

Patrick Molitor

Der Photovoltaik-Anlagen Projektleitfaden

Solaranlagen Grundwissen von A-Z

Reihe Nachhaltigkeit
Band 24



Molitor, Patrick: Der Photovoltaik-Anlagen Projektleitfaden. Solaranlagen Grundwissen von A-Z, Hamburg, Diplomica Verlag GmbH

ISBN: 978-3-8366-0912-8

© Diplomica Verlag GmbH, Hamburg 2009

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Vorwort

Die Ihnen vorliegende Studie aus dem Bereich der Photovoltaik konnte bei der Firma Elektro Meißner Industriemontagen GmbH (Leverkusen) angefertigt werden. Daher gebührt mein Dank dieser Firma für das Zustandekommen dieser Studie, sowie für alle mir zur Verfügung gestellten technischen Einrichtungen und Hilfsmittel. Ich danke seitens der Rheinischen Fachhochschule Köln besonders Prof. Dr. Dipl.-Ing. Harjes, der mir stets bereitwillig zur Seite stand und mich bei auftretenden Fragen unterstützte.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während der Erstellung dieser Studie in allen Belangen vorbildlich unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	9
2. Grundlagen	13
2.1 Die Sonne als Energielieferant.....	13
2.1.1 Die Sonnenstrahlung	16
2.1.2 Veränderung der Sonnenstrahlung.....	20
2.1.3 Direkte, diffuse und Globale Sonnenstrahlung	22
2.1.4 Solarkonstante und Bestrahlungsstärke	25
2.1.5 Das STC-Verfahren und der Begriff Air Mass (AM).....	27
2.1.6 Die elektromagnetischen Wellen der Solarenergie	28
2.2 Geschichtliche Entwicklung der Photovoltaik.....	30
2.3 Prinzip der Photovoltaik.....	34
2.4 Aufbau und Funktion der Solarzelle	35
2.4.1 Der p-n Übergang	37
2.4.2 Eigenschaften und Wirkungsgrad der Solarzelle.....	38
2.4.3 Solarzellentypen	49
2.4.4 Modultypen und dessen Aufbau	54
2.4.5 Die Farben der Antireflexschicht.....	57
2.4.6 Vom Solargenerator zum Wechselrichter	58
3. Projekt	61
3.1 Einleitung.....	61
3.1.1 Woraus besteht eine netzgekoppelte Photovoltaikanlage.....	62
3.1.2 Energieertrag einer PV-Anlage	64
3.1.3 Kriterien für den Ertrag einer Anlage	68
3.1.4 Kosten und Einspeisevergütung einer PV-Anlage.....	72
3.1.5 Baugenehmigung und Bauliche Ausrichtung.....	75
3.1.6 Welche Schritte sollten vor der Anschaffung beachtet werden	76
3.2 Der Projektablaufplan	77
3.2.1 Der Termin	79
3.2.2 Das erste Beratungsgespräch	81
3.2.3 Grobskizze der Montageplanung mit Modulen von Solarworld	84

3.3 Die Modulkalkulation mittels Programm Sitop 4.1	85
3.3.1 Modulbeschreibung	88
3.3.2 Endplanung des Modulaufbaus beim Kunden	90
3.3.3 Der Wechselrichter	90
3.4 Angebots- und Konzeptvorstellung beim Kunden	94
3.5 Zum Energieversorger des Kunden	95
3.6 Die wechselstromseitige Schutzeinrichtung	97
3.6.1 Zähler und Messeinrichtung	99
3.6.2 Die Dimensionierung der DC- und AC-Leitungen	101
3.7 Die Modulmontage- und Inbetriebnahme vor Ort	107
3.7.1 Die Installation des Wechselrichters und dessen Beschreibung ..	111
3.7.2 Fertige Projekt PV-Anlage	118
3.7.3 Wartung und Instandhaltung der PV-Anlage.....	119
4. Wirtschaftlichkeitsberechnung der PV-Anlage	121
5. Schlussbetrachtung	125
6. Zusammenfassung	131
7. Ausblick und Zukunft der Photovoltaik.....	137
Abkürzungsverzeichnis	143
Formelverzeichnis	151
Abbildungsverzeichnis	153
Literaturverzeichnis	155
Anhang	157

1. Einleitung

In unserem Planetensystem ist die Sonne mit einem Gesamtanteil von 99,9% der beherrschende Himmelskörper. Sämtliche freiwerdende Energie stammt aus einer als „Kern“ bezeichneten Zone, wo rund 50% der Sonnenmasse konzentriert sind, obwohl dieser Kern nur 1,6% des Sonnenvolumens ausmacht. Der Bevölkerung der Erde steht mehr umweltschonende Energie zur Verfügung als sie jemals benötigen wird. Durch die Photovoltaik kann diese unerschöpfliche Energie genutzt werden.

Sogar in Deutschland gibt es genug Sonnenstunden für die Nutzung der Photovoltaik, denn pro Quadratmeter erhalten wir durchschnittlich 50 Prozent der Strahlungsintensität, die auf die Sahara trifft. Selbst bei bedecktem Himmel liefert eine Photovoltaikanlage einen prozentualen Anteil Strom. Allein aus regenerativen Energien könnte der gesamte Strombedarf in Deutschland gedeckt werden. Sogar der Branchenumsatz hat sich in den vergangenen 8 Jahren um mehr als das 49-Fache gesteigert.

Die Photovoltaik wandelt die Sonnenenergie ohne mechanische, chemische oder thermische Zwischenschritte in Strom um und steht damit für den Inbegriff der umweltfreundlichen Energieversorgung. Es entstehen weder Schadstoffe (Emissionen) noch Lärm. Im Vergleich zu dem üblichen Strommix in Deutschland aus Atomenergie, Kohle, Gas und Wasser spart photovoltaisch erzeugter Strom 585 Gramm CO²-Emissionen pro Kilowattstunde ein. Die heutigen Photovoltaikanlagen sind mittlerweile zu ausgereiften Hightechprodukten geworden und setzen sich in Deutschland, sowie weltweit immer stärker durch.

Sie bestehen zudem aus Materialien wie: Aluminium für die Rahmen, Glas für die Moduloberflächen und Sand für die Siliziumsolarzellen, die in großen Mengen zur Verfügung stehen und recycelt werden können. Der Trend geht aber mittlerweile zu dünnen Solarmodulen (Dünnschichttechnik), die auch PV-Plates genannt werden. Die Photovoltaik ist mittlerweile in jeder Stadt, auf Dächern von Eigenheimen und Unternehmen sowie öffentlichen Gebäuden zum Trend

geworden, da die Photovoltaikbranche nach wie vor boomt. Diese vielen Pluspunkte sprechen für die Photovoltaik, die die nötigen Antworten auf die Folgen der weltweiten Klimaerwärmung liefert und den Solarstrom zum Energielieferant der Zukunft machen.

Trotz alledem werden jährlich durch das pyromane Energiesystem ca. 36 Mrd. Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre verfeuert, was aufgrund der Umweltbelastung und der daraus entstehenden Klimaänderung der Planet nicht mehr lange aushalten wird. Bei allen Problemen, die in der Zukunft von Menschen zu lösen sein werden, wird die zunehmende Umweltbelastung stets weiterhin an vorderster Reihe beteiligt sein. Denn ändert sich das Energieverhalten der Menschen nicht, wird es zu spät sein!

Schon Friedrich Hölderlin sagte vor 200 Jahren

„Wo aber Gefahr ist, wächst das Rettende auch“

Quelle: Friedrich Hölderlin, Veröffentlicht 1923, G. Müller, Seite 190, 223

Der heutige Stand der Energieversorgung wird nun nicht mehr nur in zwei Kategorien eingeteilt, sondern mittlerweile in drei. Unter den bekannten ersten beiden Kategorien befinden sich die fossilen Energieträger wie Kohle, Öl und Gas, sowie die nuklearen Energieträger Uran, Thorium mit den dazugehörigen Umwandlungstechnologien. Den regenerativen Energiequellen wird ab dem 21. Jahrhundert immer mehr Aufmerksamkeit gewidmet, da die Akzeptanz der Kernenergie und anderer Umwelt schädigenden Technologien nicht mehr so große Beachtung geschenkt wird.

Im Rahmen dieser Studie werden die physikalischen Grundstrukturen der Photovoltaik vorgestellt und die Entwicklung dieser Technologie seit ihrer Entdeckung beschrieben. Bei diesem Praxisprojekt werden die übliche Problematik und die Wirtschaftlichkeit mit einem Einblick in die Zukunft herausgestellt. Dabei

soll das Interesse des Lesers nicht nur bei Studenten der ingenieur- und naturwissenschaftlichen Fachrichtung Anklang finden, sondern allen Interessierten als Nachschlagewerk dienen.

Die Aufgabenstellung dieser Studie bestand in der Projektdurchführung und Entwicklung eines Photovoltaik-Anlagen Anwenderleitfadens für die Firma und der Projektierung der Prozessablaufkette bis zur Endmontage- und Inbetriebnahme eines netzgekoppelten PV-Kraftwerks. Die Studie konnte dabei auf spezielle Fachkenntnisse aus Literatur, persönlicher Weiterbildung und Firmenfachwissen aufgebaut werden. Das Hauptaugenmerk sollte dabei auf dieses sehr zukunftssträchtige Thema gelenkt werden, um das technische Verständnis zu fördern und ein Bewusstsein für die Energie und deren effizienten Umgang zu entwickeln. Zur Veranschaulichung der Nutzbarkeit dieser alternativen Stromquelle wird die komplette Planung bis zur Endmontage eines eigenen kleinen Solarkraftwerks zur Netzeinspeisung erläutert.

2. Grundlagen

2.1 Die Sonne als Energielieferant

Es gibt ein „Feuer“, das uns tagsüber wärmt und rund 150 Millionen Kilometer entfernt ist. Was für eine Kraft muss dieses Feuer haben, dass wir die Wärme über so eine Distanz wahrnehmen können! Unsere Erde umkreist diesen thermonuklearen Ofen „die Sonne“ genau in der richtigen Entfernung. Wäre die Sonne zu nah, würde das Wasser der Erde verdampfen, wäre sie zu weit weg, würde das Wasser der Erde gefrieren. Beide Extreme würden das Leben auf unserem Planeten komplett auslöschen. Würde man dem Kern der Sonne ein stecknadelkopfgroßes Stück entnehmen und es auf die Erde bringen, könnte man sich nicht einmal in 140 Kilometer Entfernung von dieser winzigen Wärmequelle gefahrlos aufhalten.

„Die Sonne ist nicht verschwunden, weil die Blinden sie nicht sehen.“

Quelle: Birgitta von Schweden schwedische Mystikerin (1303-1373), Offenbarungen

Jede Sekunde gibt die Sonne eine Energiemenge ab, die der Explosion vieler Hunderte Millionen von Atombomben entspricht. Das Sonnenlicht ist nicht nur lebenswichtig, sondern außerdem eine saubere, leistungsstarke Energiequelle und obendrein noch wohltuend. Die Sonne ist so groß, dass unsere Erde 1,3 Millionen Mal in sie hineinpassen würde. Die Sonne ist bekanntlich ein Stern (auch als gelber Zwerg bezeichnet) und wirkt größer als die Sterne am Himmel, weil Sie uns relativ nah ist. Im Sonnenkern steckt eine Energiemacht die ca. 15 bis 20 Millionen Grad Celsius ($T = 2 \cdot 10^7 \text{ K}$) ausmachen („Vgl. Anhangsv. Abb. 2.1-c“).

Dieser Fusionsprozess im Sonnenkern liefert bei extrem hohen Temperaturen und einem Druck von 200 Milliarden Bar die notwendige Energie für unsere Erde. Unsere einzigartige Sonnenenergie, die unsere Erde erreicht, wird zum

einen Teil durch die physikalischen Eigenschaften der Sonnenoberfläche bestimmt und zum anderen Teil als so genannte Strahlungsquelle durch den Abstand der Sonne zum Strahlungsempfänger, der Erde. Die Strahlung der Sonne entsteht durch die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen. Ein Teil der Masse wird in Energie umgewandelt und stellt daher die Sonne als einen riesigen Fusionsreaktor dar. Die Masse der Sonne beträgt 99% unseres Sonnensystems.

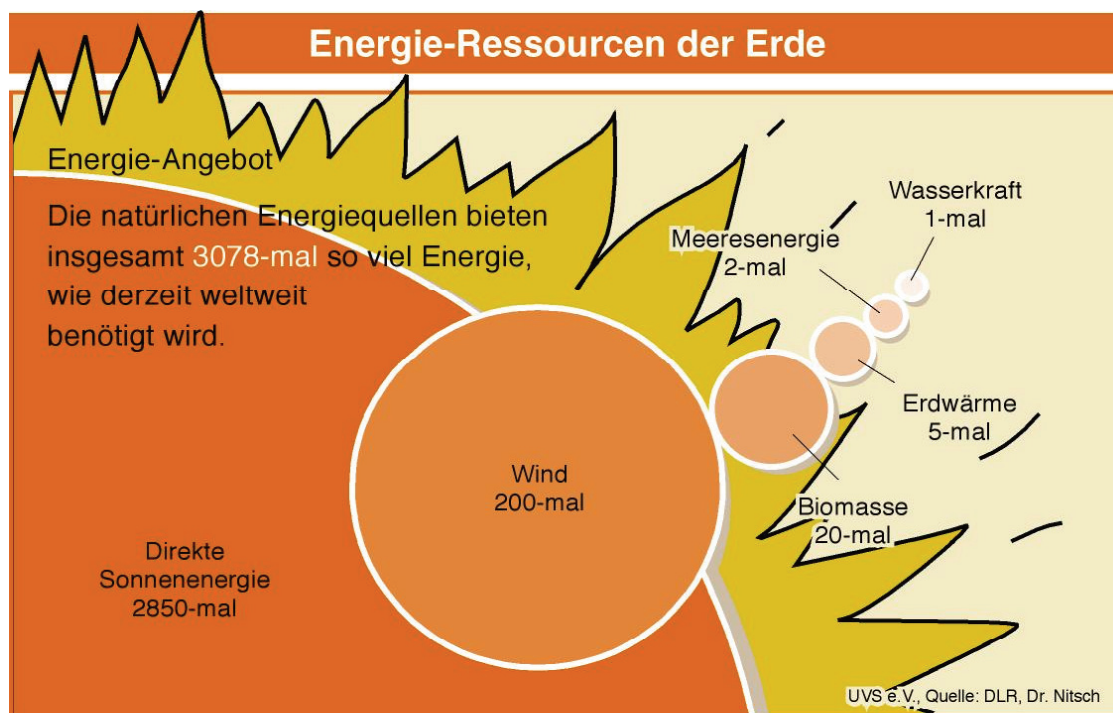


Abb. 1: Energieressourcen der Erde

Quelle: BSW Solar/UVS/DLR/Dr. Nitsch

Pro Tag liefert die Sonne ca. 1.370 Watt solare Energie pro m^2 . Dies entspricht der Energie von ca. einem Kohle-Brikett pro m^2 und pro Tag. Durch Streuung (das Licht geht z.B. durch eine Wolkendecke), die Neigung der Erde und Reflexion (jede Oberfläche reflektiert bzw. spiegelt eine bestimmte Menge Licht) sinkt jedoch die tatsächliche Energie, welche auf der Erdoberfläche ankommt. In Deutschland strahlt die Sonne pro Jahr ca. 950 bis 1.200 kWh (Kilowattstunden) Solarenergie auf jeden Quadratmeter. Dies ist der ungefähre Stromverbrauch einer Person in Deutschland. Die Sonne ist physikalisch gesehen eine autonome Energiequelle, die über einen sehr langen Zeitraum eine konstante Strahlungsenergie abstrahlt. Sonnenlicht bewirkt Photosynthese im

Chlorophyll der Pflanzen. Bei diesem Prozess entstehen Sauerstoff und Kohlenhydrate, die Grundlagen allen irdischen Lebens.

Sonnenlicht bewirkt die Zirkulation des Wassers in Form von Wolken und Regen. Bedingt durch die große Entfernung von der Erde zu unserem Energielieferant „Sonne“ gelangt ungefähr ein Milliardstel der Sonnenstrahlung auf die Erdoberfläche. Trotz der Entfernungsverluste beträgt die Energiemenge, die auf die Erdoberfläche einfallenden Sonnenlichts immer noch das 10.000-Fache des weltweiten Energiebedarfs. Bereits seit einigen Jahrzehnten ist die Art der Energiegewinnung mittels Solarzellen nun im Focus und erlangt immer mehr Auftrieb durch drastische Verbesserungen in der Fertigungstechnik als wachsendes Konkurrenzpotential gegenüber den sich erschöpfenden Energieträgern aus Erdöl, Gas oder Kohlebrennstoffen.

Im Vergleich zu diesen Energiequellen wird die einfallende Strahlung in der Photovoltaik ohne Umwege direkt in elektrische Energie umgewandelt, wobei keine Schadstoffe (Emission) entstehen und kein Lärm erzeugt wird. Die geographische Lage und die Orientierung des Strahlungsempfängers mittels Solarmodul bzw. Solargenerator, sowie die jahreszeitliche und witterungsbedingte Einflüsse, spielen eine einflussreiche Rolle bei der Bestimmung eines Photovoltaikkraftwerkes.

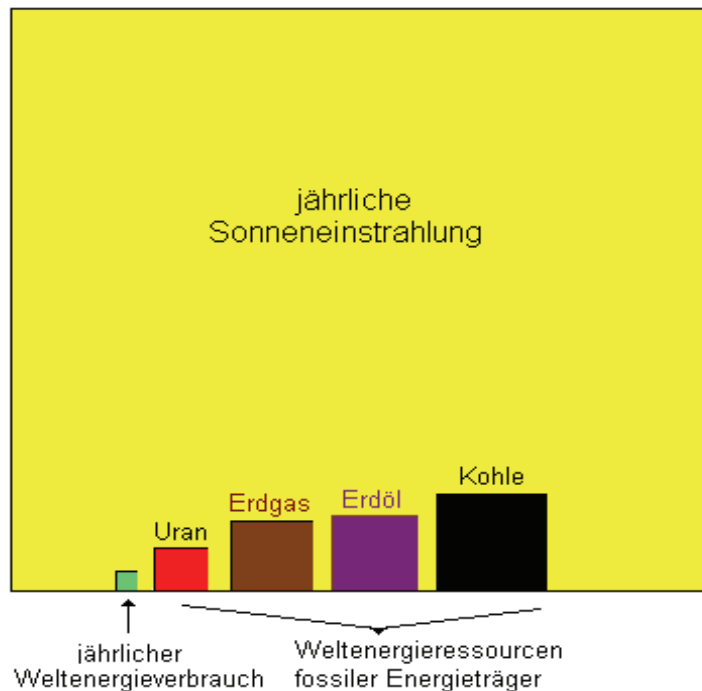


Abb. 2: Jährliche Sonneneinstrahlung im Vergleich zu den Ressourcen fossiler und atomarer Energieträger und zum Energieverbrauch der Weltbevölkerung

Quelle: eigene Darstellung

Sonnenlicht bewirkt riesige Ströme wie den Golfstrom im Atlantik oder den Perustrom im Pazifik. Sie mildern das Klima jener Landgebiete, an deren Küsten sie entlang ziehen. In nur 8 Minuten bekommt die Menschheit von der Sonne soviel Energie, wie Sie in einem Jahr benötigen würde. Die von der Sonne abgestrahlte Energiemenge würde mehr als genügen, um alle Energiebedürfnisse auf der Erde zu befriedigen.

2.1.1 Die Sonnenstrahlung

Die Strahlung der Sonne beträgt oberhalb der Erdatmosphäre durchschnittlich 1365 W/m^2 . Davon erreichen die Atmosphäre wegen der Kugelgestalt der Erde und der sonnenabgewandten Nachtseite jeweils einer Erdhälfte aber nur 342 W/m^2 .

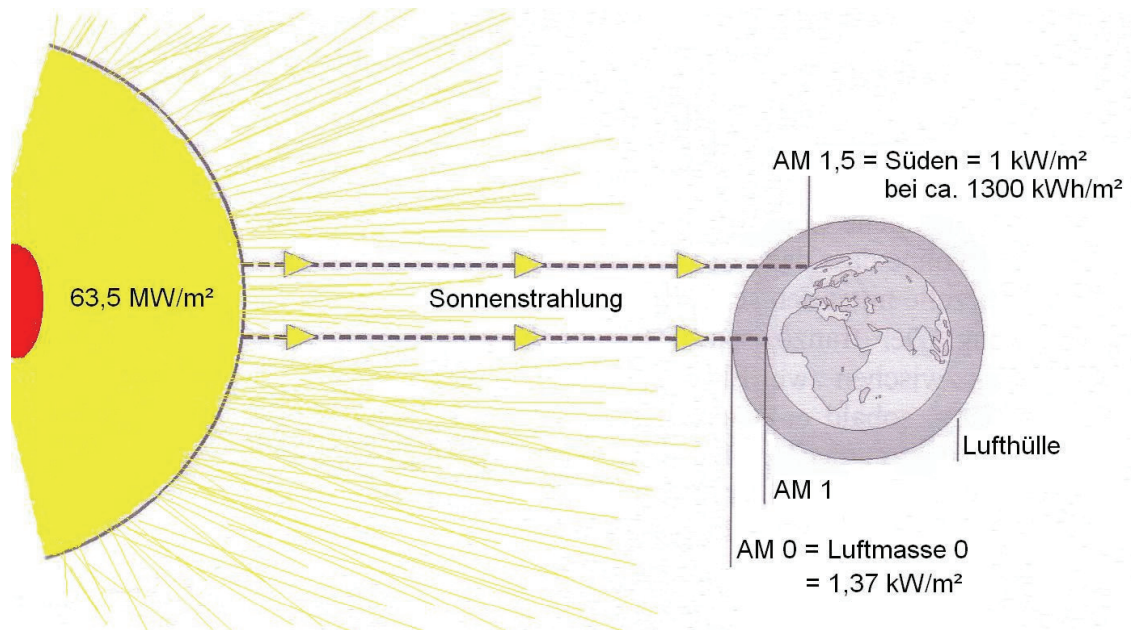


Abb. 3: Darstellung der Strahlungsenergie durch die Luftmasse AM

Quelle: eigene Darstellung

Unter Sonnenstrahlung versteht man physikalisch einen Fluss von elektromagnetischen Wellen mit einer Energie von $8 \text{ J/ (cm}^2 \cdot \text{min.)}$ bzw. $1,35 \text{ kW/m}^2$ (Solarkonstante). Das Strahlungsspektrum beträgt: 10^{-16} m bis 10^6 m Wellenlänge. Das Spektrum wird unterteilt in ionisierende Strahlung, optische Strahlung und Hochfrequenzstrahlung. Die Strahlung wird verursacht durch die Reaktion von Wasserstoffatomkernen (Protonen) zu Heliumatomkernen (Kernfusion) mit über 15 Millionen Grad im Kern der Sonne. Im SI-System ist die Energieeinheit das Joule ($1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$) und der Strahlungsfluss wird in der Einheit J/s m^2 angegeben, was gleichbedeutend der Einheit W/m^2 ist. In älteren Lehrbüchern ist als Einheit die cal gebräuchlich.

Es gelten die Umrechnungen:

$$1 \text{ J} = 0,2390 \text{ cal} \rightarrow 1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$$

$$1 \text{ kJ/min cm}^2 = 1,67 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2 \rightarrow 1 \text{ kWh/m}^2 \text{ d} = 41,67 \text{ W/m}^2$$

$$1 \text{ W/m}^2 = 0,001434 \text{ cal/cm}^2 \text{ min} \rightarrow 1 \text{ cal/cm}^2 \text{ min} = 697,3 \text{ W/m}^2$$

$$1 \text{ kW/m}^2 = 1,434 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$$

Die Strahlung, die die Erde erreicht, stammt aus einem äußeren Bereich der Sonne, wo die Temperatur an der Sonnenoberfläche nur noch ca. 5000 bis 6000 Grad beträgt. Die höchste Strahlungsintensität („Vgl. Anhangsv. Tab. 2.1.1-a2“) und damit den Hauptanteil der Energie liefert der Bereich des sichtbaren Lichts von 380 bis 750 nm Wellenlänge (violett bis rot) mit ca. 50%, gefolgt von der Infrarot-Strahlung von 750 nm bis 24 µm (nah bis weit) und der UV-Strahlung von 10 bis 380 nm (extrem weit bis nah).

Sowohl der Ultraviolettanteil (UV-C und UV-B) als auch der mittlere Infrarotanteil liefern mit je ca. 1% nur einen geringen Energiebeitrag. Die Intensität der Sonneneinstrahlung auf eine horizontale Fläche ist abhängig von der auftretenden Sonnenstrahlung und der Sonnenhöhe. Die auf die Erde treffende Sonnenstrahlung rührt aus der Temperatur der Sonnenoberfläche her. Bezeichnungen einzelner Wellenlängenbereiche des Sonnenspektrums („Vgl. Abb. 9“). Die solare Einstrahlung auf die Erde („Vgl. Anhangsv. Tab. 2.1.1-b2“) liefert im Jahr über 219.000 Billionen kWh Energie. Das ist 2500-mal mehr, als die gesamte Weltbevölkerung verbraucht. In Deutschland beträgt die durchschnittliche Globalstrahlung etwa 1.075 kWh/m², was etwa 50% der Strahlungsintensität entspricht, die auf die Sahara trifft. Dazwischen, im Süden Spaniens und in Nordafrika, liegt der Wert bei 1.750 kWh/m².

Außerhalb der Erdatmosphäre ist die Intensität der Sonnenstrahlung abhängig vom Abstand zwischen Erde und Sonne. Dieser Abstand beträgt ca. 150 Mio. km (= 1 AE oder 8,3 Lichtminuten). Dadurch dass der Abstand der Sonne zu Erde variiert, verändert sich die Bestrahlungsstärke zwischen 1325 W/m² und 1412 W/m². Der Mittelwert wird als Solarkonstante bezeichnet. Auf der Erdoberfläche wird diese Bestrahlungsstärke nicht erreicht, da beim Durchgang durch die Atmosphäre die Solarstrahlung durch Reflexion und Absorption (Luftmoleküle, Staubteilchen oder Verunreinigungen der Luft reduzieren durch Streuung ebenfalls die Sonneneinstrahlung) eine Abschwächung erfährt, die unter dem Begriff Extinktion zusammengefasst wird.

Bei schönem Wetter wird an der Erdoberfläche in der Mittagszeit eine Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² erreicht („Vgl. Anhangsv. Abb. 2.1.1-c“). Dieser

Wert ist unabhängig vom Standort. Durch Reflexionen an vorbeiziehenden Wolken können an locker bewölkten Tagen die höchsten Einstrahlungsspitzen auftreten. Diese können bis zu 1400 W/m^2 betragen. Summiert man den Energiegehalt der Sonneneinstrahlung über ein Jahr, so erhält man die jährliche Globalstrahlung in kWh/m^2 . Dieser Wert ist regional, je nach der Entfernung zum Äquator und dem Sonnenabstand, sehr variabel.

Die Regionen am Äquator erreichen die höchsten Werte der Sonneneinstrahlung über das Jahr mit 2.300 kWh/m^2 , während in Südeuropa mit einer jährlichen Sonneneinstrahlung von maximal 1.700 kWh/m^2 und in Deutschland mit durchschnittlich 1.040 kWh/m^2 gerechnet werden muss. Die Pflanzen auf der Erdoberfläche haben sich daran angepasst, indem sie gerade diesen Wellenlängenbereich absorbieren und in biochemische Energie umwandeln können. Die Wellenlänge des Lichts ist negativ korreliert mit der Energiemenge der einzelnen Lichtquanten, denn die Energiemenge der Lichtquanten (Photonen) berechnet sich aus der Frequenz der Strahlung multipliziert mit der Planckschen Konstanten.

Für den Bereich des sichtbaren Lichtes beträgt die Strahlungsenergie zwischen $1,59$ und $3,26 \text{ eV}$. Summiert man den Wert der Sonneneinstrahlung an einem Ort über ein Jahr, so erhält man die jährliche Gesamt- oder Globalstrahlung in kWh/m^2 . Die Strahlungsenergie der Sonne in Deutschland ist in den südlichen Bundesländern im Jahresmittel höher als im Norden. In Deutschland liegt die Solarstrahlung zwischen 900 kWh/m^2 (Norden) und 1.200 kWh/m^2 (Süden) pro Jahr. Eine Solarzelle wandelt davon ca. 15% in Strom um. Damit strahlt auf Deutschland immer noch halb so viel Energie ein, wie auf die strahlungsreichsten Gebiete der Erde am Äquator!

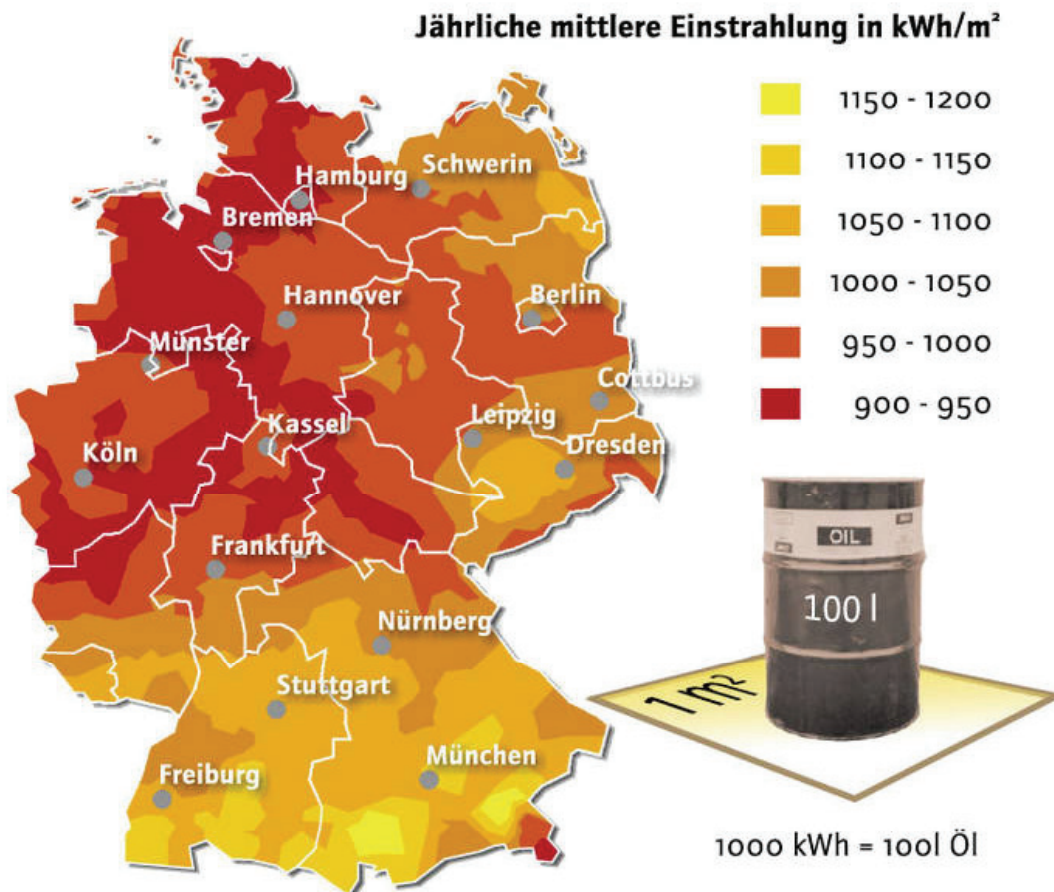


Abb. 4: jährliche mittlere Einstrahlung in kWh/m²

Quelle: <http://www.solarbusiness.de>

2.1.2 Veränderung der Sonnenstrahlung

Veränderte Parameter in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, können allerdings nicht verantwortlich für die relativ kurzfristigen Schwankungen der Nacheiszeit sein, deren Zeitskalen bei Jahrzehnten bis Jahrhunderten liegen. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in der Sonnenaktivität. Die seit Erfindung des Fernrohrs beobachteten und seit 1610 dokumentierten Sonnenflecken werden begleitet von Sonnenfackeln und Protuberanzen, die die Energieabstrahlung der Sonne verstärken und die Solarkonstante leicht erhöhen. So fällt das so genannte Maunder-Minimum (1650 - 1710) während der "Kleinen Eiszeit" in eine Zeit ohne Sonnenflecken.

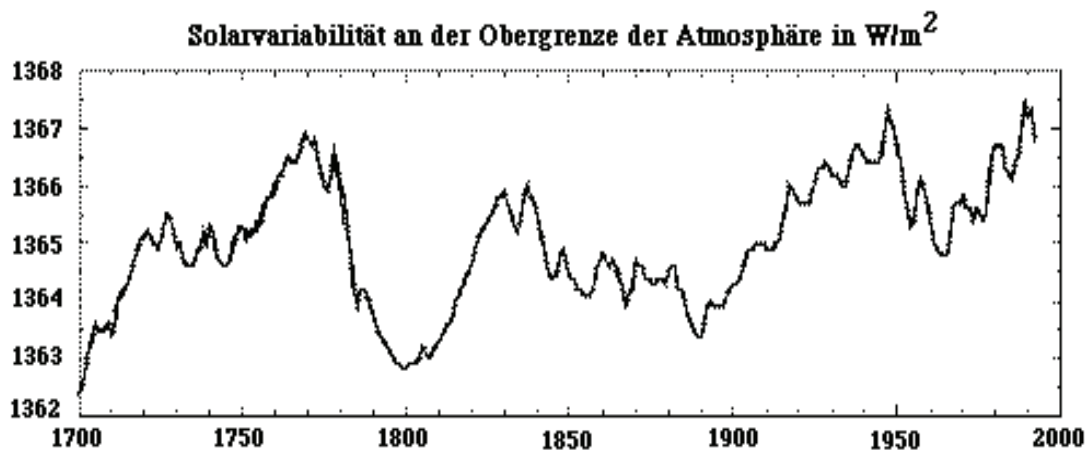


Abb. 5: Veränderung der Solarstrahlung seit 1700

(Quelle: dkrz, MPI-Rep.206)

Die Bahnparameter und die Lage der Erdachse lassen sich nach den Gesetzen der Physik berechnen und bieten keine Überraschungen. Anders sieht es mit der Veränderlichkeit der Sonnenintensität aus. Schon seit dem Mittelalter ist bekannt, dass in einem 11-Jahres-Rhythmus Sonnenflecken auftreten. Diese sind seit dem 17. Jahrhundert regelmäßig an vielen Sternwarten aufgezeichnet worden. Es wurde allerdings erst mit den ersten Satellitenmessungen deutlich, dass die Sonnenflecken direkt mit der Intensität der Sonneneinstrahlung korreliert sind, und zwar bedeutet eine Zunahme der Flecken eine Zunahme der Intensität. Direkte Messungen der Sonnenstrahlung werden seit etwa 20 Jahren mit verschiedenen Satelliten durchgeführt. Hierdurch vermeidet man Fehler, die durch die Absorption in der Atmosphäre entstehen.

Schon vorher hatte man in den Aufzeichnungen der Sonnenflecken erkannt, dass es nicht nur den 11-Jahreszyklus (Schwalbe-Zyklus) gibt, sondern auch eine etwa 80-jährige Periodizität (Gleissberg-Zyklus), die man ebenfalls bei sonnenähnlichen Sternen beobachtet hat. Der 11-Jahreszyklus besitzt eine Schwankungsbreite an der Obergrenze der Atmosphäre von ca. 0,1% der Solarkonstante, der Gleissberg-Zyklus etwa 0,24 bis 0,30%, was einer Veränderung der Solarkonstanten um ca. 5 W/m² entspricht.

Die Sonnenstrahlungsvariationen des 80-jährigen Gleissberg-Zyklus führen zu einer Variabilität der an der Erdoberfläche absorbierten Sonneneinstrahlung von

0,5 bis 0,75 W/m². Diese Zahl muss man im Vergleich zu der Abschätzung des Strahlungsantriebs durch das Anwachsen der anthropogenen Treibhausgase von der vorindustriellen Zeit (1850) bis heute von ungefähr 2,4 W/m² betrachten („Vgl. Anhangsv. Abb. 2.1.2-b“). Es gibt noch eine Reihe weiterer Zyklen, die man in Proxy-Daten für die Solarintensität, so in 14C und 10Be-Schwankungen in Baumringen und Eisbohrkernen sowie bei sonnen-ähnlichen Sternen findet.

Änderungen in den Strahlungsantrieben von 1750 bis 2000 rühren von Änderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre, von Veränderungen in der Landnutzung und von der Veränderung der Sonneneinstrahlung her. Menschliche Aktivitäten beeinflussen jeden Faktor mit Ausnahme der Sonnenaktivität. Die Balken geben den Beitrag jedes dieser Faktoren zum Antrieb an, einige erzeugen eine Erwärmung, einige eine Abkühlung. Änderungen des Antriebes durch Vulkanismus sind nur episodisch, d.h. sie erzeugen eine nur wenige Jahre dauernde Abkühlung. Sie werden deshalb hier nicht gezeigt. Die vertikale Linie an jedem Balken gibt eine Abschätzung der Unsicherheit wieder. Der wissenschaftliche Kenntnisstand ist für die verschiedenen Antriebsfaktoren unterschiedlich hoch.

2.1.3 Direkte, diffuse und Globale Sonnenstrahlung

Das Sonnenlicht auf der Erdoberfläche setzt sich aus einem direkten und einem diffusen Anteil zusammen. Die direkte Strahlung kommt aus der Richtung der Sonne und verursacht scharfe Schattenwürfe von Gegenständen. Die diffuse Strahlung hingegen besitzt keine vorgegebene Richtung. An klaren Tagen überwiegt der Anteil der direkten Strahlung an der Gesamt- oder Globalstrahlung.

An stark bewölkten Tagen hingegen (vor allem im Winter) ist die Sonneneinstrahlung nahezu vollkommen diffus. In Deutschland liegen der Anteil der diffusen Sonnen-Einstrahlung bei ca. 60% und der Anteil der direkten Strahlung bei etwa 40%. Beide Strahlungsarten lassen sich für PV-Solaranlagen nutzen.

Die auf die Erde einfallende und für Solaranlagen nutzbare Strahlung lässt sich wie folgt unterteilen:

Direktstrahlung: Strahlung, die auf direktem Weg die Solarmodule erreicht.

Diffusstrahlung: Sie erreicht über Umwege (z.B. Wolken, Nebel) die Modulfläche.

Reflexionsstrahlung: Bei geneigtem Kollektor trifft auch die vom Boden reflektierte Strahlung die Modulfläche (besonders bei Schneelage oder hellem Wüstenboden).

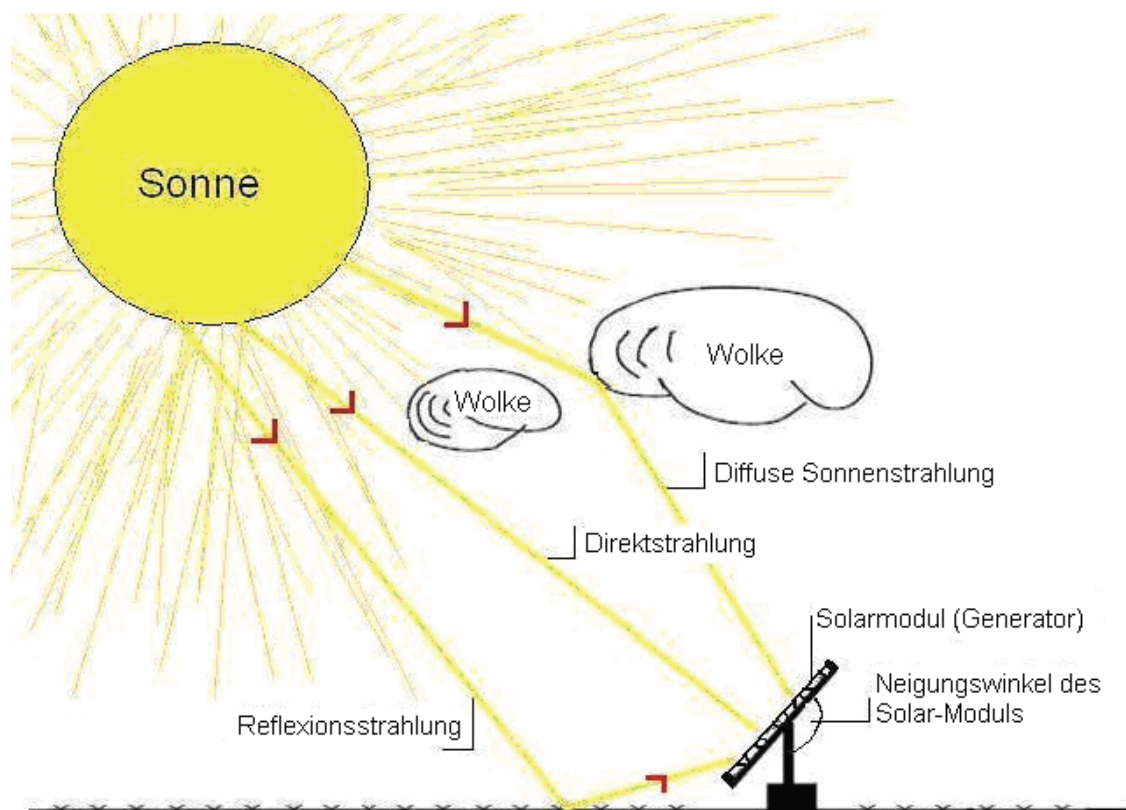


Abb. 6: Einstrahlungen auf den PV-Generator

Quelle: eigene Darstellung

Als Globalstrahlung G_g wird die Summe der während einer bestimmten Zeit (Tag, Monat, Jahr) auf eine horizontale Fläche (Erde) auftreffende Strahlungsmenge bezeichnet. Diese setzt sich zusammen, aus einem direkten und einem diffusen Anteil. Die diffuse Himmelsstrahlung G_h entsteht durch Streuung der direkten Strahlung beim Durchgang durch die Erdatmosphäre. Eine Solarzelle nutzt sowohl die Direktstrahlung G_d als auch die von der Umgebung der Zelle