turmkraftwerke	91
8.8	Dish-Stirling-Systeme	94
8.9	Aufwindkraftwerke	94
9	SOLARKOLLEKTOREN	96
9.1	Bedeutung der Solarthermie	96
9.2	Kollektortypen	96
9.2.1	Schwimmbadheizung	96
9.2.2	Flachkollektor	96
9.2.3	Vakuumröhrenkollektor	97
9.3	Systemeinbindung	97
9.4	Kennwerte von Kollektoren	98

1 Einführung

1.1 *Historie der Photovoltaik*

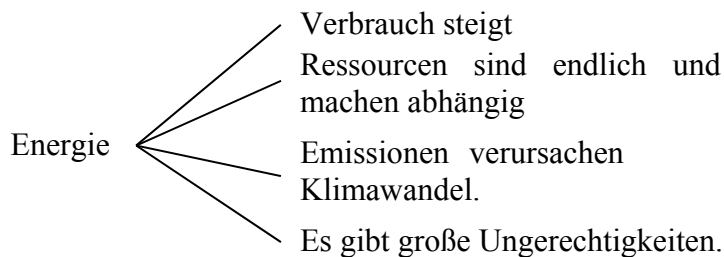
1839	Becquerel; entdeckt den photovoltaischen Effekt: wässriger Elektrolyt, Licht-induzierte photochemische Reaktion
1873	Selen verändert den elektrischen Widerstand unter Lichteinwirkung
1874	Fritts: erste Festkörpersolarzelle Cu/Se/Au-Folie
1874/75	Fritts, W. v. Siemens beschreiben großes Potential der PV
1885	Fritts kündigt Wettbewerb mit Kohle befeuerten Anlagen (Edison) an
1916	Czochalski entwickelt ein Verfahren um kristallines Si zu züchten
1929	Visionen erster Anwendungen in Gebäuden
1931	erste Lichtmessgeräte auf Basis von Se
1941	erste (zufällig dotierte) Si-Dioden (1947 erster Si Transistor)
1954	Chopin, Fuller, Pearson: erste n/p-Solarzelle (Diffusionsdotierung) auf Si-Basis danach erste Module von Bell Laboratorien
1954	erste CdS Zellen
1955	Start der ersten kommerziellen Produktion
1958	erste Satelliten mit PV
1963	erste PV-Module, CdTe
1975	erste CIS Solarzellen
1976	erste a-Si Solarzellen

Nach den Erwartungen von 1980 hätte die Kostenreduktion bis in das Jahr 2000 deutlich schneller gehen müssen (ca. 1 \$/W_p).

1.2 Energie

- Das Prinzip der Nachhaltigkeit.

Die Energiefrage ist eine globale Herausforderung.



- Energieeinheiten (Steinkohleeinheiten, Öläquivalent) und Vorsätze; Photovoltaik: 1m² ca. 100 kWh/a (bei 10 % Wirkungsgrad in Karlsruhe)

Leistung ist der Energiestrom oder die Energie pro Zeiteinheit (gebräuchliche Einheiten in der PV: kW, kWh).

1.2.1 Weltenergieverbrauch und Ressourcen

Der Weltenergieverbrauch hat sich von 1973 bis 2013 mehr als verdoppelt:

1973: 61070 Mtoe → 2013: 13541 Mtoe (oe: oil equivalent)

Der elektrische Energieverbrauch der Welt hat sich von 1973 bis 2013 fast vervierfacht!

1973: 6131 TWh → 2013: 18930 TWh).

Die Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung sind 2013 hierbei: fossil 67,4 %, nuklear 10,6 %, Wasser 16,3 %, andere (Geothermie, Solar, Wind, Bio, Abfall, Wärme) 5,7 %.

Der pro Kopf Primärenergieverbrauch ist sehr ungleich verteilt. Beispiel für 2011: Einwohner: USA ca. 240 GJ (leicht fallend), Deutschland ca. 160 GJ (leicht fallend), China ca. 80 GJ (stark steigend), Afrika ca. 30 GJ, Indien, Asien ohne OPEC ca. 25 GJ (leicht steigend);

- Die Ressourcen der fossilen Brennstoffe sind endlich (grobe Reichweitschätzung: Erdöl 54 a, Gas 61 a, Kohle ca. 142 a).
→ Abhängigkeiten (D wird von immer weniger Ländern abhängig) bedeuten Sicherheitsrisiko. Die Importabhängigkeit der deutschen Energieversorgung war 2014 bei Steinkohle 87 %, bei Erdgas 88 % und bei Mineralöl 98 %.
- Die Energiepreise in D sind steigend, jedoch steigen die Preise für Erdgas und Heizöl stärker als z. B. für elektrische Energie. Wenn die Erzeugung von EE weiter stark steigt, wird es ein temporäres Überangebot an fossiler Energie geben, was die Preise fallen lässt!! Die Einführung von EE ist deshalb kein Selbstläufer.
- Primärenergie – Sekundärenergie – Endenergie – Nutzenergie
Wandlungsverluste, Transportverluste können sehr hoch sein (z. B. 92 % bei der Erzeugung von „Raumlicht“ aus Kohle).

Aktuelle weltweite Diskussion über die Energieversorgung wird von Naturkatastrophen (z. B.: Erdbeben in Japan und anschließendem Atomunfall) mehr oder weniger unkalkulierbar beeinflusst.

1.2.2 Erneuerbare Energie

Die EE sind langfristig eine nachhaltige Lösung.

- Solar: Wasser, Wind, direkte Nutzung der Solarstrahlung, Biomasse
- Geothermie
- Gravitation (Gezeitenkraftwerke)

Nutzung der Solarstrahlung hat höchstes Potential. Die Sonne strahlt jährlich eine Energie zur Erde, mit der der weltweite Bedarf fast 3000-mal gedeckt werden könnte.

IEA World Energy Outlook 2013: Die Hälfte des Zuwachs bis 2035 im Bereich der elektrischen Energie weltweit wird mit Erneuerbaren Energien realisiert.

- Primärenergieverbrauch in Deutschland:
 - 2007 gesamt 13.878 PJ pro Jahr:
 - o 82 % fossile Energieträger
 - o 11 % Kernenergie
 - o 6,7 % Erneuerbare Energie (EE)
 - 2011 gesamt 13.411 PJ oder 457,6 Mio. t SKE
 - o 24,3 % Kohle, 33,8 % Öl, 20,6 % Gas: fossil 88,7 %
 - o 8,8 % Kernenergie
 - o 10,8% Erneuerbare Energie (EE)

- 2013 gesamt 13908 PJ oder 474,5 Mio. t SKE
 - o 80,2 % fossile Energieträger
 - o 7,6 % Kernenergie
 - o 11,5 % Erneuerbare Energie (EE)
- 2014 gesamt 13095 PJ
 - o 80,2 % fossile Energieträger
 - o 8,1 % Kernenergie
 - o 11,1 % Erneuerbare Energie (EE)
- Anteil der Erneuerbaren Energien in D am Endverbrauch
 - o 2009: 10,1 %
 - o 2010: 11 %
 - o 2012: 12,6 %
 - o 2013: 12,3 % (absolut um 3 % gestiegen, rel. nicht wegen erhöhtem witterungsbedingten Energieverbrauch)
- Anteil der Erneuerbaren Energien in D an der Bruttostromerzeugung

2009: gesamt 93,5 TWh entspricht 16,4 % (politisches Ziel >35 %)

2010 gesamt 101,7 TWh, entspricht 17,1 %

2011 121,9 TWh, entspricht 20 %

2012 136,1 TWh, entspricht 22,9 %

2015 195,9 TWh entspricht ca. 30%

--> In D wurde 2015 rund 1/3 der elektrischen Energie mit EE erzeugt.
- Anteil der Photovoltaik an der Strombereitstellung in D:

2009: 6583 GWh, entspricht 1,1 %

2010: 11729 GWh, entspricht 2 %

2011: 19340 GWh, entspricht 3,2 %

2012: 28000 GWh, entspricht 4,7 %

2013: 30000 GWh, entspricht 5 %

2014: 38,2 TWh entspricht 5,9 %

2015: 39,7 TWh entspricht 6,4 %

Aktueller Ausbaustand der PV in BW:

- In 2012 wurden rd. 650 MW neu installiert

- PV-Anlagenbestand wächst auf rd. 4,4 GW
- Stromerzeugung 2012 rd. 4,3 TWh (+1 TWh gegenüber 2011)

→ Bezogen auf die Vermeidung von CO₂ Emissionen ist PV investiv sehr teuer, hat aber langfristig ein hohes Potenzial.

1.2.3 Emissionen und Treibhauseffekt

- Treibhauseffekt erzeugt durch Treibhausgase (Moleküle)

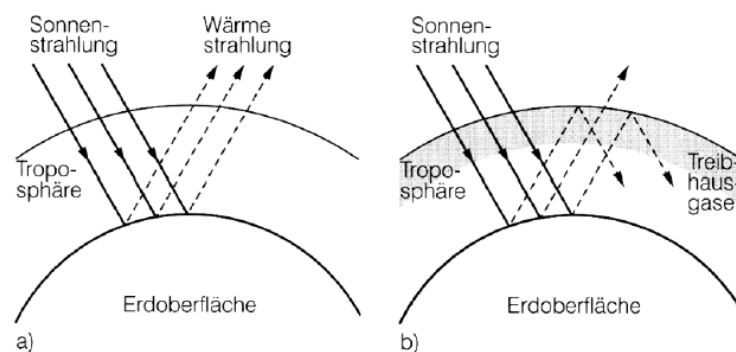
Die sechs wichtigen Treibhausgase:

- Kohlendioxid (CO₂)
 - Methan (CH₄)
 - Distickstoffoxid (N₂O)
 - Hydrofluorkohlenwasserstoffe (H-FKW)
 - Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW)
 - Schwefelhexafluorid (SF₆)
- „Verbrennung“ von fossilen Ressourcen 10^{10} t SKE/a $\Rightarrow 2,2 \cdot 10^{10}$ t CO₂
aus 1 t C entsteht 3,7 t CO₂
- Energiestromdichte Sonne → Erde $j_{E,Sonne} = 1,3 \text{ kW/m}^2$ bei Temperaturgleichgewicht: Emission entspricht der Absorption: $I_{E,emi} = I_{E,abs} \Rightarrow T_E = 275 \text{ K}$
- Treibhauseffekt: Absorption und Streuung elektromagnetischer Strahlung verschiedener Wellenlänge (Abstrahlung eines Körpers (Erde/Sonne) abhängig von dessen Temperatur) in der Atmosphäre. Der Treibhauseffekt ermöglicht Leben auf der Erde.
- Temperaturanstieg in den letzten 10 Jahren 0,7 °C! Korreliert mit CO₂ Anstieg
→ Die in den letzten 100 Jahren aufgetretene Temperaturerhöhung ist eine Folge des Treibhauseffektes. Dafür ist die von den Menschen verursachte starke Zunahme der Treibhausgase verantwortlich.
→ Das Klima wird extremer: Zunahme schwerer Stürme, Gletscher gehen zurück, Abnahme der Meereisbedeckung

→ Aktuelle Klimamodelle beschreiben die Vergangenheit relativ exakt. Für die Zukunft werden Risiken vorhergesagt (siehe z. B. Tipping Points).

- D ist bei der Erfüllung der Ziele zur Reduktion der Emissionen der Treibhausgase auf gutem Weg. Sie fallen zu über 40 % bei der Erzeugung von Strom und Gas an. Energieeffizienz und Energiesparen sowie der Wärmebereich haben große Verbesserungspotenziale.
- IPCC Sachstandsbericht vom April 2014: Trotz Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum weltweit ist die Einhaltung des 2°-Ziels möglich und bezahlbar, allerdings nur mit einem tiefgreifenden Wandel in Gesellschaft und Wirtschaft

- ☞ Spurengase in der Atmosphäre verursachen einen natürlichen Treibhauseffekt: CO_2 , H_2O
- ☞ globale Durchschnittstemperatur bei 15°C , sonst: -18°C
- ☞ zusätzliche Treibhausgase mit hoher Absorption im langwelligigen Bereich verstärken diesen Effekt: CO_2 , CH_4
- ☞ umweltbedingte Erwärmung heute $\sim 1,5\text{ K} - 2,5\text{ K}$



1.2.4 Energieszenarien, Energiewende

- Alle Energieszenarien sagen einen großen Ausbau der EE voraus. Die Ziele der Bundesregierung für 2020, die auch mit der EU abgestimmt sind, lauten: 18 % Anteil der EE am gesamten Endenergieverbrauch und 35 % EE Anteil am gesamten Stromverbrauch
- Längerfristig hat die aktuelle Bundesregierung in ihrem in 9/2010 verabschiedeten Energiekonzept 2050 einen Anteil am Stromverbrauch von 80 % vorgesehen, bei sehr ambitionierten Einsparzielen von 50 %. Andere Studien (FVEE) kommen zu dem Ergebnis, dass auch eine 100 % EE Versorgung bis 2050 möglich wäre.

- Der Ausbau der Speichertechnik (kurz = Tagesgang, lang = saisonal) und der Ausbau der Übertragungs- und Verteilernetze ist eine „Not“-wendige Zukunftsaufgabe. Ebenso Lastmanagement, Ertragsprognose etc.
- Eine wichtige Zukunftsaufgabe ist ebenso die Elektrifizierung nicht elektrifizierter Gebiete.
- Bei der Kostenbewertung erfolgt eine gesamtheitliche Bewertung, die die vermiedenen Umweltschäden, kommunale Wertschöpfung, Strompreisreduktion, vermiedene Energieimportkosten den Kosten (EEG-Differenzkosten, Ausgleichs- Netzkosten) gegenüberstellt.

Erneuerbare Energien: Ziele der Bundesregierung			
EE - Anteil am Stromverbrauch		EE - Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	
bis spätestens	[%]	bis	[%]
2020	mind. 35	2020	18
2030	mind. 50	2030	30
2040	mind. 65	2040	45
2050	mind. 80	2050	60

Stand Feb. 2013, AGEESat, BMU

Bis zum Jahr 2020 soll der Anteil der erneuerbaren Energien an der gesamten Wärmebereitstellung auf 14 % und auf 10 % am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor ansteigen.

Diese Ziele tragen u. a. mit dazu bei, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis zum Jahr 2020 (bezogen auf das Jahr 1990) um 40 % und bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % zu senken. Dabei soll der Stromverbrauch bis zum Jahr 2020 um 10 % und bis zum Jahr 2050 um 25 % sowie der Primärenergieverbrauch bis 2020 um 20 % und bis 2050 um 50 % gesenkt werden.

1.2.5 Warum Photovoltaik zur Energiekonversion?

- Viele Menschen ohne Elektrizität, dezentrale Energieerzeugung
- Keine Ressourcenlimitierung, Solarstrahlung ist global
- Umweltfreundlich und modular
- Relativ sicher; Wirtschaftsfaktor
- Zunächst Abdeckung von Spitzenlasten (siehe Tagesgang)

→ Rund 1,6 Mrd. Menschen sind ohne Strom. In EU reichen die Einstrahlungswerte von 600 bis 2200 kWh/m²/a. Damit lässt sich zwischen 150 und 1650 kWh/kWp elektrische Energie wandeln (Ein Deutscher verbraucht ungefähr 10 kWh/Tag).

Mitteleuropa: pro Jahr Globalstrahlung: ca. 1200 kWh/m²

1 kW_p PV optimal ausgerichtet: ca. 1000 kWh/pro Jahr

Deutschland: Juni 2000: Monatsmittel 150 kWh/m²

Kiel (im Nov. z. B. nur 20 - 30 kWh/m²)

→ Kosten für Erweiterung des Versorgungsnetzes pro Einzelhaushalt in verschiedenen Ländern ca. 1500 \$

Strombedarf Entwicklungsländer ca. 0,5 kWh/Tag (10 kWh/Tag in Deutschland)

1.3 Photovoltaik Überblick

1.3.1 Kosten, Preise und Märkte

Netzgekoppelt ↔ Netzfern (extraterrestrisch):

- | | | |
|---|---|-------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Industrie • Entwicklungsländer • Konsumerprodukte | } | schon seit vielen Jahren profitabel |
|---|---|-------------------------------------|

Seit wenigen Jahren sind auch netzgekoppelte Anlagen teilweise profitabel.

Die PV Markt startete bei Weltraumanwendungen. Bei der Stromversorgung von Satelliten und Raumstationen ist sie heute nicht mehr wegzudenken.

Der Trend geht zur Netzkopplung (2000: 50 % aller Installationen 2007: 90 %, 2010: 98 %, 2014 99 %). Jedoch besteht bei der ländlichen Elektrifizierung ein enormes Potenzial, das die Strukturen in den jeweiligen Ländern deutlich verbessern kann (Einkommensmöglichkeiten durch Beleuchtung, PC, Mobiles, www, Krankenstationen, Bildungshäuser, Bewässerungssysteme etc.) Heute gibt es Großanlagen mit 290 MWp auf 971 ha mit einer Investitionssumme von 1,8 Mrd. \$.

Bei der wirtschaftlichen Diskussion erfolgt eine differenzierte Betrachtung:

Kosten/Preise, Module/Systeme, Investitionskosten/Stromgestehungskosten

PV Strom ist nicht mehr teuer

Anfang 2015 beliefen sich die Preise für das fertig installierte System auf ca. 1200 €/kWp. 2002 waren es z. B. noch ca. 5400 €/kWp. Die Preise für Module folgen einer Preislernkurve (doppellogarithmische Auftragung mittlerer Preis über kumulierte installierte Leistung.).

In der Vergangenheit fielen ca. 2/3 der Systemkosten auf das Modul. Bei der kristallinen Siliziumtechnik davon ca. 1/3 auf den Wafer, 1/3 auf die Zelle und 1/3 auf die Modultechnik. Der Anteil der sonstigen Kosten im System (Wechselrichter, Kabel, Aufständigung, Installation) hängt stark vom Anwendungsfall ab (z. B. Aufdachmontage, Freifeldanlage). Durch stark fallende Modulpreise verändern sich die Verhältnisse. Das Modul macht inzwischen nur noch ca. 30-40 % des gesamten Systempreises.

Die Modulpreise liegen derzeit bei ca. 50-60 €/Wp in Einzelfällen sogar bei 40 €/Wp.

Die Stromentstehungskosten lagen Anfang 2015 zwischen ca. 8 und 15 €/kWh. Dabei sind große Freiflächenanlagen am unteren und kleine Dachanlagen am oberen Ende.

Damit ist in Deutschland die „grid parity“ im Jahre 2012 erreicht.

Grid Parity:

Stufe 1 PV Strom = Haushaltsstrompreis (in D 2012, abhängig vom Strompreis)

Achtung: Verteilung, Steuer, Konzessionsabgaben stecken nur im Haushaltsstrompreis

Stufe 2 PV Strom = Industriekundenpreis (in D 2020)

Stufe 3 PV Strom = Erzeugungskosten konv. Energie (in D 2025 (ca. 6ct/kWh))

2008: Gesamtproduktionsmenge weltweit: ca. 6 GWp,

2008: ca. 1500 MWp neue PV-Installationen in D (davon 9 % auf Freiflächen)

Spanien dominierte mit 2,5 GW den Markt in 2008 (zu hohe Einspeisevergütung)

2009: PV Installationen ca. 7,2 GW weltweit

2010: PV Installationen ca. 15 GW weltweit

2011: PV Installationen ca. 27,7 GW weltweit (gesamte installierte Kapazität 70 GWp)

2012: PV Installationen ca. 24 GW weltweit (gesamte installierte Kapazität ca.103 GWp)

2013: PV Installationen ca. 33,8 GWp weltweit (gesamte installierte Kapazität ca.137 GWp)

2015: PV Installationen ca. 57 GWp weltweit (gesamte installierte Kapazität ca.200 GWp)

Der Anteil der Dünnschichttechnologien liegt bei ca. 10 %. Der Marktanteil Deutschlands ist rückläufig. Er ist in 2015 auf ca. 1,4 GWp gesunken. Unter den TOP10-Herstellern befinden sich im Wesentlichen chinesische Unternehmen, die alle in 2012 erhebliche Verluste aufgrund des Preiskampfes zu verkraften hatten. Weltweit verzeichnet die PV ein enormes Wachstum. Die Wachstumsmärkte sind: China, Indien, USA, Türkei,

In Deutschland wurden erste Großanlagen 2007/2008 aufgebaut. Beispiel Waldpolenz 40 MWp Anlage. (Konversionsflächen). In Deutschland geht der Trend zu größeren Anlagen (90 % auf Dächern). Die mittlere Anlagengröße in 2010 neuinstallierter Anlagen beträgt ca. 30 kWp. In Bayern und Baden-Württemberg sind mit Abstand die meisten PV Anlagen installiert (ca. 0,5 Mill.). Die Dichte beläuft sich auf ca. 90 kW/km².

➔ Zubau in D: 2012 ca. 7.5 GWp zu insgesamt 25 GWp kumulativ!

(2010: 12 TWh (2 % des Bruttostromverbrauchs)

(2011: 19 TWh (3,1 % des Bruttostromverbrauchs)

(2012: 28 TWh (4,7 % des Bruttostromverbrauchs)

(2013: 30 TWh (5 % des Bruttostromverbrauchs)

(2014: 38 TWh (5,9 % des Bruttostromverbrauchs)

(2015: 40 TWh (6,4 % des Bruttostromverbrauchs)

Im netzgekoppelten Betrieb wird die Netzeinbindung, die Steuerung der Lasten und die Rückeinspeisung, sowie Eigenverbrauch (auch z. B. Elektrofahrzeuge) und Batteriekopplung zunehmend wichtig.

1.3.2 Markteröffnungsmaßnahmen in Deutschland

Maßnahmen des Gesetzgebers in D: „100.000-Dächer-Programm, „Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)“ ab 2000. Der Energieversorger muss dem „Einspeiser“ den Strom abkaufen (Einspeisevorrang). Das Gesetz garantiert die Abnahme für 20 Jahre. Im Jahr 2000 war die Vergütung für kleine Anlagen auf Gebäuden z. B. 57,4 ct/kWh (Einstieg 2001 -5 % etc.)

Die Auswirkungen auf den Strompreis sind gering bis moderat (EEG Umlage ca. 6,26 ct/kWh (2014)).

Das EEG, insbesondere der Teil für die PV wurde nahezu jährlich angepasst.

Eine Herausforderung sind die stark zunehmenden „Differenzkosten“, die bei diesem starken Wachstum in Milliarden Höhe vom deutschen Stromkunden getragen werden müssen.

Trotz dieser Zukunftsherausforderung ist das EEG ein voller Erfolg und eine lohnende Zukunftsinvestition, die in ähnlicher Form von anderen Ländern ebenso eingeführt wird. Derzeit gibt es in über 50 Ländern EEG oder EEG ähnliche Konzepte. Jedoch müssen die Vergütungssätze dem Preisniveau angepasst werden. Dies zu gewährleisten und gleichzeitig die Investitionssicherheit nicht zu gefährden ist die große Herausforderung, die aktuell diskutiert wird. Die EEG Umlage (2012: 3,59 ct/kWp, 2013: 5,27 ct/kWp) enthält eine Menge verschiedener Abgaben. Die eigentlichen reinen Förderkosten machen weniger als 50% aus. Stromintensive Industriebetriebe sind von der Umlage ausgenommen.

Vergleicht man die Stromgestehungskosten heutiger Optionen für elektrische Energie, so ist die PV bei 5-12 \$ct./kWh. Damit ist sie absolut konkurrenzfähig und deutlich günstiger als Strom aus Kohle, Erdöl oder Kernkraft (nach einer USA Studie von 2015 für neu zu bauende Kraftwerke).

Für Deutschland gibt es klare Ausbauszenarien für PV und Wind, die für D das größte Ausbaupotenzial im Rahmen der Energiewende unter den EE haben.

1.3.3 Übersicht PV-Technologien

- Si: mono-, multikristallin: Scheibentechnologie
 - III/V: GaAs Konzentratorzellen
 - CIS, CdTe, a-Si: Dünnschichtzellen, Polymere, Maximalwirkungsgrade je nach Technologie zwischen 7 und 44 %. Erheblicher Unterschied zwischen Labormustern und kommerziellen Produkten.
- ➔ Si-wafer basierende Technologie ist Marktführer (Anteil 90 %)
- ➔ Es gibt große Wirkungsgradunterschiede am Markt: 5 %. (z. B. flexibles a-Si)-20 % (monokristallines Si, Hochleistungszellen).
- ➔ Sehr viele Investitionen in 2006-2010 in Dünnschichttechnik, vor allem in Deutschland und Japan. In den Jahren 2009-2011 investierten sehr viele chinesische Unternehmen in Produktionsstätten hauptsächlich im kristallinen Si-Bereich.

In den PV Produktionsunternehmen gibt es derzeit große Unsicherheiten, aufgrund der Überkapazitäten spiegeln die Preise die Kosten nicht wieder. In diesem „Preiskampf“ befinden sich die produzierenden Unternehmen z.T. mit sehr unterschiedlichen Randbedingungen.

1.3.4 Netzintegration und Nutzungspotenziale

PV ist seit ca. 2012 zu einer wichtigen Säule unseres Stromnetzes geworden. Wind und PV ergänzen sich gut. Die Versorgungsqualität als auch die Energiekosten sind die wichtigsten Ziele.

Merit-Order Effekt: Vorrangige Einspeisung der EE verdrängen teuren Spitzenlaststrom

Verteilungs- und Übertragungsnetze:

PV-Anlagen sind hauptsächlich am Niederspannungsnetz angeschlossen, d. h. sehr dezentral verteilt.

Welche Leistungen, welche Dynamik verträgt das Netz (Netz zwischen 40-80 GW)?

- Lokal (z. B. ländliche Gegend) kann es zu Überlastungen führen.

- Übertragung (50,2 Hz Problem (hartes Abschneiden), Nachrüstung ist notwendig)
- Horizontale Leistungsausregelung (PV 80 % in Niederspannungsebene, 70 % der Anlagen <100 kW) Neuregelung speziell für Mittelspannungsebene).

Lösungen:

(Ab)Regeln, Speicher, Verteilung ausbauen, Eigennutzung

→ Leistungsausgleich durch intelligente Verknüpfung verschiedener EE Kraftwerke und Speicher (Zur Überbrückung sind regelbare konventionelle Kraftwerke wichtig.).

Nutzungspotenziale:

- Das technische Stromerzeugungspotenzial in D liegt nach verschiedenen Studien bei 135 bis 210 TWh. Damit sind bisher nur wenige Prozent der zur Verfügung stehenden Fläche tatsächlich schon genutzt. (gesamter Stromverbrauch in D lag 2007 bei 540 TWh, 2010 bei 600 TWh)

→ Theoretisches Nutzungspotenzial der PV in Deutschland ~30 % des elektrischen Energieverbrauchs.

Der Anteil der Tages- und Wochenverläufe (Solar und Wind) überkompensiert an guten Tagen die Mittagsspitze. Bei einem steigenden Anteil fluktuierender Erzeugung in der deutschen Energieversorgung ist es wichtig alle Flexibilisierungsoptionen zu nutzen:

- Flexible Erzeugung mit hohem Eigenverbrauchsanteil
- Einbindung von Speichern (kurz = Tagesgang und lang = Jahreszeitlich)
- Steuerung der Lasten, Smart Grids, Einbindung von Kommunikationstechniken
- Verknüpfung der Stromversorgung mit Elektromobilität, Wärme, power to gas, Kombikraftwerke, Ergänzung PV, Wind im optimalen Mix etc.
- Import/Export, aber auch exakte Prognosen auf der Bedarfs- (Lastprofilprognose) - sowie Angebotsseite (Solar-Wind-Prognose)
- Netzstützung durch PV und Regelbarkeit Intelligente Leistungselektronik:
 - o Wirkleistungsabregelung (Abregeln der PV-Anlage)
 - o Wirkleistungsbegrenzung (70 % Leistungsbegrenzung)
 - o Blindleistungsbereitstellung (bisher nur Mittelspannungsnetz)

- Intelligenter Ausbau der Netze in den verschiedenen Ebenen

Aktuelle Werte aus D:

Eispeiseleitung: <http://www.sma.de/unternehmen/pv-leistung-in-deutschland.html>

Tatsächliche Stromproduktion:

<http://www.eex-transparency.com/startseite/strom/deutschland/>

Weltweit sind ca. 200 GW (Ende 2015) PV installiert. Damit ist 1 % der weltweiten Stromversorgung aus PV Strom. Alle Prognosen bescheinigen der PV weltweit ein großes Wachstum von ca. 40 GW/a + 10-20 %/a.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Photonen

Dualistische Betrachtung des Lichtes als Welle und als Teilchen.

Wichtig ist die Unterscheidung von physikalischen Größen des elektromagnetischen Spektrums und der physiologischen Wahrnehmung der Photometrie. Die Photometrie spielt bei der Beleuchtungstechnik beispielsweise eine wichtige Rolle. Hier wird die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges, die sich nur auf den kleinen Teil von 400-800 nm des elektromagnetischen Spektrums bezieht und zudem noch sehr große Empfindlichkeitsunterschiede und große Adaptionmöglichkeiten ausnutzt, miteinbezogen – in der PV spielt sie keine Rolle.

Wir verwenden das Wellenbild bei Effekten wie Beugung und Interferenz und das Teilchenbild beim quantenhaften Transport von Energie.

Welle: $A(x, t) = A_0 \cdot e^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)}$

Teilchen: Impuls: $p = \hbar \vec{k} = \frac{h\omega}{c}$; Energie $e_\gamma = \hbar \omega = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$; $c = \frac{c_0}{n}$

$$\hbar \omega = \hbar |\vec{p}| = e_\gamma(\vec{p}) \quad \text{Zusammenhang}$$

Photonendichte: $dn_\gamma(\hbar\omega) = D_\gamma(\hbar\omega) f_\gamma(\hbar\omega) d(\hbar\omega)$

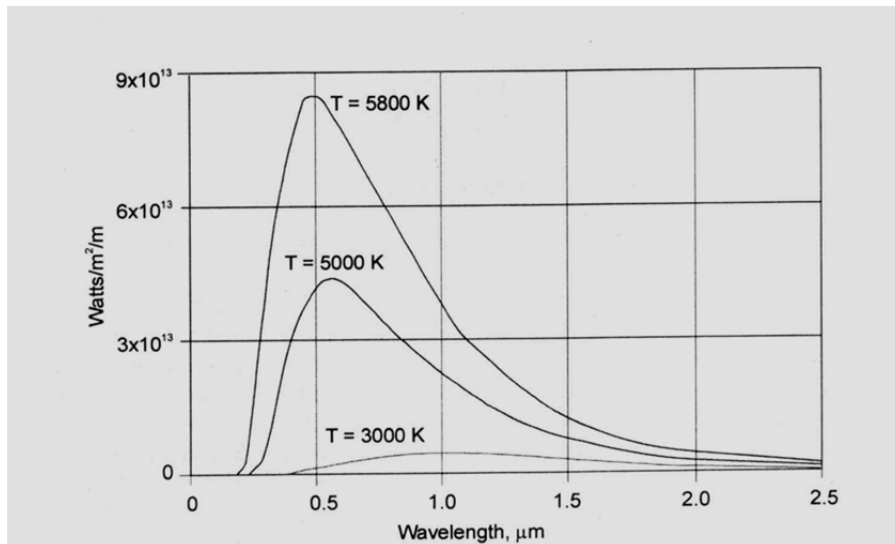
Das Planck'sche Strahlungsgesetz

Schwarzer Strahler: $\alpha(\hbar\omega) = 1$

$$dn_\gamma(\hbar\omega) = D_\gamma(\hbar\omega) d(\hbar\omega) / (e^{\hbar\omega/kT} - 1) = \frac{(\hbar\omega)^2 d\Omega}{4\pi^3 \hbar^3 c^3} \cdot \frac{d(\hbar\omega)}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$$

Die Herleitung des Planck'schen Strahlungsgesetz (Photonendichte) erfolgt über das Produkt aus Zustandsdichte (Zahl der Zustände pro Volumen und Energieintervall und der Besetzungswahrscheinlichkeit (Bose Einstein-Verteilung).

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz erhält man aus dem Integral der Gesamtstrahlungsenergie über den Raumwinkel und allen Energien: $j_E = \sigma \cdot T^4$



Schwarzkörperstrahlung bei verschiedenen Temperaturen

Sichtbares Licht 400-800 nm, Elektromagnetische Spektrum → 21 Zehnerpotenzen

Spektrale Empfindlichkeit von Solarzellen: (je nach Typ): 350-1200 nm

Absorption in den Pflanzen zur Photosynthese (Chlorophyll) im Roten bei ca. 660 nm mit ca. 40 nm Breite

Für denselben Energiestrom müssen mehr „rote“ als „blaue“ Photonen fließen.

Der Energiestrom eines schwarzen Strahlers kann über der Wellenlänge oder über der Energie aufgetragen werden. Die Maxima befinden sich an verschiedenen Stellen.

2.2 Die Sonne als Strahlungsquelle

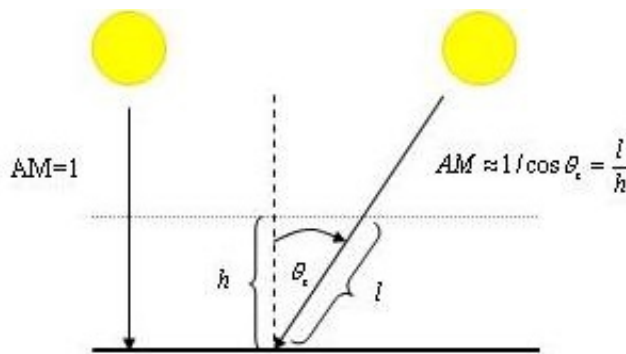
2.2.1 Direkte, diffuse Strahlung

In 30 Min. strahlt die Sonne den Jahresbedarf an Primärenergie auf die Erde (ca. 10^{14} kW).

Die Globalstrahlung setzt sich aus der diffusen sowie der direkten Strahlung zusammen: $G = G_b + G_d$ (direkt + diffus). Wichtig ist auch der Albedo (Reflexion) – Anteil. Der Diffusanteil beträgt auch an klaren Tagen ca. 10 %.

Die mittlere jährliche Einstrahlung ist in D ca. 1100 kWh/m²a, am Äquator ca. das Doppelte. Selbst in D liegt sie zwischen 900 und 1200 kWh/m²a und schwankt auch von Jahr zu Jahr mit Abweichungen zum langjährigen Mittel von bis zu ca. 10 %.

2.2.2 Sonnenspektrum, Air Mass Faktor



Die Definition des „air mass Faktors“ AM

2.2.3 Das Referenzspektrum der PV

Referenzspektrum: AM 1,5; $j_E = 1000 \frac{W}{m^2}$; 37°

Weltraum: AM0, Abschwächung in Atmosphäre durch Absorption von Molekülen.

Sonderdefinition bei Konzentratorzellen (hoch konzentrierendes System)

Sonnenlicht ist parallel

Solarkonstante der Erde $\sim 1,3 \text{ kW/m}^2$; Mars $0,6 \text{ kW/m}^2$

2.3 *Licht an Grenzflächen und in Materie*

$$r + t + a = 1$$

$$j = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ für nicht-schwarze Strahler}$$

$$\varepsilon(\hbar\omega) = a(\hbar\omega) \text{ Emission} = \text{Absorption}$$

$$j(x) = j_0 \cdot e^{-\alpha x} \text{ Beer'sche Gesetz, Bei Halbleitern gibt es eine Grenzenergie.}$$

$$\text{Fresnel-Gleichungen: } R = \frac{(1-n)^2}{(1+n)^2}; T = \left(\frac{2}{1+n}\right)^2; n = \frac{n_b}{n_a}, \text{ Interferenzen}$$

$$\text{Antireflexschicht: } n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$$

2.4 *Basisgleichungen*

2.4.1 *Maxwellgleichungen*

Die Maxwellgleichungen gehören zu den schönsten Entdeckungen der Physik. Vorher waren Elektrizität, Magnetismus und die Optik unabhängige Gebiete (relativistisch invariant).

$$1) \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Es gibt keine magnetischen Ladungen. (Gauß'sches Gesetz)}$$

$$2) \operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} \rho \quad \text{Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld. (Coulomb Gesetz,}$$

$$\text{Poissongleichung)} \rightarrow \vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi; \Delta \varphi = -\frac{1}{\varepsilon_0} \rho(x)$$

$$3) \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ein veränderliches B-Feld erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld}$$

(Faraday'sches Gesetz, Induktionsgesetz)

$$4) \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Ein veränderliches elektrisches Feld oder ein elektrischer Strom erzeugen magnetisches Wirbelfeld.

Wichtige Ableitungen: Ladungserhaltung, Kontinuitätsgleichung, Optik an Grenzflächen, Lichtausbreitung, Berechnung elektrischer Potenziale....

2.4.2 Kontinuitätsgleichung

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial \vec{j}}{\partial x} = -\rho(x)$$

$$\text{Strom: } \vec{j} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E}$$

$\rho(x) \rightarrow$ einmal integriert: Feld $\vec{E} \rightarrow$ noch mal integriert: Potential ϕ

2.5 Halbleiter

2.5.1 Grundsätzliche Eigenschaften

In isolierten Atomen haben Elektronen scharfe Energiewerte. Durch Verringerung des Abstands kommt es zu einer Aufspaltung in Energiewerte – oder anders ausgedrückt durch die Überlappung der Elektronenorbitale $\rightarrow$ Ausbildung von Bändern. Die entstehende Bandstruktur wird durch die Kristallstruktur bestimmt.

Halbleiter und Isolatoren haben verbotene Bereiche: Die sogenannte Bandlücke. Sie ist erkennbar bei der Energie-Impulsauflage. Für den elektrischen Ladungstransport ist der Besetzungszustand entscheidend. Ganz volle und ganz leere Bänder tragen nicht zum elektrischen Energietransport bei.

Absorption von Photonen

Photonen (Lichtteilchen)

Phononen (Schwinguingsquanten des Gitters, Wärme)

Elektronen (freie, gebundene, freie „tragen den elektrischen Strom“)

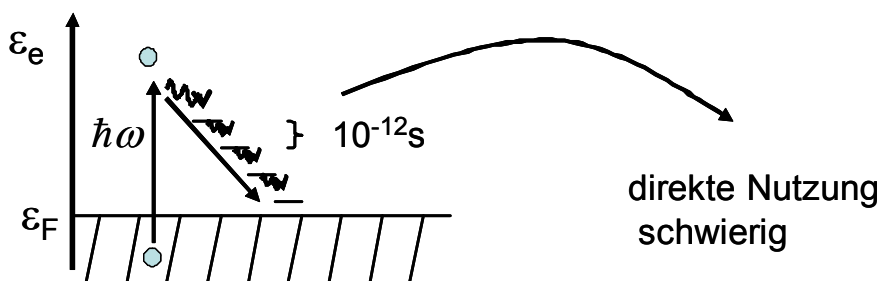
Elektronenfehlstellen (Löcher oder „holes“ mit Abkürzung h)

Halbleiter: bei $T=0$ (+perfekten Kristallgitter und ohne Fremdstoffe) $\rightarrow$ keine freien Elektronen (ganz volle oder ganz leere Bänder)

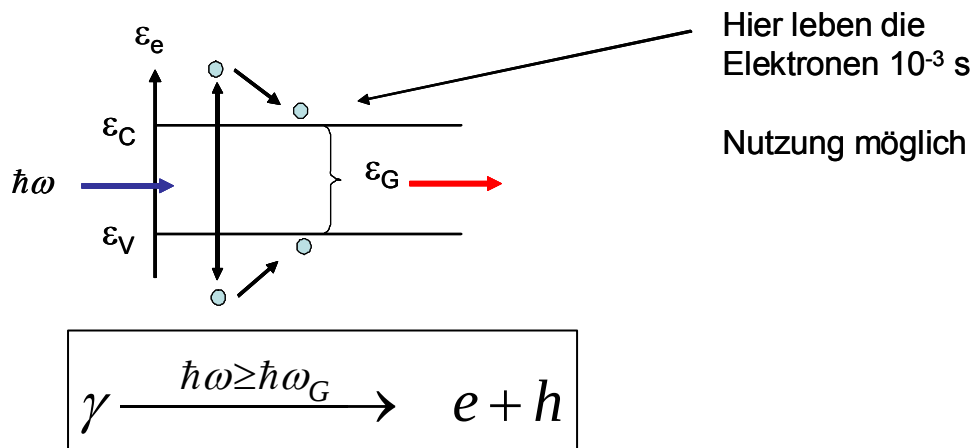
Bei der Thermalisierung geben die „heißen“ Elektronen ihre Energie „in kleinen Portionen“ an das Gitter ab.

Metall	} Thermalisierung	10^{-12}s
Halbleiter		10^{-3}s

Optische Absorption im Metall



Optische Absorption im Halbleiter



2.5.2 Physikalische Beschreibung

Energie-Impuls-Beziehung: $\varepsilon_{e,kin} = \frac{p^2}{2m_e^*}$;

$$\boxed{dn_e(\varepsilon_e) = D_e(\varepsilon_e) f_e(\varepsilon_e) d(\varepsilon_e)}$$

$$D_e(\varepsilon_e) = 4\pi \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (\varepsilon_e - \varepsilon_C)^{\frac{1}{2}}$$

$$f_e(\varepsilon_e) = \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon_e - \varepsilon_F}{kT}} + 1}$$

Effektive Masse: $\frac{1}{m_e^*} = \frac{d^2 \varepsilon_e}{dp_e^2}$

Die Fermiverteilung gibt die Besetzung an: Für Elektronenenergien, die wesentlich kleiner als die Fermienergie sind, ist die Fermiverteilung 1, d. h. die Bänder sind vollständig besetzt. Ist die Elektronenenergie gleich der Fermienergie, so ist die Besetzungswahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$, d. h. die Zustände sind zur Hälfte besetzt. Für Elektronenenergien sehr viel größer als die Fermienergie ist die Besetzungswahrscheinlichkeit 0, d. h. alle Zustände unbesetzt.

Integriert über alle Energien ergibt sich für nicht zu hohe Elektronendichten (Boltzmann-Näherung $N_V > n_h$, $N_C > n_e$) näherungsweise

$$n_e = N_C e^{-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}}; \quad n_h = N_V e^{-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}}$$

$$\text{intrinsisch: } n_h \cdot n_e = N_C N_V e^{-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_V}{kT}} = N_C N_V e^{-\frac{\varepsilon_G}{kT}} = n_i^2$$

$$\gamma \rightarrow e + h$$

$$p_\gamma = 0 = p_e + p_h$$

$$e_\gamma = \hbar\omega = e_e + e_h$$

2.5.3 Absorptionskoeffizient für verschiedene Halbleiter

direkte Halbleiter

$$\gamma \rightarrow e + h$$

$$p_\gamma = 0 = p_e + p_h$$

$$e_\gamma = \hbar\omega = e_e + e_h$$

$$\alpha \sim (\hbar\omega - \varepsilon_G)^{1/2}$$

indirekte Halbleiter

$$\gamma + \Gamma \rightarrow e + h$$

$$\gamma \rightarrow e + h + \Gamma$$

$$p_\gamma \pm p_\Gamma = p_e + p_h$$

$$\hbar\omega \pm \hbar\Omega = e_e + e_h$$

$$\alpha \sim (\hbar\omega - \varepsilon_G \pm \hbar\Omega)^2$$

Die Absorption setzt bei Halbleitern bei dem Bandabstand ein. Aus der Absorptionskurve über der Photonenenergie lässt sich der Bandabstand bestimmen und ob ein direkter oder indirekter Übergang vorliegt.

Absorptionslänge

$$L = \frac{1}{\alpha}$$

Direkter HL: klein, bei einigen 100 nm

Indirekter HL: groß, bei einigen 100 μm

2.5.4 Dotierung von Halbleitern

Boltzmann-Näherung $N_V > n_h$, $N_C > n_e$

Dotierung:

$$n_A \approx n_h$$

→ p-Halbleiter

$$n_i^2 = n_e \cdot n_A$$

$$\varepsilon_F = \varepsilon_V - kT \cdot \ln \frac{N_V}{n_A}$$

$$\varepsilon_F \downarrow \varepsilon_V$$

$$n_D \approx n_e$$

→ n-Halbleiter

$$n_i^2 = n_h \cdot n_D$$

$$\varepsilon_F = \varepsilon_C - kT \cdot \ln \frac{N_C}{n_D}$$

$$\varepsilon_F \uparrow \varepsilon_C$$

Quasi-Fermi-Verteilung: $n_h > n_h^0$, $n_e > n_e^0 \Rightarrow n_e \cdot n_h > n_i^2$

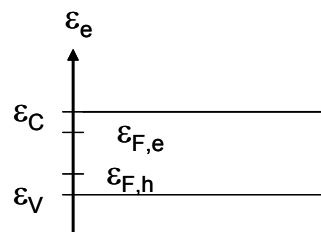
$$n_h = N_V \cdot e^{-\frac{\varepsilon_{F,h} - \varepsilon_V}{kT}}$$

$$n_e = N_C \cdot e^{-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_{F,e}}{kT}}$$

$$n_e \cdot n_h = n_i^2 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_{F,e} - \varepsilon_{F,h}}{kT}}$$

Majoritäten ↔ Minoritäten

z. B. bei Si, AM1,5 $10^{12} / \text{cm}^3$



Transportgleichung: „Drift“ = „Stoß“

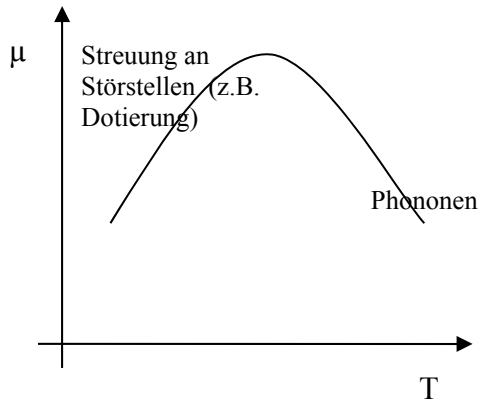
$$j_{e,h} = \sigma E = -\sigma \cdot \text{grad} \varphi$$

$$j_n = -D \cdot \nabla n \quad j_w = -\kappa \nabla T$$

$$\sigma = n_{e,h} \cdot \mu_{e,h} \cdot q, \quad \mu_{e,h} = \frac{q}{m_{e,h}} \tau$$

Temperaturabhängigkeit: $n_{e,h} \sim e^{-\frac{\epsilon_G}{kT}}$, $n_{e,h} = n_{D,A} \sim e^{-\frac{\epsilon_{D,A}}{kT}}$

- $\mu(T)$, $\mu_n > \mu_p$, bei Si!



- Die Dotierung lässt sich in einem sehr weitem Bereich einstellen:
 $n = 10^{12} / \text{cm}^3 \rightarrow 10^{21} / \text{cm}^3$

2.5.5 Fermienergie und elektrochemisches Potential

Halbleiterphysik/Thermodynamik:

extensive Größe $\leftrightarrow$ intensive Größe

HL: e-Gas als „ideales Gas“ $\Rightarrow \eta_{e,h} = \epsilon_{F,e,h}$

Differenz der elektrochemischen Potentiale = Differenz der Fermienergie = messbare Spannung

Generation von Elektronen-Loch-Paaren

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 0 = G_i(x) - R_i(x) - \text{div } \vec{j}(x)$$

2.6 Minoritäten, Rekombination, Lebensdauer

Unter Rekombination verstehen wir einen Prozess, bei dem ein Elektron unter Energieabgabe vom Leitungsband in ein Loch im Valenzband fällt. Die Energie wird mit einem Photon abgestrahlt oder geht in Wärme über. Wir teilen daher die Rekombinationsprozesse auf in strahlende und nichtstrahlende Rekombination. Die Überschussladungsträgerlebensdauer ist definiert als:

$$\tau = \frac{\Delta n}{U} \quad \begin{array}{l} \text{(= Überschußladungsträger)} \\ \text{(= Erzeugungs – bzw. Vern. rate)} \end{array}; \quad \frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}$$

2.6.1 Strahlende Rekombination

Die Rekombinationsrate ist proportional zur Elektronen- und Löcherdichte. Die strahlende Rekombination kann nicht verhindert werden. Für schwache Anregung gilt:

$$e + h \rightarrow \gamma \quad \tau = \frac{1}{B(n_e^0 + n_h^0)} = \frac{1}{2Bn_i}$$

Für die dotierten Halbleiter wird die Lebensdauer bestimmt durch die Konzentration der Elektronen (im Löcherleiter entsprechend).

$$\tau_{rad} \propto \frac{1}{2Bn_d}$$

Sie ist bspw. für Si-Solarzellen nicht begrenzend.

2.6.2 Nichtstrahlende Rekombination

Halbleiter für Solarzellen werden dotiert. Deshalb ist Auger-Rekombination nicht vermeidbar. Alle anderen Rekombinationsarten (außer der strahlenden Rekombination) können im Prinzip vermieden werden. In der Praxis erfolgt die Herstellung von Si mit sehr hohem Reinheitsgrad durch aufwändige Reinigungsprozesse und Kristallzuchtverfahren. Die Oberflächen werden durch „Passivierungsprozesse“ z. B. mit Si_3N_4 auf Si – die Korngrenzen durch Korngrenzenpassivierung mittels H behandelt. Die Halbleitersysteme reagieren elektrisch sehr unterschiedlich auf Korngrenzen, z. B. CIS ist wesentlich unempfindlicher gegenüber Korngrenzenrekombination als Si. Darin liegt einer der Gründe, warum es schwierig ist, c-Si als dünne Schicht für die PV zu verwenden.

In der Praxis hat man bei Si-Solarzellen folgende Inhomogenitäten, die zu Rekombination führen:

1. Leerstelle, substitutionelles Kohlenstoffatom, interstitielles Sauerstoffatom, Siliziumoxid-Präzipitate
2. Korngrenzen, dekoriert z. B. mit Cu, (teil)passiviert mit H
3. Dotierungen meist mit B, P
4. Oberflächen: ungesättigte Bindungen

Rekombinationsarten:

Auger $\rightarrow \tau_{Aug\ e,h} \propto \frac{1}{C_{e,h} n_{e,h}^2}$ für kleine Überschussladungsträgerkonzentrationen

Störstellen $\rightarrow$ trap, Rekombinationszentrum, SRH-Theorie

$$\tau \downarrow n_D, n_{Stör.}, v_{therm.}, \sigma$$

Oberflächen/
Korngrenzen $\Delta R_{Ober,e} = \sigma_{Ober,e} \cdot v_e \cdot n_{Ober,h} \cdot \Delta n_e = v_{R,e} \cdot \Delta n_e$

Lebensdauer: $\Delta n_e(t) = \Delta n_e(0) \cdot e^{\frac{-t}{\tau_e}}$, Überlagerungsprinzip: $\frac{1}{\tau_e} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}$

Diffusionslänge: $L = \sqrt{D \cdot \tau}$, $D = \mu \cdot \frac{kT}{q}$ (Diffusionskonstante)

In einem p-n Übergang haben wir im Bereich der Raumladungszone eine feldunterstützte Sammlung. Wie wir später sehen werden reicht dies aber nicht aus, da der Bereich zu klein ist. Deshalb ist die Diffusion von entscheidender Bedeutung.

In sogenannten Driftsolarzellen (a-Si: p-i-n) definiert man auch die Driftlänge, in die außer dem $\mu\tau$ Produkt aber das elektrische Feld E eingeht.

Bei solarer Strahlung spielen nur die Minoritäten eine Rolle. Die Zunahme der Majoritäten durch die Beleuchtung wird vernachlässigt.

2.6.3 Bedingung für eine hocheffiziente Solarzelle

$$L_0 > d > L_a = 1/\alpha$$

$$L = \sqrt{D \cdot \tau}$$

$$D = \mu \cdot \frac{kT}{q}, \quad D = \text{Diffusionskonstante}$$

Die Diffusionslänge (hier L_0) ist die Strecke, die ein Ladungsträger im Mittel bei der Diffusion während seiner Lebensdauer zurücklegt.

Die Solarzellenstruktur bzw. die geometrischen Daten werden durch die Lebensdauer, die Beweglichkeit und den Absorptionskoeffizienten bestimmt. Ziel einer Bauelementstruktur ist, möglichst alles Licht zu absorbieren und möglichst alle erzeugten Ladungsträger verlustfrei in einem elektrischen Energiestrom zu „verwerten“.

3 Energiewandlung

3.1 *Thermische Strahlung und chemische Energie*

Wandlung thermischer Strahlungsenergie in chemische Energie pro Elektronen-Loch-Paar:

Sie ist bei Halbleitern allein durch die Minoritäten gegeben und ist gleich der Summe der elektrochemischen Potenziale.

3.2 *Maximaler Wirkungsgrad*

Abschätzung wann das Verhältnis von Nutzenergie (chemischer) zu aufgewendeter Energie (thermische Strahlung) maximal ist:

Folgende Annahmen werden gemacht:

- | | | |
|---|---|--|
| 1. nur strahlende Rekombination | } | $\eta = 1 - \frac{T_0}{T_s}$ (Carnot-Wirkungsgrad
Wandlung von Wärmestrahlung in
chemische Energie; Bei Sonne und
Halbleiter auf der Erde 94,8 %) |
| 2. keine Entnahme von e, h | | |
| 3. $a(\hbar\omega = \varepsilon_G) = 1$ | | |
| 4. Strahlungsgleichgewicht | | |

Aber die komplette Energie wird von den Photonen emittiert.

Maximal nutzbarer Strom chemischer Energie:

$$j_e = \int G_e(x)dx - \int R_e(x)dx = j_{\gamma,abs.} - j_{\gamma}^0 e^{\frac{\mu_e + \mu_h}{kT}} \quad (\text{gilt bei schwacher Injektion, homogener}$$

Verteilung und nur strahlender Rekombination)

3.3 *Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie*

Zur Übung kann man so tun als könnte bei Ladungsträgern (e, h) nur ein Antrieb wirken, z. B. nur der Gradient des elektrischen bzw. chemischen Potentials.

Feldstrom

$$j_{QF} = \sigma_i E = -\text{grad } (z_i e \varphi)$$

Diffusionsstrom

$$j_{QDi} = \frac{z_i \cdot \sigma_i}{e} \text{grad } \mu_i$$

3.4 *Gesamtladungsstrom*

Eine korrekte Beschreibung liefert aber die Beschreibung mit dem Gradient des elektrochemischen Potentials bzw. der Quasifermienergien.

$$\Rightarrow j_Q = -\frac{\sigma_e}{e} \text{grad } \varepsilon_{F,e} + \frac{\sigma_h}{e} \text{grad } \varepsilon_{F,h}$$

3.5 *Separation von Elektron-Lochpaaren*

$$U = \frac{1}{e} \int_{\text{links}}^{\text{rechts}} \text{grad } \varepsilon_{F,e} \cdot dx$$

Die Voraussetzung für die Ladungstrennung ist der Gradient der Quasi-Fermienergien. Dazu ist kein planarer p-n Übergang notwendig, wie das Beispiel der Farbstoffsensibilisierten Solarzelle (Grätzel-Zelle) zeigt.

Ideale Solarzellenstruktur: n-Membran, p-Membran

Elektronen und Löcher sollten möglichst verlustfrei aus dem Absorber transportiert werden. Bei kleinen Beweglichkeiten können die Membranen auch quasi vermischt sein.

Beim Si ist der p-Membran gleichzeitig der Absorber. Die n-Schicht, oft auch Emitter genannt, ist vergleichsweise dünn.

$$\text{Si: } d_p \approx 300 \mu\text{m}, d_n \approx 1 \mu\text{m}; N_A \approx 10^{16} / \text{cm}^3, N_D \approx 10^{19} / \text{cm}^3$$

4 p-n Übergang

Elektrochemisches Gleichgewicht: im Dunkeln $\rightarrow$ kein Strom $\eta_e^p = \eta_e^n$ $j_Q = 0$

aus $j_Q = 0$ folgt $\eta_e = \text{const.} \Rightarrow$ elektrochemisches Potential hat überall denselben Wert!

$$\varphi^n - \varphi^p = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_e^n}{n_e^p} \quad (\text{bei Si } \varphi^n - \varphi^p = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2})$$

p-n-Übergang mit angelegter Spannung:

- Minus-Pol an n-Seite $\rightarrow$ Durchlassrichtung (Rekombination in der Grenzschicht)
 - Plus-Pol an n-Seite $\rightarrow$ Sperrrichtung (Generation in Grenzschicht)
- $\rightarrow$ Minoritätsladungsträger jeweils bis zur „Diffusionslänge L_e “

4.1 Potentialverlauf, Schottky-Näherung

Die elektrischen Ladungen bestimmen den Feldverlauf. Den Zusammenhang regelt die

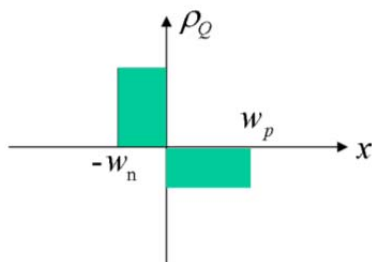
Poissongleichung: (1-dim) $\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{\rho_Q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}$

Schottky-Näherung:

Im p/n-Übergang komplizierte Raumladungsdichte, die zu einer nur numerisch lösbaren Gleichung führt. Deshalb Näherung für konstante Ladung innerhalb der Raumladungsweite mit $Q_n + Q_p = 0$.

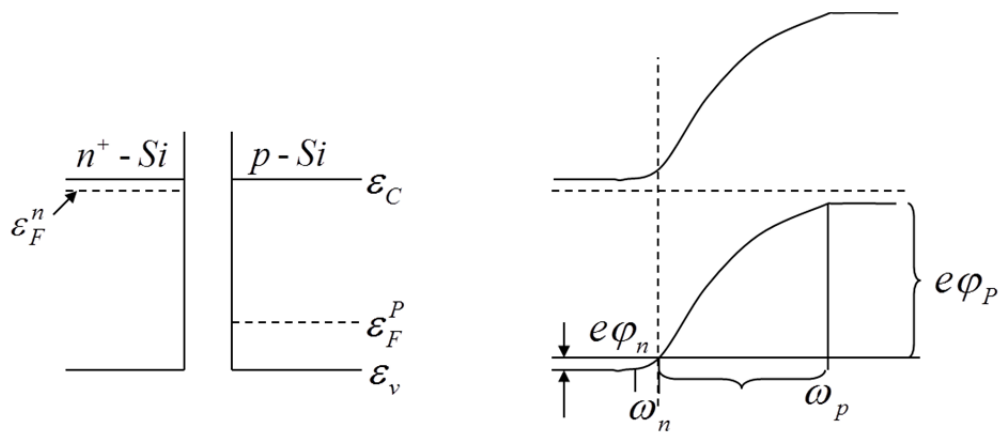
$$\rho_Q^n = eN_D, \quad \rho_Q^p = -eN_A \Rightarrow w_p = \frac{N_D}{N_A} \cdot w_n$$

$$-w_n < x \leq 0, \quad 0 \leq x < w_p$$



Raumladungen bei der Schottky-Näherung

Einfache Integration ergibt den Potenzialverlauf: $\varphi_n(x) \sim (x + w_n)^2$



getrennter p/n-Übergang

Unsymmetrischer p/n-Übergang bei Si:

$$N_D = 10^{19}/\text{cm}^3, N_A = 10^{16}/\text{cm}^3$$

Anpassung der Potentialdifferenz an die zu erwartende Photospannung:

$$e(\varphi^n - \varphi^p) \geq \varepsilon_{F,e} - \varepsilon_{F,h}, (\varphi^n - \varphi^p) \sim \ln \frac{(N_D \cdot N_A)}{n_i^2}, \varepsilon_{F,e} - \varepsilon_{F,h} \sim \ln \frac{n_e^p \cdot n_h^n}{n_i^2}$$

4.2 Stromspannungskennlinie

Durchlassrichtung (Rekombination)

Sperrrichtung (Generation)

Die I/U-Kennlinie folgt aus der Kontinuitätsgleichung im stationären Zustand:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n_h}{\partial t} &= G_h - R_h - \text{div } j_h = 0 \\ j_Q &= -e \int_{-L_h}^{L_e} \text{div } j_h dx \end{aligned} \right\} \quad 300 \text{ K, im Dunkeln}$$

$$j_Q = e \cdot G_h^0 (L_e + L_h) \left[e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right] - e \int_{-L_h}^{L_e} \Delta G_h dx$$

$$j_{sp} = e \cdot G_h^0 (L_e + L_h), \quad j_{sc} = e \int_{-L_h}^{L_e} \Delta G_h dx = -e j_{\gamma, \text{absorbiert}}$$

J_{sp} :

- o Summe aller Rekombinationsströme
- o Ist minimal bei nur strahlender Rekombination
- o Minimieren erfordert maximieren von N_A , N_D , L_n , L_p

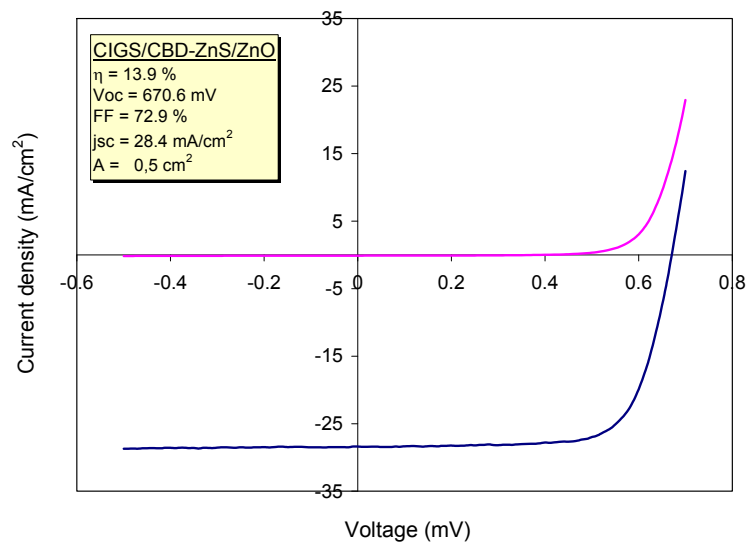
J_{sc} :

- o Additiv
- o Strom im Kurzschlussfall
- o Im Idealfall identisch mit absorbiertem Photostrom

bei Si $N_A \gg N_D \Rightarrow j_{sp} = e \cdot n_i^2 \left(\frac{D_h}{N_D L_h} \right)$

$$j_Q = j_{sp} \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) + j_{sc} \qquad U_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 - \frac{j_{sc}}{j_{sp}} \right)$$

Beispiel: Reale Kennlinie einer Solarzelle

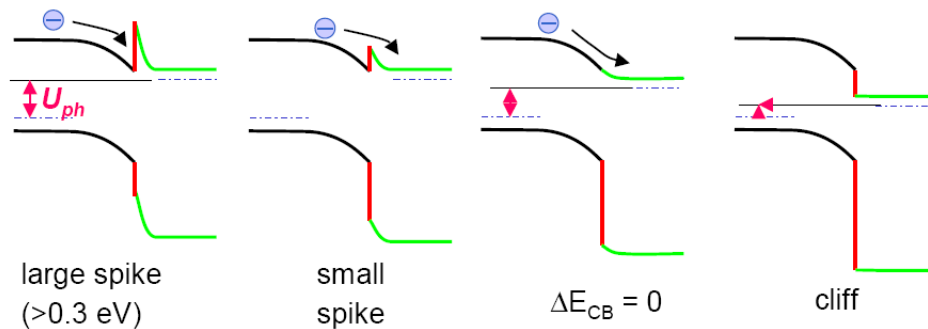


4.3 Halbleiterheterostruktur

p/n-Übergang zweier verschiedener Halbleiter:

Es entstehen Diskontinuitäten am Valenz- bzw. Leitungsband. Bei Ladungen an den Grenzflächen können auch Interface-Dipole entstehen.

Für Halbleiterheterokontakte gilt:



Großer „Spike“: Elektronentransport wird geblockt

Kleiner „Spike“: thermisch aktivierter Transport über Barriere (funktioniert)

„cliff“: Verlust von Diffusionspotential $\varphi^n - \varphi^p$ führt zu geringerer V_{OC}

Auch Tunnelprozesse können eine Rolle spielen.

Andersonmodell am Beispiel von CIS/CdS

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_C &= \chi_{CIS} - \chi_{CdS} \\ \Delta \varepsilon_V &= \varepsilon_V^{CdS} - \varepsilon_V^{CIS} \end{aligned} \right\} \Delta \varepsilon_C^{CdS} + \Delta \varepsilon_V^{CIS} = \Delta \varepsilon_g$$

Zusammenfassung der Grundgleichungen der Halbleiterbauteile-Physik

1. Poisson-Gleichung (Ladungen sind Quellen des elektrischen Feldes)

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{\rho_Q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \quad \text{zweimalige Integration und Randbedingungen liefern Feld}$$

$$\text{Schottky Näherung} \rightarrow \varphi_n(x) \sim (x + w_n)^2$$

2. Stromgleichungen

Elektronen- und Löcherströme überlagern sich, mit jeweils Beiträgen von Diffusion und Driftstrom (Differenz des elektrochemischen Potentials)

$$J = q \mu_{e,h} n E + q D_{e,h} \frac{dn_{e,h}}{dx}$$

3. Kontinuitätsgleichung: Der Teilchenstrom am Ort x ist die Differenz zwischen Erzeugungs- und Vernichtungsrate

$$\text{div } j_h = G_h - R_h \quad \rightarrow \quad j_Q = j_{sp} \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) + j_{sc}$$

Ersatzschaltbild

5.3 **Die reale Solarzelle**

Für $j = 0$ erhält man für die Leerlaufspannung eine Gleichung, die nur von R_p abhängt (R_S verschwindet).

Hohe Werte von R_S und kleine Werte R_S verringern den Kurzschlussstrom. (FF ebenso)

Bei kleinen Strömen ($j = 0$) kann man den Serienwiderstand bestimmen und bei kleinen Spannungen ($U = 0$) den Parallelwiderstand.

Unterschiedliche Rekombinationsmechanismen werden im 2-Diodenmodell berücksichtigt.

Bei Si wird in der Regel das 2-Diodenmodell verwendet.

Ursache und Wirkungszusammenhang bei Si Zellen:

Aus halblogarithmischer Auftragung der I/V-Kennlinie erkennt man bei Si zwei lineare Bereiche, die auf unterschiedliche Rekombinationsmechanismen und zwei Dioden zurückgeführt werden.

R_S wird groß:

- hochohmsche Frontseitenmetallisierung
- hohen lateralen Emitterwiderstand
- hohen Basiswiderstand
- hochohmschen Rückseitenkontakt

R_p wird klein:

- Typische Kurzschlüsse in der Zelle (shunts)

Sperrsättigungsströme werden groß:

- Hohe Frontkontaktoberflächenrekombination
- Kleine Emitter Volumenlebensdauer
- Kleine Basis Volumenlebensdauer
- Haftstellen in der Raumladungsszone ($\rightarrow I_{02}$)

5.4 Temperaturabhängigkeit

j_{sc} schwach abhängig

U_{OC} linear

Intensität des einfallenden Lichtes:

j_{sc} linear

$U_{OC} \sim \ln P_{Licht}$

5.5 Der optimale Bandabstand

für AM0, AM1.5

$$j = j_{Gen.} - j_{Rek.}$$

$\varepsilon_g \rightarrow 0$ j_{sc} groß, U_{OC} klein

$\Rightarrow$ Si $\varepsilon_g = 1,1\text{eV} \Rightarrow 33\%$

$\varepsilon_g \rightarrow \infty$ U_{OC} groß, j_{sc} klein

Si: $\eta_{max} = 33\%$

5.6 Verlustanalyse

Zusammenfassung:

Optische, elektrische, elektronische Verluste

Niederenergetische Photonen:	19%	}	(ungefähre Werte bei Silizium)
Thermalisierung:	29%		
Diode:	19%		
FF:	5%		
Optik:	7%		
Sammlung:	5%		

5.7 *Auswahlkriterien für Solarzellen*

1. physikalisch (optisch, elektrisch, elektronisch, wissenschaftliches Materialverständnis)
2. technologisch (Machbarkeit, Kostenfaktoren (Material, Investitionen, Personal, Sonstiges, Reifegrad))
3. ganzheitliche Ökobilanz

Welche Materialien sind in den Modulen enthalten? Bewertung des Umwelteinflusses nach folgenden Parametern:

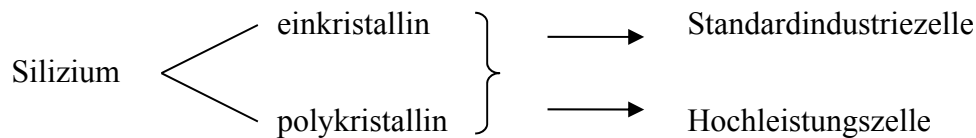
- ☐ eingesetzter Primärenergie (im Verhältnis zur elektrischen Energiestrom innerhalb der Lebensdauer)
 - ☐ Treibhauseffektpotenzial
 - ☐ photochemische Oxydation
 - ☐ Versauerung, Überdüngung
 - ☐ Ozonverarmung
 - ☐ Giftwirkung
4. „cross fertilization“ Welche Maschinen und Prozesse können aus anderen Technologiezweigen adaptiert werden (Elektronikindustrie, Glasbeschichtung, LED etc.?)

Die Energierücklaufzeit bei der PV ist stark technologie- und einstrahlungsabhängig und beträgt ca. 0,5-4 Jahre.

6 Realisierungskonzepte

Materialien:

1.



2. Dünnschicht-PV:

- CIS
- CdTe
- a-Si - μ c-Si
- c-Si

3. III-V: Weltraum, Konzentratorzellen

4. Farbstoffzelle

5. Organische Zellen

6.1 Si-Solarmodul Herstellungssequenz

Reinstoff → Wafer → Zelle → Modul → System

Wertschöpfung Modul: 60 % Wafer, Analogie zur Si Wafertechnik

Die Si-Industrie ist aus der Mikroelektronik entstanden. Zum einen hat sich die Wafergröße vergrößert (300 mm Wafer) zum anderen wurde die Strukturbreite immer kleiner. Die Werdichte hat extrem zugenommen und liegt bei ca. 10 t€/kg. Da die PV von den kleinen Strukturen nicht profitieren kann, hat sich in den letzten Jahren speziell für die PV eine eigene Technologie entwickelt. Jedoch sind die Grundprozesse die gleichen: Beschichtung, Strukturierung, Dotierung und Wärmebehandlung. Wichtige Verfahren hierbei sind: alle Arten von Depositionstechniken (CVD, PECVD, auch epitaktisch), trockene und nasse Reinigungsschritte (auch Ätzprozesse, deren Rate von der Kristallorientierung abhängt), Oxidation von Si, Mas-

kierungsschritte und Diffusionsschritte. Der Kostenanteil des Si-Wafers (beinhaltet Rohsiliziumherstellung) beträgt zwischen 40 % - 70 %.

Um Si als Reinstoff herzustellen werden jedoch identische Verfahren angewandt.

6.1.1 Herstellung von reinem Silizium

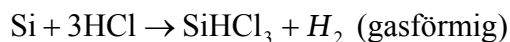
Wafer:

1. Reinigung von Quarz (Quarkies wegen geringerem Schüttvolumen) zum metallurgischen Si: $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ (flüssig)

(Reduktion von SiO_2) $\rightarrow$ „metallurgical grade“ Si (mg-Si)

Über den Sauerstoff im Ofen entsteht auch SiO_2 (feinste Perlen, Microsilica). Einsatz als temperaturbeständiger Füllstoff, Anwendung z. B. in keramischen und feuerfesten Erzeugnissen, in Wärmedämmstoffen und in Mörteln.

2. Elementspezifische Chlorierung (Destillation)



3. Reduktion in H_2



- Siemensreaktor $\rightarrow$ in CVD-Prozess wächst Si auf Stäben, die anschließend „geerntet“ werden (Silan kann hier schon für Dünnschichttechnik abgezweigt werden.)
- Verunreinigungen $\Leftrightarrow \eta$ – Verlust (schon 10^{16} Fe atom /cm³ lassen auf 60 % sinken)
- Verunreinigungsgrad (mg-Si 10000 ppm, sg-Si 0,01 ppm, eg-Si 0,0001 ppm)

Historische Entwicklung und Alternativverfahren zum sogenannten solar-grade (sg) Silizium:

- < 1998: Abfälle aus EG-Si (Seit 1998 kann der weltweite Bedarf der PV-Industrie nicht mehr durch Abfälle der Elektronikindustrie gedeckt werden.)
- 2003: 7.000 t Si, 2005: ca. 10.000 t für PV $\rightarrow$ 2004/2005 wird mehr Si im PV-Markt verarbeitet als in der Elektronikindustrie

- 2005 bis 2007: Verknappung von Silizium durch Wachstum des PV-Marktes
- Silizium für die PV-Modulproduktion (Siliziumknappheit führt zu Verdoppelung des Siliziumpreises von 24 US\$/kg (2003) auf 50 US\$/kg (2006))
- Spotmarkt Oktober 2008 400 \$/kg, Durchschnittswert April 2010 55 \$/kg
- 2011ff: sehr viele neue Unternehmen, hauptsächlich in Asien → starke Überkapazität, starker Preisverfall

Herstellungsbeispiele für Solarsilizium:

- Wirbelschichtverfahren von Wacker (CVD auf Si Granulat), kontinuierlicher Prozess

6.1.2 Kristallzuchtverfahren für Si

Wie macht man aus hochreinen Si-Scheiben mit ausreichender kristalliner Qualität?

Einkristallines Si:

Czochalski (CZ): Stab mit Si-Keim → Schmelze in Quarz-Behälter (Drehen und Emporziehen)

Floatzone (FZ): Si-Stab mit Si-Keim → ringförmige Induktionsheizung

Polykristallines Si:

Gieß- und Kristallisationsverfahren (Bridgman, Heat-Exchange)

Quasi-Mono Silizium: Abkühlen über Saatkristall

Kostengünstiger Kompromiss?

6.1.3 Herstellung von Si-Scheiben

Blöcke sägen: Kreissägen, Innenlochsägen, Drahtsägen

Drahtsägen: Verluste ca. 50 %, Verunreinigungen müssen mit Ätzverfahren wieder beseitigt werden!

Produktionsschritte bei der Scheibenherstellung:

- Säulen schneiden → aufkleben, sägen mit Draht, magazinieren
reinigen, Endkontrolle, verpacken
- Gesamtverluste 68 %
Einsparpotentiale sind vorhanden, aber begrenzt, z. B. Scheibendicke 330 μm
→ 100 μm
100 μm → 73 %!

6.1.4 Herstellung von Si-Bändern

Der Si-Kristall wird als Band hergestellt. Damit kann auf das verlustbehaftete Sägen verzichtet werden. Die Scheiben sind relativ dick und die Dicke variiert in einem relativ großen Bereich. Dabei werden Si-Bänder meist aus der Schmelze gezogen. Es kommen aber auch Sinterverfahren zum Einsatz. Die Kristallqualität (Kristallbaufehler, Maßhaltigkeit etc.) ist zwar geringer, trotzdem aber in einer angepassten Zelltechnologie beherrschbar.

1. Edge-defined Film-Fed Growth (EFG), vertikal gezogen (kommerziell bei Schott Solar)
Oktagons, die aus der Schmelze gezogen werden.
2. String Ribbon: Si-Erstarrung zwischen 2 Drähten, vertikal (kommerziell bei Sovello (EverQ))
Si-Meniskus zwischen zwei Drähten, die in Schmelze getaucht werden.
3. Ribbon Growth on Substrate (Ziehrahmen), horizontal
Schmelze im Gießrahmen erstarrt auf temporärem Substrat

Aufgrund der besseren Si-Materialeffizienz haben die „Siliziumbänder“ eine wesentlich bessere Energiebilanz aber deutlich schlechtere Wirkungsgrade als gesägte Wafer.

Die „Feinstrukturierung“ der metallischen Kontakte ist eine große Herausforderung. Zur Optimierung aller Eigenschaften gleichzeitig gibt es sehr unterschiedliche Konzepte.

Bei den derzeit fallenden Preisen für Si-Wafer ist es fraglich, ob diese Alternativverfahren bezüglich der Gesamtkostenstruktur konkurrenzfähig bleiben bzw. werden (- Skalierung,

schlechtere Wirkungsgrade und Ausbeute, angepasste Zellprozesse nötig, Waferflächenvergrößerung schwierig; + niedrigere Kosten, weniger Si Verluste, ...)

6.1.5 Neue Verfahren und experimentelle Grenzen

Si lässt sich praktisch perfekt als gesägte Scheibe herstellen. Perfekt im Sinne von einkristallin und praktisch kaum relevante Verunreinigungen und sauberen Oberflächen. Damit lassen sich die höchsten Wirkungsgrade erzielen. Ob da aber auch das Optimum bez. €/Wp liegt ist offen. Parallel zum einkristallinen Wafer gibt es die polykristallinen Scheiben, die zwar Korngrenzen haben, aber keine Einkristallzucht nötig ist. Dabei verliert man ca. 5 % Wirkungsgrad (Absolutprozent). Die Korngrößen sind im cm-Bereich. Verwendet man jedoch Dünnschicht- oder Dickschichttechniken, so kann man zwar dünnes Silizium (im Bereich einiger μm) herstellen, jedoch verliert man im Wirkungsgrad mehr als den Faktor zwei (siehe Kapitel Si-Dünnschichttechnik) aufgrund der geringen Korngröße (eine 10 nm).

6.2 Industrielle Fertigung von Si-Siebdruck-Solarzellen

- Anwendung der Prozesse aus der Mikroelektronik (ca. 55 Jahre Entwicklung)
- Die einfache Si-Zelle → Siebdruckzelle (Kostengründe)

Siebdruck Solarzelle

1. Wafer: rund oder eckig
2. Ätzen: Entfernen von Sägerückständen und –schaden ($-20\ \mu\text{m}$)
3. P-Diff. im Rohrofen ($900\ ^\circ\text{C} / \text{P}_2\text{O}_5$)
4. Plasma-Ätzen der Kanten
5. Entfernen Phosphorglas
6. Oberflächenpassivierung ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$)
7. Rückkontakt:
 - Pastenauftrag
 - Trocknung

- Sintern (400 °C)
8. Frontkontakt:
- Pastenauftrag
 - Trocknung
 - Sintern (400 °C)
9. Kontaktieren, Messen, Sortieren

Equipment:

- Diffusionsöfen mit hoher Produktivität (Deposition der Dotierung, „Eindiffusion“), anschließende Reinigung der Kanten mit Plasma oder chemisch (HF hoch selektive Ätzung zwischen SiO₂ und Si)
- automatisierte Nassbänke für Ätzprozesse (Oberflächenstrukturierung, Reinigung)
- Auftrag von Antireflex- und Passivierungsschichten SiN_x mit PECVD-Verfahren (Silan SiH₄ und Ammoniak NH₃)
- Pastenauftrag in Siebdruckmaschine, anschließende Feuerung in Ofen → wichtig: Design der „Gridfinger“
- Nassbank für Kantenisolation

Nur ein Hochtemperaturschritt; aber eingeschränkte optische/elektronische Qualität, Strukturbreiten >100 µm

Strom I_{sc} ist proportional der Fläche → bei 156 x 156 mm² ca. 8,5 A!

⇒ KOH-Ätzen zur Oberflächenstrukturierung, BSF, Punktkontakte, „dünne Silberfinger“

Energieverbrauch im Si-Modul: Si-Reinigung + Kristallisierung >50 %

6.3 Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen

6.3.1 Rolle des Wirkungsgrades

→ Im Wesentlichen flächenproportionale Kosten

→ Verhältnis BOS zu Modul-Kosten 50:50. (vor 10 Jahren Module 2/3)

→ Verdoppelung des Wirkungsgrades von 10 % auf 20 % erlaubt fünffach teurere Module

Verluste: 1. Optisch

2. Elektrisch (ohmsch, rekombinatorisch)

6.3.2 Minimierung rekombinatorischer Verluste

- große Diffusionslänge

- Rückkontaktdiffusion

→ Oberflächenzustände, Grenzfläche zum Metall

- Frontkontaktdiffusion

→ Sofern die Diffusionslänge die doppelte Basisdicke übersteigt, wird der Kurzschlussstrom durch Oberflächenrekombination bestimmt.

Lösungen: Reduktion der Kontaktfläche, Passivierung der Oberfläche, Passivierung des Emitters (auch mehrstufig), lokales Back-Surface-Field p+

Siehe auch z. B. HIT-Zelle (gute Passivierung von c-Si durch a-Si)

6.3.3 Optische Optimierung

→ Geometrische „effektive Lichtlängenverlängerung“, Reflexminderung durch Brechungsindexsprung → Antireflexschichten

→ Ätzverfahren

Herstellung Hochleistungs-Si-Zelle:

1. Invertierte Pyramiden

-Maskierung Photolithographie Ätzen mit KOH

2. Frontkontakt:

RCA Maskierung Photolithographie Diffusion (900 °C)

Dazwischen immer Reinigung.

3. Emitter

Wie 2., 850 °C!

4. Rückkontakte, Punktkontakte, Photolithographieprozesse

5. Rückkontakte Metallisierung, inkl. Sintern

6. Frontkontakte Metallisierung, Photolithographieprozesse

5 Hochtemperaturschritte: 3x Oxide, 2x Diffusion

6.3.4 Minimierung ohmscher Verluste

Betrachtung der 6 Einzelwiderstände:

1. Metall-Halbleiter-Kontakt Rückseite
2. Widerstand der Basis
3. Lateralwiderstand Emitter
4. Metall-HI Kontakt am Gitterfinger
5. Widerstand Gitterfinger
6. Widerstand Sammelbus

→ Ladungstransport am Metall-Halbleiter-Kontakt

→ Kontaktwiderstand (vernachlässigbar)

Kontaktfinger/Sammelbus: Kompromiss zwischen Abschattung und ohmschen Verlusten.

6.3.5 Rückseitenkontaktzellen

Mehrere Möglichkeiten: p und n nach hinten, Löcher und nur den Emitter durchführen, oder Löcher und Metalle nach hinten führen

In jedem Fall: Beide Kontakte auf Rückseite, erhöhter Strukturierungsaufwand

1. Passivated emitter with rear locally diffused (PERL)

Local back surface field (LBSF), Rückseitenpassivierung, Punktkontakte, zweistufige Emitter, invertierte Pyramiden, feinstrukturierte Kontakte: Photolithographie

→ Weltrekordzelle im Labor (25 %)

2. Passivated emitter and Rear Cell (PERC)

Sehr gute Oberflächenpassivierung (Rückseitenpassivierung setzt sich durch), Punktkontakte auf Rückseite, zweistufiger Emitter, invertierte Pyramiden

→ die Industriezelle der nahen Zukunft

3. Rückkontaktzelle (Sun power, n und p hinten)

n-Typ Wafer, bis 24,7 % aus Industrieentwicklung, beste Industriezelle, rel. teuer

4. Metal wrap through (Loch mit Metall gefüllt, Kontakt nach hinten)

5. Emitter wrap through (Loch mit Emitterdiffusion → Kontakt nach hinten)

6. Heterokontaktzelle (HIT) (a-Si Schichtpaket auf c-Si Wafer, (als Emitter und Passivierung)), sehr hohe Wirkungsgrade (neuer Weltrekord für c-Si 25,6 %)

7. Selektiver Emitter (mehrstufiger Emitter unter Kontaktbahnen, z. B. mit Laser eindiffundiert (ohne Maskierung))

8. Sonstige Konzepte:

- Laser grooved buried contact cell (Saturn, vergrabene Kontakte, hat sich nicht durchgesetzt)
- Verwendung von n-dotiertem Basismaterial, CZ n-Material hat höhere Defekttoleranz

Aktuelle Bestwerte:

Die Si-Solarindustrie versucht derzeit die besten Laborkonzepte in die industrielle Produktion zu transferieren. Dabei kommen Kombinationen von Konzepten zum Einsatz. Auffallend ist, dass für Strukturierungen neue Verfahren (z. B. Laserprozesse) zum Einsatz kommen.

Poly-c-Si Champion:

Beste Zelle 21,25 %, Kombination aus Selective Emitter/PERC

Mono-Si Champion:

Beste Zelle: 25,6 %, HIT kombiniert mit Rückkontaktzellkonzept

6.4 Von der Zelle (Wafer) zum Modul, Modultechnik

1. Modulaufbau

Verschiedene Laminatkonfigurationen: Frontseite, Rückseite

unterschiedliche Anforderungen Glas/Folie/Metall

2. Spezielle Applikationen

→ Eigenschaftsanforderungen an Modul, sehr unterschiedliche Anforderungen (Konsument, Feldanlage, Gebäudeintegration)

Modul:



Schaltzeichen:

Solarzelle, Solarzellenstrang, PV-Modul, PV-Modulstrang, PV-Teilgenerator, PV-Generator

3. Produktionsablauf

- a. Zelltest/Sortierung
- b. Reinigung
- c. Folienschnitt
- d. Positionierung der Zellen, Verlötung des Strings
- e. Auflegung des Strings, Verlötung des Strings
- f. Inspektion (Dunkelstrom), Auflegen Rückseitenfolie(n)
- g. Lamination, Kantensäuberung
- h. Anschlussdose, Bypass-Diode, Kabel, Zugentlastung , Rahmen
- i. Endkontrolle, Säuberung

Ein wichtiger Schritt hierbei ist die Verbindungstechnik. Bei Standardwafern („+“ - Kontakt hinten, „-“ - Kontakt vorne) werden die Wafer mit Bändchen verlötet. So entsteht eine serielle Verschaltung zu sogenannten „strings“.



Verschaltete Zellen (String)

Verkapseln und Klebefolie:

EVA: Standard und Spezialmodule

PVB: Glasdächer und Fassaden

Gießharz: hauptsächlich Gebäudeintegration

Der EVA-Prozess: Auflegen der Folien, Evakuierung, Beaufschlagung mit Druck und Temperatur (ca. 150 °C) führt zur Vernetzung des Materials.

Zell/Modulwirkungsgrad:

Der Modulwirkungsgrad ist ca. 2 % absolut geringer als der Zellwirkungsgrad. Bei Si Wafermodulen ergeben sich folgende Verluste bzw. Gewinne:

Verluste:

Fläche (Rand, Zellabstand), Optik: optische Kopplung, Absorption im Glas und Folie
Elektrisch: Widerstände (kann vermieden werden)

Gewinne: optische Kopplung (Brechungsindex Matching)

Neueste Entwicklungen zur Vermeidung von „Ohm’schen Verlusten“ sind z. B. Halbzellenverschaltung oder „Multi-Wire“ – Techniken.

Komponenten:

Alle Komponenten im PV-Modul müssen den sehr harten Belastungen im Betrieb (>20 Jahre) erfüllen:

UV-Beständigkeit, Dichtigkeit (Sauerstoff, Wasserdampf), chem. Verträglichkeit, Lichtdurchlässigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Spannungsfestigkeit....

Insbesondere bei der Auswahl von folgenden Komponenten ist das zu beachten:

Verbindungstechnik, Frontglas (Folie), Kontaktbändchen, Rahmung, Anschlussdose (Bypassdiode), Kabel und Stecker

Mit Si-Rückkontaktzellen kann die Verbindungstechnik deutlich vereinfacht werden (rückseitige Verbindungstechnik).

6.5 *Standardisierte Testverfahren*

Solarmodule werden mit genormten Prüfverfahren getestet. Mit sogenannten beschleunigten Alterungstests werden die Praxisbeanspruchungen simuliert:

IEC 61215: c-Si, IEC 61646 für Dünnschichtmodule, Ergänzungen der Norm: z. B. erweiterte Tests der Bypassdioden, Vorbehandlung, IEC 61730 PV Sicherheitsqualifikation, IEC 62108 Konzentrator PV

Labortest ↔ Freiluftbewitterung

Simulation der Modulalterung im Labor: Strahlungs-, thermische, mechanische, chemische Beanspruchung → Beschleunigte Alterungsverfahren

Häufig auftretende Fehler im Feld: Delamination, Tierbiss, Trübung (Browning), Kontaktbruch, Glasbruch, Blitzschaden, Stecker, Frostschäden, PID, Diodenfehler....

Fehler können zu sicherheitsrelevanten Fehlern, zum Totalausfall oder zur „schleichenden“ Degradation führen.

Problemstellung: Die exakte Bestimmung der Nennleistung mit STC (Spektrum, Fläche, Vorbehandlung) ist vor allem bei Dünnschichtmodulen noch eine Herausforderung.

Testbaum:

- | | |
|---|----------------------|
| • Sichtprüfung | • Temperatur-Wechsel |
| • Leistung bei Standard-Testbedingungen (STC) | • Luftfeuchte, Frost |
| • Isolationsfestigkeit | • Feuchte, Wärme |
| • Temperaturkoeffizient | • Hitzebehandlung |

- NOCT
(normal operating conditions)
- Leistung bei NOCT
- Leistung bei 200 W/m² Einstr.
- Dauertest im Freiland
- Hot-Spot Dauertest
- UV
- Lichtalterung
- Festigkeit der Anschlüsse
- Verwindungstest
- mechanische Belastbarkeit
- Hageltest
- Kriechstromprüfung bei Benäsung

Schutzklassen:

- Klasse A: zugänglich ⇒ Schutzklasse II
- Klasse B: beschränkt zugänglich ⇒ Schutzklasse 0
- Klasse C: limitierte V, P_{mpp} ⇒ Schutzklasse III

Fehlerhäufigkeit bei Prüfungen (IEC-Test):

1. Feuchte/Wärme (häufig bei Dünnschichtmodulen)
2. Temperatur Zyklen (häufig bei Si-Wafer-Modulen)

Im Feld ⇒ Browning

Beispiel: 20 Jahre Felderfahrung ⇒ ca. 1 % Leistungsverlust/Jahr

6.6 Dünnschichtsolarzellen

→ Materialien mit hoher Absorption (wenn Wege kurz, geringe Materialqualität oft ausreichend)

→ Materialien mit geringer Absorption $\Rightarrow$ aufwendige Lichtlenkung bzw. Einkopplung

Substrat – Superstrat Aufbau, unterschiedliche Anforderungen an Träger (= Substrat) und Verkapselung bez. Temperaturstabilität und optischer Transmission bzw. Stabilität

Fertigungskostenreduktion erst bei großen Produktionseinheiten

Vergleich: Dünnschichttechnik (wenige μm) – Dickschichttechnik (ca. 10-50 μm) – Kristallzucht (Volumenmaterial $>100 \mu\text{m}$)

dünnes Si ((fein)kristallin)	}	Wenige μm auf m^2 -Substraten
a-Si		
CIS		
CdTe		

- Vorteile für Produkt und Produktion
 - o Spezielle Verschaltung
 - o hohe Fertigungstiefe
 - o Geringe Energierückzahlzeit
 - o Wirkungsgrade der Zellen bei 20 %
 - o Module in Produktion bis ca. 13 % (einzelne 15 %)

Extremes Wachstum in 2006/2007/2008 durch Investitionen (allein 20 Firmen in Deutschland), Anteil an Gesamtproduktionsvolumen 2008 ca. 14 %, 2009 ca. 20 %, 2010 ca. 13-15 %, absolut betrachtet wächst die Dünnschichtphotovoltaik. Der Anteil am Gesamtmarkt ist eher stagnierend durch die extrem stark steigenden Anteile der Si-Photovoltaik, aufgrund stark sinkender Kosten der Si-wafer-Technik (Skalierung, „China-Effekt“, sinkende Preise für Wafer). In den Jahren 2011-2015 befindet sich die ganze Branche aufgrund Überkapazitäten in einem Preiskampf, der vor allem innovative, kleine Unternehmen besonders hart trifft. Insbesondere Konzepte mit Wirkungsgraden $< 12 \%$ verschwinden zunehmend vom Energiemarkt und gehen in die Produkt- und Gebäudeintegration.

- Module mit bis zu 300 W_p bzw. Wirkungsgraden von 5 % - 15 % auf dem Markt
- Wirkungsgrad $\eta_{CIS} > \eta_{CdTe} > \eta_{a-Si/\mu cSi} > \eta_{a-Si}$
- Prognose: CIS wird von vielen als „Zukunftsmaterial“ angesehen, da hohe Wirkungsgrade in Dünnschichttechnik möglich.
- Kostenführerschaft: First Solar/CdTe

Generell können Dünnschichtprodukte große Kostenreduktionen bewirken. Beispiele der „Großflächenbeschichtung“ sind Architekturgläser und Displays. Dabei ist zu beachten, dass die physikalischen Eigenschaften dünner Schichten stark von den Präparationsbedingungen abhängen können. Oft haben die dünnen Schichten andere Eigenschaften als die Volumenmaterialien.

Im Folgenden werden die Dünnschichttechniken krist. c-Si-DS, a-Si, CIS, CdTe diskutiert im Hinblick auf:

- o Physikalisches Prinzip
- o Dünnschichttechnologien
- o Verschiedene Varianten kommerzieller Produkte
- o Anlagen- bzw. Generatorbeispiele, Produktbeispiele und Integrationen

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

Wichtige Kriterien:

1. Substrat (Hochtemperatur $\leftrightarrow$ Niedertemperatur)
2. Abscheiderate und Qualität

oder „ohne Substrat“ $\Rightarrow$ Ablösetechnik

Kriterien für Substrat:

- Thermische Ausdehnung
- Thermische Beständigkeit
- Chemische Beständigkeit

- Oberfläche
- Kosten

Wichtige Verfahren bei Si zur Kristallbildung:

- Epitaxie („Saatschichtkonzept“)
- Rekristallisierung

Optische Strukturierung: wichtig, da kristallines Si indirekter Halbleiter ist und somit eine relativ geringe Absorption hat (im Gegensatz zu amorphem Si!)

Technologische Pfade zur Herstellung von dünnem kristallinem Silizium:

- „proof of concept“; Abätzen → dünne (40 µm) Wafer
- Ablösetechniken vom Wafer
- Keramiksubstrat + Barrierschicht
- Zonenschmelzverfahren
- Saatschichtkonzept (Epitaxie, Al-induzierte Kristallisation,...)

Abscheideverfahren für Si (dünn/kristallin, teilweise auch amorph). Folgende Dünnschicht-techniken sind auch für andere Materialien geeignet. Man unterscheidet grundsätzlich in physikalische Verfahren (z. B. Sputtern oder Verdampfen) und in chemische Verfahren (z. B. CVD = Chemical vapour deposition)

- CVD; Silan etc.; verschiedene Plasmaaktivierungsverfahren, Abscheidung aus der Gasphase

Wichtigstes PECVD (plasmaunterstützt)

- IAD, Verdampfen mit Elektronenstrahlquelle und zusätzlich beschleunigten Ionen
- Sputtern (Kathodenzerstäubung)
- LPE, Flüssigphasenepitaxie

Das CSG (crystallin silicon on glass) Konzept:

→ strukturiertes Glas, PECVD, Festphasenkristallisation, inkjet-Technik zur Strukturierung

6.6.2 a-Si-Solarzellen

- Fehler der Fernordnung $\Rightarrow$ keine klare Bandstruktur, hohe Absorption,
Zustände in Bandmitte $\Rightarrow$ schlechte Transporteigenschaften

- Bereits 1969 erstmalige Präparation, 1974 erste Solarzellen

- Einfache Struktur: Glas/Kontakt/p-i-n/Kontakt

- Passivierung mit H

- Warum p-i-n? Driftsolarzelle

Kleine Beweglichkeit: Sammlung nur im elektrischen Feld

Driftlänge $L = \mu\tau \cdot E$

Lichtinduzierte Alterung (Staebler-Wronski-Effekt)

- Tandem-Triple-Konzept: Wirkprinzip einer Multispektralzelle. Beispiel an a-Si / a-SiGe
spektrale Aufteilung des Spektrums, „Monolithisches Tandem: Serienschaltung bedeutet Addition der Spannung und Strom der Zelle mit kleinerem Strom“, $\rightarrow$ kein Strommismatch, „Tunnelkontakte“
- Veränderung des Bandabstandes durch Zulegierung von Ge oder C
- Herstellung PEVCD (Plasmaunterstützte Abscheidung aus Silan)
- Fabriken mit Gläsern bis zu 5,7 m²
- Monolithische Verschaltung (3 Strukturierungsschritte zur Serienschaltung in Herstellsequenz integriert)
- Rolle-zu-Rolle-Beschichtung
- Auf Stahlband: Verschaltung von Modulfeldern mit Bypassdioden (UniSolar-Konzept)
- a-Si-Module $\sim 7\%$ (üblicherweise als Tandem- oder Triple-Zelle mit Si-Ge)
- a-Si/ μ c-Si-Module $\sim 10\%$ (modernes Tandemkonzept mit geringerer Degradation)
wichtig: Oberflächenstrukturierung

Beispiele für Produktintegration, Gebäudeintegration, semitransparent

- innovatives Konzept: temporäres Substrat

- Anlagenstabilität gut, Schwachlicht gut, kleiner Temperatur-Koeffizient, teilweise erhöhter Schwachlichtwirkungsgrad
- Erste Freifeldanlagen im MW-Bereich in D ab 2004

6.6.3 CdTe-Solarzellen

- CdTe: $E_g = 1,45 \text{ eV}$, hohe Absorption
 - + schnelle, einfache Abscheidung
- Rückkontakt: Metall mit hoher Austrittsarbeit, Aktivierung mit CdCl_2 (Grenzflächenzustände)
- Aufbau: Glas/ITO(TCO)/CdS/CdTe/Metall
- Herstellungsverfahren:
 - o Closed spaced sublimation (im Prinzip Verdampfung)
 - o Vapour transport deposition (Verdampfung mit spezieller Gasführung)
 - o Elektrodeposition
 - o Screen printing
- Beste Zelle 21,5 %; Module ~14 % im Durchschnitt
- Produzenten: First Solar, primestar, Abound Solar, Calyxo, ...
- Monolithische Verschaltung in Produktionsprozess integriert
- Herausforderungen: CdS absorbiert im Blauen, CdTe zu dick (Shuntproblematik), Rückkontakt, „Aktivierung“,
- Anlagen bis in ca. 260 MW-Bereich (!), gute Erträge im Feld, Nachweis seit 1995
- Kostenführerschaft First Solar

6.6.4 Cu(In,Ga)Se₂-Solarzellen

- Oktettregel, Übergang Diamantstruktur → Zinkblendestruktur → Chalkopyritstruktur
- Cu-In-Se; Ga, S Gebräuchlichstes System, aber auch andere Verbindungen möglich, historisch aus der Cu₂S/CdS-Zelle entstanden, in der Natur kommt nur Kupferkies vor (CuFeS₂)
- Defektkomplex $2xV_{Cu} + In_{Cu}$ neutral; große Defekttoleranz
- Phasendiagramm: CIS muss Cu arm sein
- Vorteil: Hohe Absorption → Dünne Schichten
- Standardaufbau: Glas/Mo/CIGS/CdS/i-ZnO/ZnO:Al (gesamt ca. 4 µm Schichtdicke)
- Rekombinationspfade an Grenzflächen im Volumen und in der Raumladungszone, Rolle der CdS-Pufferschicht → Bandanpassung, „Sputterschutz“, n-Partner aber eigentlich Eg zu klein
- Beste Zelle 21,7 %; Großmodule bis ca. 16,5 %
- Verbesserung der Zelleigenschaften durch Na (Eindiffusion aus Glas-Substrat oder zusätzlich eingebracht), Bandgap-Engineering durch Variation Ga-Gehalt (vor allem Verschiebung Leitungsband) und S-Gehalt (vor allem Verschiebung Valenzband). Größere Bandlücken für höheren Gehalt an Ga, S.
- Optimaler Ga-Gehalt: $Ga/(Ga+In)=0.3$, $E_{g,opt} = 1,15$ eV, Minimum der Defektkonzentration
- Entwicklungen für höheren Ga-Gehalt, um höhere Leerlaufspannung zu erhalten, schwierig, höhere Spannung günstiger wegen: ohmschen Verlusten, T-Koeffizient, Eg im Optimum, Chance für „monolithische Tandems“
- Monolithische Verschaltung, Einfluss der Zellbreite: flaches Optimum bis ca. 4 bis 12 mm (→ streifenförmige Zellen)
- CIGS Depositionsmethoden: Verdampfen ↔ Sputtern + Selenisieren
- Prozessentwicklung CIS: Verdampferquellen, Ausbeute auf der Fläche!
- Auch flexible Module, Gebäudeintegration

Kommerzialisierung der CIS-Technologie:

- Beispiel ZSW-Entwicklung:

Thermische Verdampfung der Einzelkomponenten (Cu, In, Ga, Se) im Durchlaufverfahren

- Aufskalierung der Fläche: Homogene Abscheidung mehrkomponentiger Halbleiter auf $m^2 \rightarrow \eta > 16 \%$

- Ausbeute in der Fertigung ist große Herausforderung Ziel: $\rightarrow > 85\%$

Andere Beispiele: Bosch Solar, Solar Frontier, TSMC, Avancis, Solibro (Hanergy)

- Varianten der CIS-Technik

- Bandbeschichtung, Elektrodeposition,

Flexibles Metallsubstrat $\rightarrow$ Global Solar; keine monolithische Verschaltung für mobilen Einsatz, wegen leitfähigen Substrat

6.6.5 Kontaktschichten: Transparent leitfähige Oxyde

- Kontaktierung der Solarzelle auf der Licht zugewandten Seite (Substrat oder Oberfläche)
- Materialien: Hohe Dotierbarkeit + große Bandlücke (kleine Absorption im relevanten Spektralbereich) $\Rightarrow$ oft Oxide. Gängige Materialien: ITO (indium tin oxide), AZO (ZnO:Al)

- Schichtwiderstand klein
 - Transmission groß
- } $\Rightarrow$ Kompromiss in Schichtdicke und Ladungsträgerdichte bei maximaler Beweglichkeit

$\Rightarrow$ Haacke-Faktor beschreibt Güte der TCO-Schicht

- Bei a-Si/ μ c-Si zusätzliche Anforderung Lichtstreuung (Haze-Faktor)
- Freie Ladungsträgerabsorption im (nahen) Infrarot. Freies Elektronengas: Transparenz für Frequenzen $>$ Plasmafrequenz $\omega_p^2 \sim n \rightarrow$ für die niedrige Absorption ist es günstig wenig freie Ladungsträger zu haben – für den Schichtwiderstand ungünstig

- Burstein-Moss-Shift: Verschiebung der optischen Absorptionskante ins Blaue durch Auffüllung der elektronischen Zustände mit zunehmender Dotierung
- Reduktion der Beweglichkeit bei hohen Dotierungen $\Rightarrow$ Streuung an Störstellen

Sonstige Anwendungen für TCO (transparent conducting oxides):

- Flachbildschirme, Touch Panels
- OLEDs
- Elektrochrome Fenster
- Heizen von Gläsern (Entfrostern)
- EMV, antistatische Beschichtung
- Unsichtbare Schaltungen (Sicherheits-Technik)

Herstellungsverfahren:

- Magnetronspütern (Ortsabhängigkeit der Depositionsrate / -güte, spezieller Effekt bei In-Line-Prozess: Sichelförmiges Wachstum durch bewegtes Substrat)
- CVD

6.7 Solarzellen unter konzentriertem Licht (CPV Concentrator PV)

6.7.1 Einleitung

1., 2. 3. Generation PV, Definition über €/W, Ansätze: niedrige Kosten bei niedrigerem Wirkungsgrad, oder hohe Kosten bei hohem Wirkungsgrad

Ausweg bei hohen Kosten: Lichtkonzentration, aber auch Licht-Nachführung

6.7.2 Effekte der Konzentration

- Wirkungsgrad steigt mit dem Logarithmus des Konzentrationsfaktors, Herleitung aus I/U-Kennlinie, Konzentrationsfaktor $c = A' / A$

$$I_{SC} \sim c, U_{OC} \sim \ln c, \eta \sim \ln c$$

Probleme:

- o Ohm'sche Verluste
- o Temperatur
- o Homogenität der Einstrahlung
- o Verschaltung
- o Winkelakzeptanz
- Aufteilung:

Schwache (2-4), mittlere (5-40), hohe Konzentration (>40)
- Theoretische Grenzen für die Konzentration der Sonnenstrahlung: Probleme mit Herleitung aus geometrischer Optik => thermodynamische Betrachtung: Schwarzer Körper im Fokus, darf nicht heißer werden als Sonne, sonst Verletzung 2. Hauptsatz Thermodynamik =>

$$c_{\max_{1,d}} = 215, c_{\max_{2,d}} = 46200$$
- Systemüberlegungen

Ersetze „teure“ PV durch „billige“ Spiegel/Linsen + Nachführung

Konzepte: Fresnellinsen, Parabolspiegel, Kegelkonzentrator, statische Konzentration, Vermeidung der Abschattung durch „prismatic cover“

→ Compound Parabolic Concentrator (nichtabbildende Optik), max. Konzentration

→ Lichtkonzentration mit hoher Winkelakzeptanz ermöglicht statische Konzentratoren

6.7.3 Multispektralzellen (III-V-Solarzellen)

Multispektralzellen oder Stapelsolarzellen:

- Probleme bei einfachen Solarzellen: 1) Niederenergetische Photonen ($E < E_g$) werden nicht absorbiert. Photonen mit sehr hoher Energie ($E \gg E_g$) werden nicht effizient ge-

nutzt (Thermalisierung der Elektronen und Löcher) → Stapelsolarzellen aus Materialien mit verschiedenen Bandlücken hintereinander (Tandem, Dreifach-, ...; für unendlich viele Zellen (theor.): max. thermodyn. Wirkungsgrad), Zelle mit größter Bandlücke zuerst. Tandem: Optimale Kombination ca. 1 eV / 2 eV Bandlücke

=> Effizientere Konversion, da jeweils Absorption nahe Bandkante.

Wirkungsgradpotenzial: E_{g1}/E_{g2} 1,1eV/1,7eV → 44% Wirkungsgrad

- Kombination mit Konzentrator-Technik für höchste Wirkungsgrade
- Typischerweise Verwendung (einkristalliner) III-V-Materialien
- Sowohl monolithisch (2 terminal = 2 Anschlüsse) als auch 4 terminal = 4 Anschlüsse (mechanisch gestapelt)

GaAs-Zellen

GaAs seit 60er Jahren (Raumfahrt), Verbesserung durch verbesserte Epitaxieverfahren (LPE, dann MOCVD und MBE)

GaAs/GaAs/GaInP oder Ge/GaAs/InGaP

GaAs → Substrat (oder Ge)

Wichtig: Gute Gitteranpassung (=> wenig Defekte), geeignete Bandlücken → Verwendung ternärer Legierungshalbleiter (z. B. InGaAs, InGaP)

Wirkungsgradangaben bei Konzentratorzellen immer unter Konzentration (z. B. 300x)

z. B. „Spectrolab“-Stapelzelle, 240x: Wirkungsgrad >40 % (Stand Mai 2014 44,7%)

2/4-Terminal-Konstruktion, Tunnelkontakte zur Verschaltung

6.7.4 Epitaxie

- Beziehung des Wachstums auf die darunterliegende Struktur, (Homoepitaxie bei derselben Struktur, entsprechend Heteroepitaxie bei unterschiedlichen Materialien mit „Gittermisfit“

→ daher besonders geeignet Materialien mit ähnlichen Gitterkonstanten aber angepassten E_g 's für Heteroepitaxie

Produktionsverfahren:

Möglich sind Flüssigphasenepitaxie, metall-organische Gasphasenepitaxie (MOCVD), Molekularstrahlepitaxie, MOCVD hat sich für die Produktion durchgesetzt (s.a. LEG Produktion)

6.7.5 Aktueller Stand der GaAs–Technologie

- Starke Dynamik in der Entwicklung, derzeit absoluter Rekordhalter in der PV mit 46 %!!
- verschiedene Optikkonzepte für die Lichtkonzentration, 1 dim, 2-dim, Einsatz von Fresnel-Linsen
- Anzustreben für CPV Produkte, flaches Design, hohe Winkelakzeptanz
- Kostenvergleich für Stromgestehungskosten, sehr standortabhängig, 2016: CPV nicht konkurrenzfähig, Prognose positiv?

6.8 Organische Photovoltaik und Perowskit-Solarzellen

Wirkungsgrad – Lebensdauer – Kosten → Kompromiss

Konzept: Bei geringen Kosten ist auch ein geringer Wirkungsgrad akzeptabel. Dabei bleibt der Quotient €/Wp klein. Da der Einstieg im Konsumerbereich geplant ist, sind kurzfristig moderate Lebensdauern akzeptabel.

6.8.1 Organische Halbleiter

Zwei Konzepte:

- Konjugierte Polynome (lange Ketten)
- Kleine Moleküle

Herstellungsverfahren:

- Aufschleudern (Spin coaten)
- Rakeln (mit Klinge abziehen)
- Ink Jet drucken
- Eintauchen (dippen)
- Oder im Vakuum verdampfen

Polymer → p-Typ, C_{60} n-Typ

Verwendung organischer Halbleiter

Polyphenylene vinylene (PPV) p-Leiter

Methanofullerene (PCBM)

PEDOT

Überlapp der π -Orbitale → bandähnliche Strukturen

Lowest unoccupied molecular orbital: LUMO

Highest occupied molecular orbital: HOMO

Transport durch "hopping" – thermisch aktiviert

Breite Emission aber schmale Absorption (Nachteil)

Organische Solarzellen

2 Konzepte: 1. Mischaufbau (Verdampfen) oder 2. Schichtaufbau), „Bulk-Heterojunction-Konzept“

Kontakt mit: Al und ITO

Funktionsprinzip:

- Lichtabsorption → gebundenes Elektron-Loch-Paar (Exziton)
- Akzeptor zur Aufspaltung des Exzitons
- geringe Exzitonenbeweglichkeit im Polymer
- Aufspaltung Exziton → e^- auf Fulleren, Löcher folgen Polymersträngen

Banddiagramm der Heterokontaktzelle

Hohes Kostenreduktionspotenzial! Lichtabsorption und Stabilität sind die großen Herausforderungen.

6.8.2 Polymere mit niedrigem Bandabstand

Donor Akzeptor Übergänge

6.8.3 Semitransparente und Tandem-Zellen (OPV)

Verwendung von lichttransparenten Elektroden

Gestapelte Zellen mit Absorbern unterschiedlicher Bandabstände

6.8.4 Die OPV-Industrie

Entwicklung von industriellen Durchlaufverfahren mit kostengünstigen Prozessen über Labor- und Pilotanlagen zur Produktion, erste Konsumerprodukte am Markt

Sowhol nasschemische Abscheidung (Drucktechnik) als auch Aufdampftechnik wird skaliert.

Aufdampftechnik: Heliatek mit 12 % Wirkungsgrad

6.8.5 Farbstoffsolarzellen, Perowskit-Solarzellen

Perowskitsolarzellen sind aus den Farbstoffsolarzellen entstanden:

TCO/nc-TiO₂/Farbstoff/Elektrolyt/Pt:TCO

Transport und Absorption nicht in einem Material

Zellen >14 %; Kleinmodule 5 – 8 %

Funktionsprinzip: Das Licht wird im Farbstoff absorbiert. Es erfolgt ein schneller Elektronenübergang auf das nanoporöse TiO₂, welches auf TCO beschichtetem Glas aufgebracht wurde. Der Löchertransport erfolgt über den „Sensetizer“ zum Elektrolyt auf die platiniierte Rückelektrode bestehend aus einer weiteren TCO-Schicht.

Modultechnik aufwendig → Abdichtung des flüssigen Elektrolyts

Herstellung:

Glas, TiO₂ Nanopartikel + Farbstoff

Gegenelektrode SnO₂ mit Pt Inseln, wässriger Elektrolyt

Module mit 2 Platten (Glas) und Abdichten

Perowskite:

Als Perowskit bezeichnet man ein häufig vorkommendes Mineral der Klasse der „Oxide und Hydroxide“. Der klassische Vertreter hat die Zusammensetzung CaTiO₃ (Calciumtitanat).

Die Perowskit-Struktur ist also ein wichtiger Strukturtyp, der verschiedene technische Bedeutungen erlangt hat (z. B. Ferroelektrika). Perowskite haben die allgemeine Struktur AMX₃ (wie CaTiO₃).

PV-relevant sind folgende Perowskite:

- A ist ein kleines organisches Ammoniumkation
- M ist Blei oder Zinn
- X ist ein Halogenid (Cl-, Br- oder I-)

Für die PV relevant ist bisher das am häufigsten verwendete Methylammonium (MA, CH₃NH₃⁺) als Kation.

Perowskite mit MAPbI₃ haben eine Bandlücke von 1,5-1,6 eV und absorbieren Licht bis zu einer Wellenlänge von 800 nm. → CH₃NH₃Pb(I,Cl)₃

Die bisher erreichten Zellwirkungsgrade erreichten 20,1 %, jedoch bestehen noch sehr viele Herausforderungen in der Entwicklung bez. Stabilität, Hystereseeffekte und toxischen Bestandteilen wie Blei.

Die klassische Perowskitzelle besteht aus dem Aufbau:

Substrat/FTO/PDAT:PSS/Perowskit/[60] PCBM/TiO_x/Al:

Es handelt sich folglich um eine org./anorg. Hybridtechnologie. Perowskitschichten sind sowohl nasschemisch aus der Lösung oder durch Aufdampfverfahren herstellbar und haben durch eine rasante Entwicklungskurve in den letzten Jahren auf sich aufmerksam gemacht.

6.9 Neue Ideen zur Überwindung des Shockley-Queisser-Limits

6.9.1 Grundlegende Thermodynamische Aspekte

Grundlegende thermodynamische Überlegungen, Carnot Wirkungsgrad, Landsberg-Wirkungsgrad von Solarzellen

Prinzipielles Problem:

- Photonen $\hbar\omega < \varepsilon_g$ werden nicht absorbiert
- Photonen $\hbar\omega > \varepsilon_g$ haben zu viel Energie $\hbar\omega - \varepsilon_g$ geht „verloren“
- Nicht vermeidbare strahlende Rekombination $\Rightarrow$ Shockley-Queisser-Limit, für $\varepsilon_g = 1.5\text{eV}$ maximal (AM0) 33 %! (bei perfekter Sammlung und Absorption aller Photonen für $\hbar\omega > \varepsilon_g$)

Überwindung dieser Grenze?

1. passe Solarzelle an Sonnenspektrum an
2. verändere Spektrum (Anpassung an Solarzelle)

zu 1) infinite Tandem, impurity band, up-converter

zu 2) Quantum Vervielfachung (Stoßionisation), Raman Lumineszenz, Down-Converter

6.9.2 Spektrale Trennung/Tandemzellen/Stapelzellen

TPV: Thermophotovoltaik

„Zwischenabsorber“ → Emittiert über Filter auf Solarzelle

auch andere Strahlungsquellen als Sonne möglich

Spektrale Aufteilung mit semitransparenten Spiegeln

Nutzung auch thermisch

Tandemkonzepte (bis 86,8 % Wirkungsgrad)

6.9.3 Heiße Ladungsträger

Ladungsträger mit hoher Überschussenergie abgreifen, bevor sie thermalisieren

6.9.4 Stoßionisation

Ein Photon kreiert mehrere e/h-Paare, auch Umkehrung ist erlaubt

Eff. Bis ca. 50 %

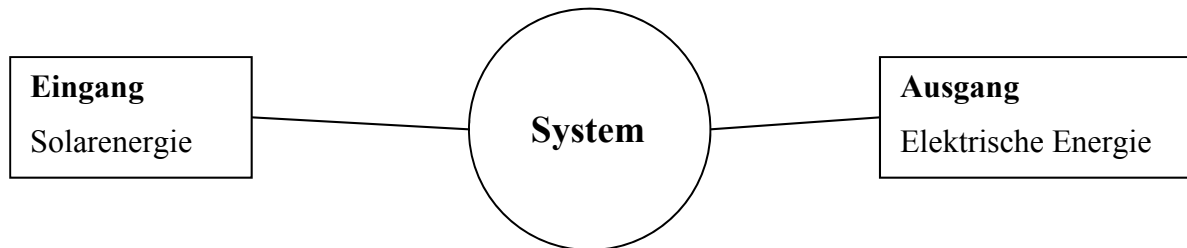
6.9.5 Zweistufenabsorption

Zustände im verbotenen Band absorbieren Photonen und tragen zur e/h-Bildung bei

7 Systemtechnik

System: besteht aus Komponenten, die durch Informations- und/oder Energieflüsse verbunden sind

PV-Modul ist nur eine Komponente



Andere Komponenten:

- Modul = Generator
- Hilfsgenerator
- Speicher
- Aufständigung
- Elektronik
- Solares Angebot
- Verbraucher, Lastkurven

Übersicht über Komponenten:

- PV ist eine „ideale Stromquelle“
- Speicher (elektronisch, mechanisch, elektrochemisch)
- Elektronik (Dioden, Laderegler, Wechselrichter, Netzüberwachung, Leitungen,...)

Anwendungen:

Netzgekoppelt	↔	netzfern
Zentral/dezentral		Konsumerprodukte, ländliche Elektrifizierung, industrielle Anwendungen

7.1 *Allgemein, Einstrahlung und Verbrauch*

Einstrahlung:

- Abhängigkeit von Ort und Zeit, Aufstellwinkel
- Jahresverlauf, Tagesverlauf

in Deutschland Globalstrahlung 900 - 1200 kWh/m²

im Max. ca. 1200 kWh/m²

in Barcelona pro Tag zwischen ca. 1.8 - 5.8 kWh/m²

Optimum ca. 30° (flach)

- Unterschiede zwischen dem Verhältnis diffus/direkt z. B. Nordeuropa – Sahara
- Starke Fluktuationen durch Wolken

Lastprofile: können völlig unkorreliert sein oder

- synchron
- konstant
- antizyklisch
- periodisch (Woche, Tag, ...) zur Einstrahlung

Elektrische Eigenschaften einer Solarzelle:

- Solarmodule sind „typische Stromquellen“
- Bsp. grafische Bestimmung des Arbeitspunktes (abhängig von Kennlinienfeld des Verbrauchers)
- Punkt max. Leistung (MPP)
- Abhängigkeit von Temperatur und der Intensität der Einstrahlung

Verschaltung: parallel, seriell → „Mismatch“-Verluste , Das „schwächste Glied der Kette“ bestimmt die Spannung bzw. den Strom.

Verschattung: partielle Abschattungen eines Moduls oder Anlage erzeugen überproportionale Verluste.

- „Solarzelle als Verbraucher“; überflächenproportionaler Verlust, Hot-spots
- Bypassdiodenkonzept: Modul, String
- Spezielles Abschattungsverhalten bei Dünnschichtmodulen

7.2 Wechselrichter und Netzkopplung

Wechselrichter neuerer Bauart erfüllen folgende Funktionen:

- DC-AC-Wandlung
- MPP-Arbeitspunktfestlegung
- Datenerfassung und Kommunikation
- Schutzeinrichtungen
- Netzregelung, Ziele: Vermeidung von
 - Netzüberlastungen
 - Netzausbaukosten

Anforderungen Eingangsseitig:

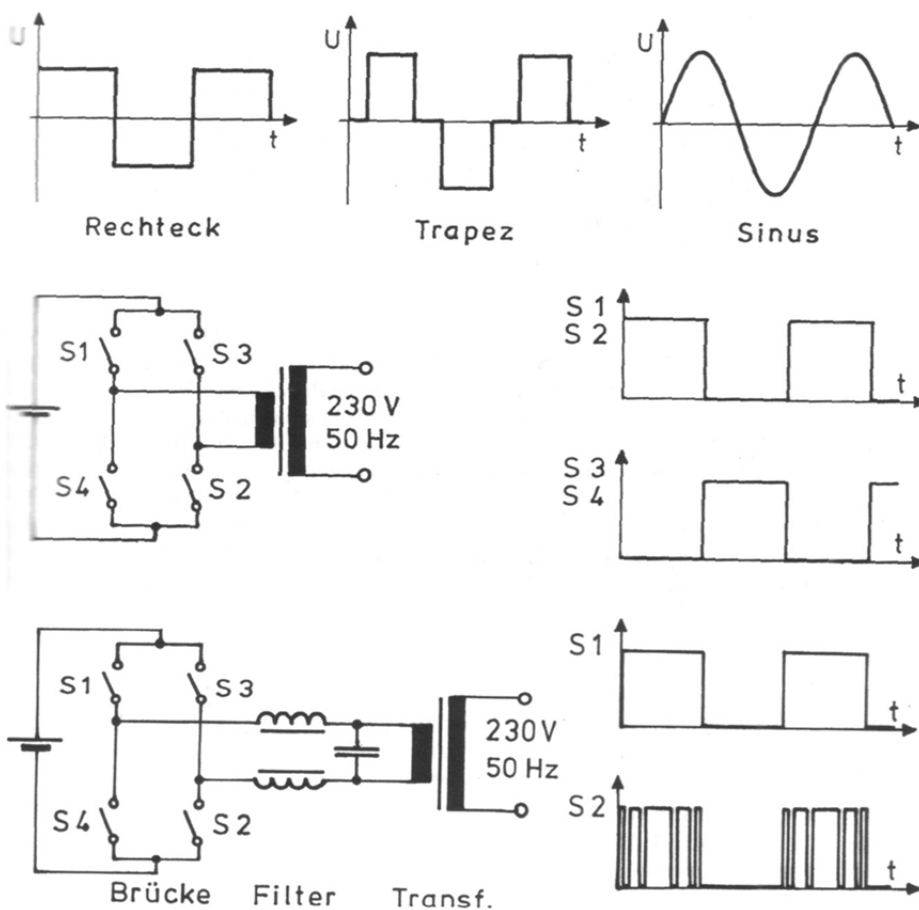
- Gute Anpassung an Solargenerator bei variabler Solargeneratorspannung; Eingangsspannung ≥ 48 V für Leistungen oberhalb von einigen 100 W
- Maximum Power Point Tracking oder Konstantspannungsregelung
- Geringer Spannungsripple auf der Solargeneratorspannung (kapazitive Ableitströme)
- Überspannungsfestigkeit bei Leerlauf und tiefen Temperaturen
- Überlastfähigkeit
- Begrenzung der Eingangsleistung bei Übertemperatur
- Niedrige und stabile Ein- und Ausschaltsschwellen
- Schutz gegen transiente Überspannungen
- Definition der Systemspannungslage (wichtig!)
 - PID (potential induced degradation) Effekt durch Potenzial auf der AC-Seite (Spannungsinduzierte „Kriechströme“)

Anforderungen Ausgangsseitig:

- Möglichst sinusförmiger Ausgangsstrom (Stromquelle)
- Geringer Oberschwingungsgehalt im Strom
- Strom in Phase zur Spannung, Leistungsfaktor = 1
- Schnelle Abschaltung bei Netzfehlern
- Schutz gegen transiente Überspannungen
- Einhaltung aller relevanten Normen

Prinzip der DC/AC-Wandlung (nach J. Schmid)

Leistungselektronik: Umpolung durch Schalter



Modulintegrierte Elektronik: Teil der Funktionalität wird in „Moduldose“ verlegt

Neu zur Integration von PV im Netz:

Ziele: Vermeidung von → Netzüberlastungen

→ Netzausbaukosten

- Frequenzverhalten (50,2 Hz Problem → Niederspannungsnetz, Nachrüstung!)
- Wirkleistungsabregelung (Abregeln der PV Anlage)
- Wirkleistungsbegrenzung (70 % Leistungsbegrenzung)
- Blindleistungsbereitstellung (bisher nur Mittelspannungsnetz)

Konzepte zur Erhöhung des Eigenverbrauchs (Optimierung der Eigenverbrauchsquote) und Speicherung

Wirkungsgrad:

- $\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}}$; Abhängigkeit von Einstrahlung → Eurowirkungsgrad
- netzgeführt ↔ selbstgeführt
- mit Trafo ↔ ohne Trafo (Vor- und Nachteile: Effizienz, Gewicht, Baugröße)
→ Sicherheitskonzept (galvanische Trennung, Systemspannung)
- Wechselrichterprinzip: Rechteck, Trapez, Sinus
Pulsweitenmodulation, Schaltung mit Thyristoren, Transistoren, IGBT

Systemauslegung:

Das Wechselrichterkonzept bestimmt die Systemauslegung. Leistungs-, Strom- und Spannungsfenster des Wechselrichters sowie die Systemspannung müssen aufeinander abgestimmt sein.

- Teilgeneratorkonzept
- Strangwechselrichterkonzept
- Kleinspannungskonzept (Parallelschaltung)
- Modulwechselrichterkonzept
- Konzepte mit höheren Spannungen (Großwechselrichter)
- Master-Slave-Konzept

Kriterien:

- Ertrag (Wirkungsgrad, Abschattungstoleranz, Systemspannung der Module, Wechselrichterenauslegungsfenster (I, U, P), Eigenverbrauch, Netzregeleingriffe, Inselbetrieb, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Installation: Trafohäuser, Leitungen, ...)

7.3 Systemkonfiguration

Allgemein zu PV-Systemen:

- PV-Systeme sind modular aufgebaut
- außerordentlich großer Leistungsbereich (μW bis MW)
- wir unterscheiden: netzfreie (netzferne), netzgekoppelte Anlagen, Inselnetze
- Lastverhalten bestimmt Anlagenauslegung
- bei netzgekoppelten Systemen klarer Trend zu
 - „Kraftwerksregelungstechnik“, Steuerung von Lasten
 - Integration von Speichern
 - Verschiedene Betriebsmodi:
 - Eigenverbrauchsmaximierung
 - Autarkie
 - Kostenoptimierung → Batterielebensdauer
 - Netzstützung aus Sicht der Energieversorger
 - Vermeidung von teurer Netzauslegung auf Spitzenlasten
 - Direktvermarktung

Unterschiedliche Systemkonfigurationen

- PV-Module – Laderegler – Verbraucher (DC) + Batterie
- mit Hilfsgenerator AC → DC; Kopplung auf DC-Seite
- zusätzlich Wechselrichter → AC (auch AC-Verbraucher)
- Kombination mit mehreren Hilfsgeneratoren + Speicher
- Kopplung auf der 3-phasigen Seite (Drehstrom)

- oder Kopplung auf der AC-Seite einphasig
- Systeme modular erweiterbar

Komponenten einer „normalen“ Anlage zur Netzeinspeisung im Haus:

- PV-Module – DC-Verkabelung (Erdungsprinzip) – Integration
Blitzschutz – Freischalter (DC) – Wechselrichter (mit Sicherheitsfunktionen) – FI-Schalter (abhängig vom Erdungsprinzip) – Sicherung – Zähler – Hausnetz

Neu: Eigennutzung von PV-Strom, Kombination mit ortsfesten oder/und mobilen Batterien. Lastmanagement, Netzstabilisierung, Netzregeleingriffe. Zusätzlicher Kundennutzen durch z. B. USV Funktion.

7.4 *Zusatzstromerzeuger*

Wir unterscheiden grundsätzlich Systeme mit:

- Interne Speicher (z. B. Batterie)
- Externe Speicher (z. B. Brennstoffzelle)

In PV-Systemen (Inselbetrieb) werden meist Dieselgeneratoren, Batterien oder Windgeneratoren eingesetzt. Die Auswahl erfolgt nach den erforderlichen Lastzyklen und der Systemverfügbarkeit bzw. Sicherheit, wobei oft der Logistik und der Wartungsanfälligkeit eine besondere Rolle zukommt. In die Kosten geht ebenfalls die Langzeitstabilität ein. Die Beispiele Batterie (Standard in PV-Inselsystemen) und Brennstoffzelle werden beispielhaft behandelt.

Verschiedene Batterien:

- Nichtaufladbare Primärbatterie
- Wiederaufladbare Sekundärelemente (Akkumulatoren)
 - o Pb
 - o Ni-Cd
 - o Ni-MH
 - o Li-Ionen

Batterietypen mit verschiedenen Eigenschaften:

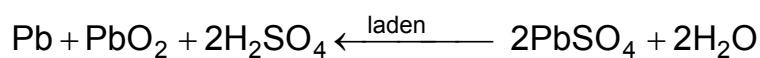
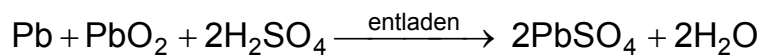
- Starterbatterie
- Traktions-Batterien oder Industriebatterien (z. B. USV)
- Solarbatterien

→ unterschiedliche Lastzyklen, Temperaturbereich

1. Unterschiedliche Gittertechnologien
2. Wartungsaufwand, wartungsfrei (geschlossene Batterien)
3. Separation der Elektroden (Gitterplatte, Röhrchentasche, Stabplatte)

Die Kapazität wird in Abhängigkeit des Entladestroms angegeben (100 Ah C/10: 10 A, 10 h bei 20 °C)

Die Bleibatterie



Starterbatterie: Mit dünnen Gitterelektroden (für hohe Leistungen, aber nicht für Zyklusbetrieb)

Abkömmlinge der Starterbatterie: Mit dickeren Gitterelektroden und Taschenseparatoren, für Zyklusbetrieb ausgelegt

Ortsfeste Batterien: Mit dicken Gitterelektroden und Glasfaserseparation, für Zyklusbetrieb ausgelegt → für Solarbetrieb geeignet

In der Praxis ist zu beachten

- Bestimmung des Ladungszustands: Elektrolytdichte, Spannung

Zu beachten:

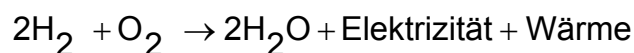
- Schichtung
- Wasserverlust
- Nennkapazität, Realkapazität (abhängig vom Entladestrom)
- Zyklusfestigkeit

- Keine zu hohe oder zu niedrige Temperatur (→ Austrocknung, Gefrierpunkt ↔ Elektrolytdichte)
- Keine Tiefentladung oder Überladung
- Permanente Teilladung

→ Laderegler muss o. g. Funktionen erfüllen. Zusätzlich ist noch wichtig das „MPP-Tracking“.

Die Brennstoffzelle

- Elektrochemischer Energiewandler: Elektrolyse und Brennstoffzelle
- Vision Wasserstoffwirtschaft: Welche Primärenergie kommt zum Einsatz?
- Wasserstoffbrennstoffzelle:



Wirkungsgrad auch schon bei niedrigen Temperaturen hoch (bis 60 %) (keine „Wärme-kraftmaschine“ → keine Begrenzung durch Carnotwirkungsgrad)

- Anode – Elektrolyt – Kathode + Reduktionsgase
- Verschiedene Typen: SOFC, MCFC, PAFC, DMFC, PEFC, AFC, Unterscheidung nach Betriebstemperatur (wichtig für dynamisches Lastverhalten, mobilen Einsatz)

Redox-Flow-Battery

z. B. Vanadium Redox Flow Battery

Zwei energiespeichernde Elektrolyte werden außerhalb in Tanks gelagert, Membran dazwischen → Ionenaustausch (überwiegend stationäre Anwendungen)

Lithium-Ionen-Batterie

Das Prinzip der Lithium-Ionen-Batterie (LIB) beruht auf der reversiblen Insertion und Extraktion von Lithiumionen in Aktivmaterialien durch elektrochemische Redoxreaktionen. (EC-DEC: Ethylencarbonat – Dithylencarbonat)

Hauptfokus der Anwendung in D ist die Elektromobilität mit den spezifischen Anforderungen an die Speichertechnik: Reichweite, Zyklenfestigkeit, Kosten, Sicherheit, Ladedauer, Leistung, etc.

„Solar to Fuel“:

Aus Sonnen- oder Windstrom wird zunächst mit der Elektrolyse Wasserstoff erzeugt, der dann mit CO₂ zu Methan gewandelt wird. Dieser kann als Erdgassubstitut ins Gasnetz eingespeist werden. Die Integration in die Infrastruktur ist einfach: Das Erdgassubstitut kann wie herkömmliches Erdgas in Versorgungsnetz, Pipelines und Speicher eingespeist werden, um dann Erdgasautos anzutreiben, Erdgasheizungen anzufeuern oder wieder verstromt zu werden. Damit könnte ein delokalisierte Speicher zur Deckung der Winterlücke realisiert werden.

7.5 *Energieausbeute und Performance Ratio*

Nennleistung: Leistung bei STC (oft schwer bestimmbar (Lichteffekte), Datenblattangaben und tatsächliche Leistung können abweichen)

Spezifischer Ertrag: Energieausbeute (innerhalb eines Zeitraums bezogen auf die Nennleistung)

Anlagenqualität (Performance Ratio = PR): realer Energieertrag bezogen auf den theoretisch möglichen (einstrahlungsunabhängig)

Verluste:

- Herstellerangaben (Datenblatt)
- Temperatur (Modultemperatur)
- Teillastwirkungsgrad
- Verschattung
- Mismatch + DC-Verluste
- MPP Anpassungsfehler
- Wechselrichterverluste (Dimensionierung)
- AC-Verluste

Typische Werte für Karlsruhe sind:

Jahresenergieertrag: 900 - 1000 kWh/kWp

PR: 80 – 90 %

7.6 Gebäudeintegration

Hohes Potenzial: Anteil an elektrischer Energieversorgung zw. 20 und 50 %

Baurechtliche Grundanforderungen (z. B. Brandschutz)

Elektrische Sicherheit (Schutzklasse)

- Multifunktionen (+1 Prinzip); PV +
 - o Wetterschutz
 - o Ästhetik
 - o Schalldämmung
 - o Wasserdämmung
 - o Abschattung
 - o Schirmdämpfung
 - o Thermische Energiewandlung
- Integration in Fassade oder Dach
- Einbau in Gebäude in Fertigelementen
- Kostensituation kann vergleichbar mit z. B. anderen hochwertigen Fassaden sein

7.7 Solare Nachführung

Wie hoch sind die Zugewinne durch Nachführung?

Die Antwort ist abhängig von:

- der Art der Nachführung (azimutal, polar, horizontal, 1-achsig, 2-achsig)
- dem Strahlungsklima (Geographie und Wetter)

- dem Aufbau des Generatorfeldes (Flächennutzungsfaktoren)

Im Sommer ist der Zugewinn an einem schönen Tag bis zu ca. 50 %. Im Winter kann er sogar 300 % betragen (gegenüber der horizontalen Fläche)

Nachführzugewinne im Jahr zwischen 25 % und 30 % dürfen für deutsche Standorte erwartet werden (2-achsige Nachführung).

Flächennutzungsfaktor

Einsatz von Doppellinsensystemen, mittlere Konzentration mit Si-Solarzellen

Beispiel Archimedes-Konzentrator:

- Zugewinn durch einachsig nachgeführte Fläche an einem sonnigen Tag 59 %, bewölkter Tag 7 %
- Mittlerer Gewinn bei ca. 27 %
- Nachführungsprinzipien: azimuthal, polar, horizontal
- V-Trog-Konzentrator
- Thermohydraulische Nachführung

Beispiel: 24 MWp Anlage in Süditalien:

Horizontale Anordnung, Nachführung im „Backtracking Mode“, einachsige Nachführung mit Minimierung der Eigenabschattung

Gewinne durch Nachführung und Verluste auf Modul- und Systemebene führen zu 1723 kWh/kWp, PR 85,2 %

8 Solarthermische Kraftwerke

8.1 *Einleitung*

Solarthermische Kraftwerke: Parabolrinnensysteme, Solarturmkraftwerke, Dish-Stirling-Systeme

Direkte Solarstrahlung erforderlich Wärmekraftmaschinen erfordern $> 300\text{ °C}$

wirtschaftlicher Betrieb nur zwischen Äquator und 35° nördlicher (südlicher) Breite

Stromgestehungskosten ca. 12-15 €ct./kWh

8.2 *Konzentration solarer Strahlung*

Konzentrationsfaktor = Aperturfläche des Konzentrators/Durchmesser des Brennflecks

Maximalwerte für 1D, 2D

Maximale Konzentration 1D 115, 2D 46164

Mögliche Varianten der technischen Realisierung: Parabolrinnen, Turm

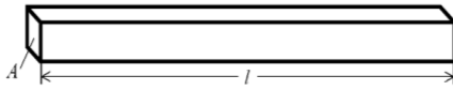
8.3 *Grundlagen Wärmetransport*

Wärmekapazität

Körpers mit der Masse m und einer Wärmekapazität c :

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt}$$

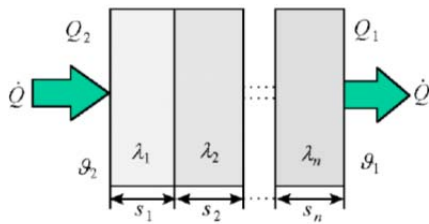
Wärmestrom



$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{l} \cdot \Delta T = (R_{th})^{-1} \cdot \Delta T$$

Wärmewiderstand R_{th}

Wärmedurchgang



$$\dot{Q} = U \cdot A (T_2 - T_1)$$

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} \right)^{-1}$$

Newton'sche Gesetz der Konvektion

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_s - T_\infty)$$

$\dot{q}$: Wärmestromdichte [W/m²]
 α : Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]

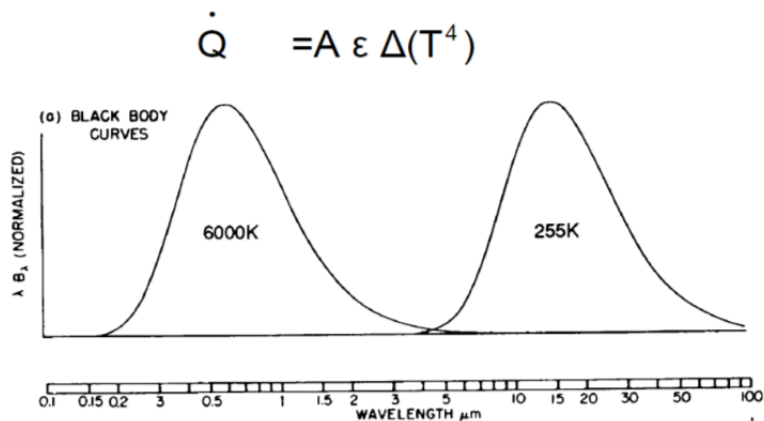
Konvektionsarten:

- (a) Erzwungene Konvektion
- (b) Freie Konvektion
- (c) Verdampfung
- (d) Kondensation

8.4 Absorberrohre

Aufbau des Absorberrohrs, thermische Verluste des Absorberrohrs

Grundlagenwiederholung: Strahlung des schwarzen Körpers, Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz



Selektive Absorberschichten: Funktionsprinzip

8.5 Parabolrinnenkraftwerke

Kollektorfeld, Thermoöl als Wärmemedium (400 °C)

Modifizierter Clausius-Rankine-Prozess:

Verdampfung, Sattedampf

Erhitzung Sattedampf

Überhitzung

Expansion in HD-Turbine

Zwischenüberhitzung

Expansion in ND-Turbine

Kondensation

Speisewasservorwärmung

354 MW Kapazität allein in SEGS-Kraftwerken installiert

- geringer Materialeinsatz: pro qm Aperturfläche

18 kg Stahl, 11 kg Glas

- 30-50 % weniger Landbedarf als bei Dish-/ Turmanlagen

- beste solare Wirtschaftlichkeit (10-15 €/kWh)

- gute Modularität

- Parabolspiegel und Absorberrohrfertigung in D

14.33

Beispielprojekt Andasol (Salztanks)

8.5.1 Speicherung

Speicherarten für Hoch- und Mitteltemperaturbereich:

1. Speicher fühlbarer Wärme-Direkte Speicher - flüssiges Speichermedium übernimmt direkt die Solarenergie - indirekte Speicher - festes Medium speichert, Wärmetauscher führt Wärme ab

Für eine große Speicherkapazität und -dauer sollten die auf das Volumen bezogene spezif. Wärmekapazität und das Speichervolumen möglichst groß sein; der Wärmeinhalt skaliert mit dem Volumen, die Verluste mit der Oberfläche.

Die Wärmedämmung verlängert stark die nutzbare Dauer der Wärmespeicherung.

2. Dampfspeicher

3. Speicher latenter Wärme

Die Energien, die Speichermaterialien bei einer Phasenänderung von fest nach flüssig unter relativ kleiner Volumen- und Druckänderung oder von flüssig nach dampfförmig aufnehmen und beim Erstarren bzw. Kondensieren abgeben sind wesentlich größer als die reinen Wärmekapazitäten.

4. Thermochemische Energiespeicher

Beispiel:

2-Tank fl. Salzspeicher „Solar Two“, Barstow, Cal.

Wärmeträgerfluid: NaNO_3 (60 %) / KNO_3 (40 %)

Kristallisationspunkt: 221 °C

Betriebstemperatur: 290 °C – 565 °C

Tankvolumen: je 875 m^3

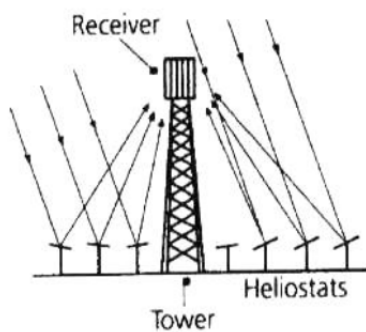
Kapazität: 115 MWhth / 3 h Nennlast

8.6 *Fresnel-Kollektor-Kraftwerke*

Beispiele

8.7 *Solare Turmkraftwerke*

Turmkraftwerk = Sonne + Heliostaten + Receiver + (Speicher) + konventionelles Wärmekraftwerk



Wärmeträgermedium:

Temperatur ca. $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Konzentrationsfaktor: einige 100 – 2000 (vergl. max. 46164)

Zweiachsige Nachführung

Spitzenwirkungsgrade von 18-23 %

Wärmeträger:

- Dampf (Probleme mit schwankender Einstrahlung, Speicherung)
- Salzschnmelze (kostengünstig, gute Wärmeübertragungseigenschaften, Speicherung; Problem: Schmelzpunkt $>100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Korrosion)
- Luft (Problem: schlechte Wärmeübertragung; aber kostengünstig, geeignet zum Antrieb von Dampf- oder Gasturbinen)

- Flüssige Metalle (Natrium)

➔ schwankende Einstrahlung führt zu schnell schwankenden Parametern bei Verwendung von Wasser als Medium

➔ -Alternativen: Salzschnmelzen, Natrium, Luft, ...

Salzturmkraftwerk:

- Salz wird von 285 °C auf 565 °C erhitzt
- Speicherung möglich
- Betrieb einer Dampfturbine
- Rückführung in Kaltsalztank

Luft als Wärmemedium:

Vorteile: einfache Handhabbarkeit, hohe Temperaturen (hohe Wirkungsgrade), keine Temperaturbeschränkungen

Nachteile: schlechte Wärmeübertragung

Atmosphärischer Luftreceiver

„volumetrischer Receiver“

Absorbermaterialien:

Drahtgeflechte, keramische Schäume,

keramische/metallische Wabenstrukturen

Erhöhte Wirkungsgrade durch: GuD-Prozess

dazu erforderlich: Hohe Temperaturen

erzeugbar durch: Hohe Konzentration

außerdem erforderlich: Druckreceiver

Hohe Konzentration durch Sekundärkonzentratoren

- Reduktion des Brennfleckes auf einen einzelnen Receiver

- wirtschaftlicher, höhere Temperaturen möglich

Kraftwerksschaltungen - GuD-Prozess

- Steigerung des Gesamtwirkungsgrades durch zweistufigen Prozess
- Betrieb einer Gasturbine bei hohen Temperaturen
- nachgeschaltetes konventionelles Dampfkraftwerk

Solarturmkraftwerke

Bisher relativ langsame Entwicklung;

Gründe:

- große Projekte mit hohen Investitionskosten -> finanzielles Risiko
- erfordert internationale (politische) Kontakte
- wenig verlässliche Informationen zu solaren Energieressourcen, Flächenressourcen und Ausbaupotenzialen
- Lohnt sich (noch) nicht

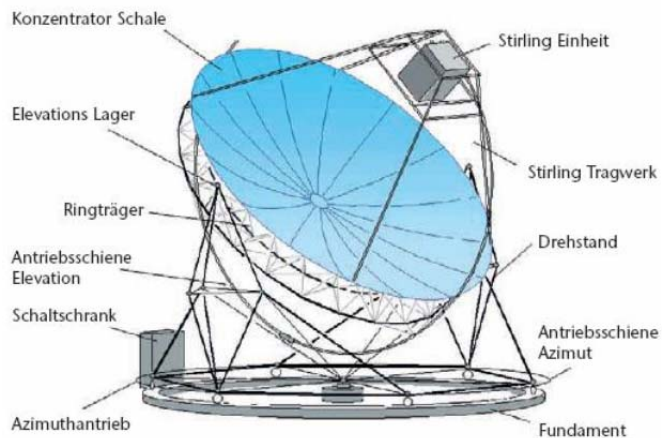
Nutzungsmöglichkeiten: Umstellung der Stromerzeugung im Sonnengürtel; Stromverbund zwischen Nordafrika und Europa „Desertec“

- Technologie hat gerade kommerzielle Reife bei Dampfkraftwerken
- weitere konkurrierende Techniken Salz-/Luftreceiver
- Ziel GuD-Kombikraftwerke mit

Hochtemperaturwärme 1100 °C

- potentiell geringe Stromgestehungskosten
- durch höhere Wirkungsgrade

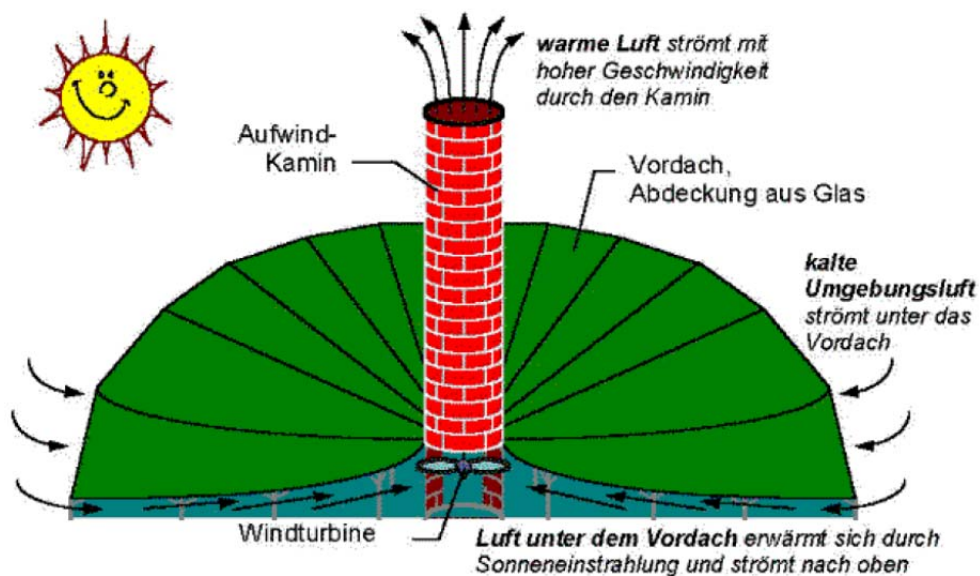
8.8 Dish-Stirling-Systeme



- typische elektrische Leistung zwischen 5 und 50 kW
- geeignet zur dezentralen solaren Stromerzeugung
- gute Konzentration durch parabolischen Reflektor
- zweiachsige Nachführung

Funktionsprinzip Stirling-Motor

8.9 Aufwindkraftwerke



Das Aufwind-Kraftwerk benötigt kein Kühlwasser und ist deshalb für den Einsatz in extremen Trockenregionen prädestiniert.

Das Aufwind-Kraftwerk kann auch die diffusen Anteile der Sonnenstrahlung nutzen und funktioniert daher auch bei Bewölkung.

Das Aufwind-Kraftwerk ist besonders zuverlässig und wenig störanfällig.

Wegen der Einfachheit seiner Komponenten kann das Aufwind-Kraftwerk auch in industriell wenig entwickelten Ländern gebaut werden. Die für den Bau von Aufwind-Kraftwerken notwendigen Materialien Beton, Glas und Stahl sind überall in ausreichenden Mengen vorhanden.

Durch den Einbau einfacher thermischer Speicher kann das Aufwind-Kraftwerk als Grundlastkraftwerk rund um die Uhr Strom produzieren.

9 Solarkollektoren

9.1 Bedeutung der Solarthermie

Allgemein: Entwicklung des deutschen Solarthermiemarktes:

Im Jahr 2015 ca. 0,8 Mio m² neuinstallierte Kollektorfläche

Ca. 3 Mrd. € Umsatz bei deutschen Herstellern

9.2 Kollektortypen

9.2.1 Schwimmbadheizung

Kleine Temperaturdifferenz ausreichend, → geschwärzte Rohre, einfache Zweipunktregelung

9.2.2 Flachkollektor

Für Brauchwasser höheres Temperaturniveau nötig

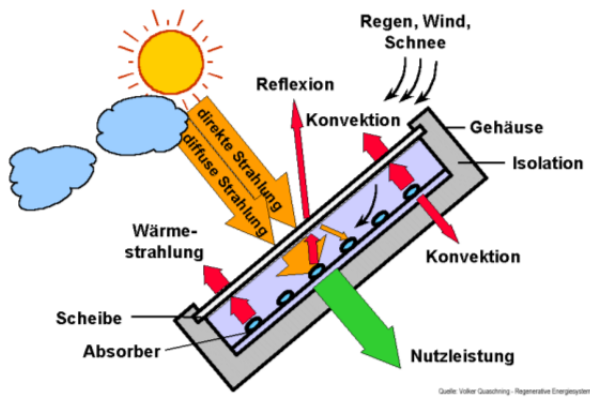
Verschiedene Kollektortypen:

- Flachkollektoren Vakuum
- Röhrenkollektoren Speicherkollektoren

+ Speicher, Pumpen, Regelung

→ verschiedene Bauarten: nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren und Luftkollektoren, konzentrierende Kollektoren

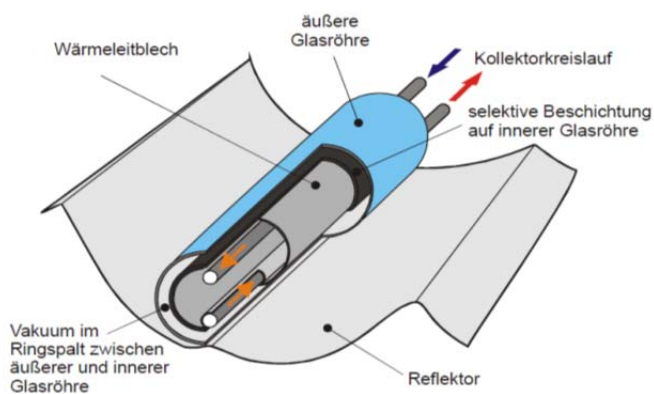
Flachkollektor: wichtigster Kollektortyp



Wichtig: Energiebilanz, Prinzip „selektiver Emittier“

9.2.3 Vakuumröhrenkollektor

Wärmeisolation durch Vakuum



9.3 Systemeinbindung

- Thermosiphonanlagen: Kollektor tiefer als Wärmespeicher
- Anlagen mit Zwangsumlauf

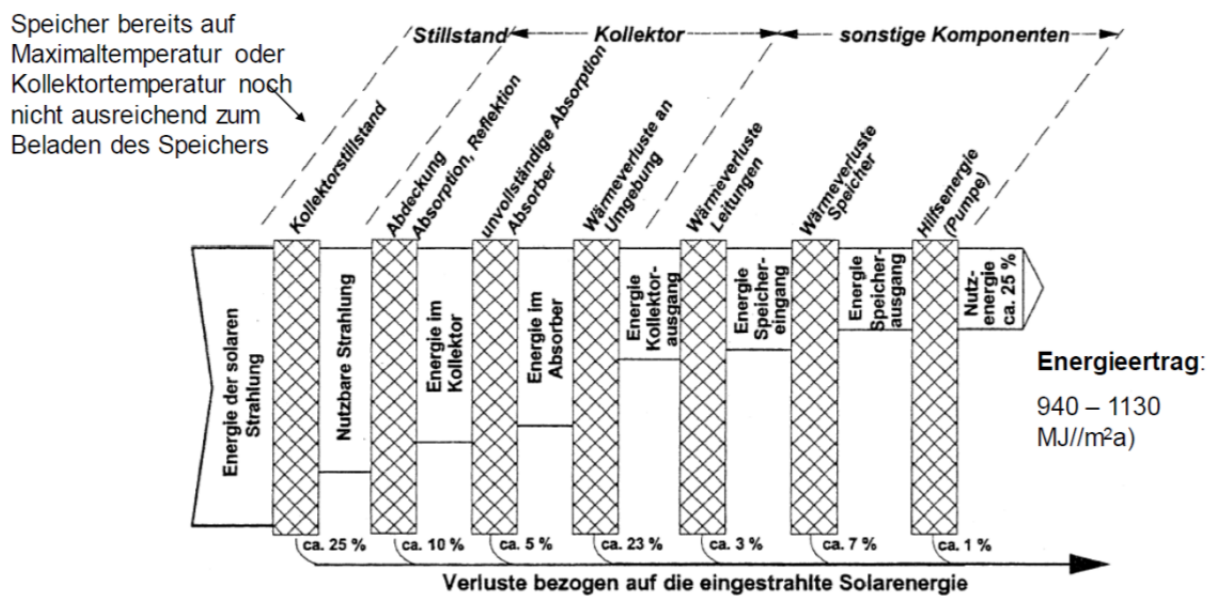
9.4 Kennwerte von Kollektoren

Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad

Verluste durch Konvektion und Strahlung

Optische Verluste, thermische Verluste

Energiefluß in einer solarthermischen Anlage:



Exkursion zum ZSW, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Solartestfeld Widderstall



22.7.2016: ZSW – Solartestfeld Widderstall