

A stylized graphic at the top of the cover features a blue sky with a large green and yellow sun partially visible on the right. A dark blue horizon line separates the sky from the main title area.

Jürgen K. Wittlinger

Photovoltaikanlagen im Steuerrecht

Steuerliche Grundlagen zur Nutzung der
Sonnenenergie

4. Auflage



Springer Gabler

Photovoltaikanlagen im Steuerrecht

Jürgen K. Wittlinger

Photovoltaikanlagen im Steuerrecht

Steuerliche Grundlagen zur Nutzung der
Sonnenenergie

4. Auflage



Springer Gabler

Jürgen K. Wittlinger
Plochingen, Deutschland

ISBN 978-3-658-40320-1 ISBN 978-3-658-40321-8 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-40321-8>

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

Springer Gabler

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2012, 2015, 2020, 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat/Planung: Vivien Bender

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die Stromerzeugung mittels einer eigenen Fotovoltaikanlage ist in den letzten Jahren für immer mehr Verbraucher zu einer echten Alternative geworden. Entsprechende Überlegungen, sich eine Fotovoltaikanlage zuzulegen, werden durch die nachhaltig steigenden Energiepreise gefördert, aber auch das Bemühen um eine umweltverträgliche Energieerzeugung führt zu einer Abkehr von anderen Energiequellen.

Die Investition in eine Fotovoltaikanlage ist ein gut zu überlegender Schritt, da er mit nicht unbeträchtlichem finanziellem und bautechnischem Aufwand verbunden ist. Schließlich soll eine möglichst wirtschaftliche Energieerzeugung erreicht werden.

Die Wirtschaftlichkeit einer Fotovoltaikanlage wird auch und gerade durch eine optimale Besteuerung der Anlage erreicht. Mögliche Steuervorteile federn die finanziellen Aufwendungen ab und lassen den „break-even“ (die Gewinnschwelle) des Sonnenstroms früher erreichen.

Dieses Werk führt den Leser behutsam in die Grundlagen des Steuerrechts und den Umgang mit dem Finanzamt ein. Denn durch die Anschaffung einer Fotovoltaikanlage wird der Status eines „Unternehmers“ bzw. eines Gewerbetreibenden erlangt. Damit sind neue Pflichten verbunden; zugleich eröffnen sich aber auch zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten, die einem „normalen“ Steuerzahler nicht zur Verfügung stehen.

Der Aufbau des Buches orientiert sich am zeitlichen Ablauf: von der Planung bis zur Verwirklichung, von den ersten steuerlichen Vorfragen bis zur jährlichen Abrechnung mit dem Finanzamt. Es werden mögliche Optionen und weitere Aspekte dargelegt, mit denen sich eine Optimierung der Besteuerung einer Fotovoltaikanlage erreichen lassen.

In möglichst lockerem Stil wird der Leser in die Steuerwelt eingeführt. Dabei wird auf bisher nur rudimentär vorhandene Steuerkenntnisse abgestellt und das erforderliche steuerliche Wissen Schritt für Schritt aufgebaut. Das einschlägige Fachvokabular wird bewusst zurückhaltend verwendet, ohne es aber völlig zu vermeiden. Denn nichts wäre schlimmer, als mangels Kenntnis der Fachsprache letztlich in der Steuerwelt nicht kommunizieren zu können. Viele Missverständnisse zwischen Finanzamt und Steuerzahler sind auf die fehlende „gemeinsame Sprache“ zurückzuführen.

Das Werk ist auch für fortgeschrittene Leser von Interesse, die erstmals in die unternehmerische Sphäre eintauchen. Selbst für Angehörige der steuerberatenden Berufe bietet es eine gute Grundlage, wenn es darum geht, das erforderliche Grundwissen dem Betreiber einer Fotovoltaikanlage möglichst einfach zu vermitteln.

Plochingen, Deutschland
September 2022

Jürgen K. Wittlinger

Inhaltsverzeichnis

- 1 Von der Sonne zum Strom** 1
 - 1.1 Begriff 1
 - 1.2 Ökologie. 2
 - 1.3 Historie. 4
 - 1.4 Physik. 5
 - 1.4.1 Wie funktioniert Fotovoltaik? 6
 - 1.4.2 Unterschiedliche Systeme 10
 - 1.4.3 Einflussfaktoren für die Stromerzeugung 11
 - 1.5 Planen und Errichten 14
 - 1.5.1 Fachgerechte Planung 15
 - 1.5.2 Fachgerechte Installation 18
 - 1.6 Laufender Betrieb 20
 - 1.6.1 Wartung 20
 - 1.6.2 Versicherung 22
 - Literatur. 22
- 2 Förderung des Solarstroms** 25
 - 2.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). 25
 - 2.1.1 Ziele 25
 - 2.1.2 Grundprinzip 26
 - 2.1.3 Netzeinspeisung 27
 - 2.1.4 Eigenverbrauch 28
 - 2.1.5 EEG-Umlagepflicht 30
 - 2.1.6 Marktintegrationsmodell 30
 - 2.1.7 Förderungssätze 31
 - 2.2 KfW-Darlehen 37
 - 2.2.1 Wer kann einen Antrag stellen? 37
 - 2.2.2 Welche Anlagen werden gefördert? 38
 - 2.2.3 Wie hoch kann ein Darlehen sein? 38

2.2.4	Welche Laufzeit hat ein KfW-Darlehen?	38
2.2.5	Zu welchen Konditionen gibt es die Darlehen?	38
2.2.6	Was ist bei der Antragstellung zu beachten?	39
2.2.7	Wie erfolgt die Auszahlung?	39
2.2.8	Welche Sicherheiten sind erforderlich?	39
2.2.9	Wie ist das Darlehen zu tilgen?	39
2.3	BAFA	40
2.4	Weitere Fördertöpfe	40
2.4.1	Bundesländer	40
2.4.2	Städte und Gemeinden	41
2.4.3	Energieversorger	41
2.4.4	Banken	41
	Literatur.	42
3	Wirtschaftlichkeit	43
3.1	Grundlagen für die Wirtschaftlichkeit	43
3.1.1	Welche Faktoren sind maßgebend?	43
3.1.2	Speicher	46
3.2	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	47
3.3	Ein Musterfall	48
3.4	Ausblick	52
	Literatur.	53
4	Steuerrecht	55
4.1	Formalitäten	56
4.1.1	Gewerbeanmeldung	56
4.1.2	Finanzamt.	57
4.1.3	Steuernummer	58
4.1.4	Fragebogen.	58
4.2	Umsatzsteuer	59
4.2.1	Benötigte Steuernummer	60
4.2.2	Unternehmer	61
4.2.3	Sonderstellung Kleinunternehmer	65
4.2.4	Unternehmen	68
4.2.5	Unternehmensvermögen	69
4.2.6	Umsatz	77
4.2.7	Steuerpflicht.	81
4.2.8	Bemessungsgrundlage	81
4.2.9	Soll- oder Ist-Versteuerung	86
4.2.10	Umsatzsteuer-Voranmeldung	87
4.2.11	Technik.	90
4.2.12	Umsatzsteuer-Jahreserklärungen	90
4.2.13	Vorsteuerabzug	91

4.2.14	Nachweise, Belege	99
4.2.15	Wann liegt eine Leistung für das Unternehmen vor?	99
4.2.16	Wann entsteht der Vorsteueranspruch?	103
4.2.17	Was geschieht bei einer Entgeltsänderung?	104
4.2.18	Einfuhrumsatzsteuer als Vorsteuer	104
4.2.19	Vorsteuer aus innergemeinschaftlichem Erwerb	105
4.2.20	Vorsteuerausschluss	106
4.2.21	Aufteilung der Vorsteuer	110
4.2.22	Vorsteuerberichtigung	111
4.2.23	Umkehr der Steuerschuldnerschaft	113
4.2.24	Batteriespeicher und Wallbox	115
4.2.25	Ein Ausblick – aktuelle Gesetzgebung	117
4.2.26	Am Ziel mit der Umsatzsteuer	118
4.3	Einkommensteuer	119
4.3.1	Grundlagen	119
4.3.2	Zu versteuerndes Einkommen	120
4.3.3	Steuerfestsetzung	120
4.3.4	Einkünfte aus Gewerbebetrieb	121
4.3.5	Gewinnermittlung	125
4.3.6	Betriebsvermögen	128
4.3.7	Wann sind Erträge oder Aufwendungen zu erfassen?	132
4.3.8	Betriebseinnahmen	134
4.3.9	Betriebsausgaben	137
4.3.10	Arbeitszimmer	148
4.3.11	Abschließendes Beispiel	148
4.3.12	Rechtsprechung	150
4.3.13	Batteriespeicher, Wallbox & Co.	153
4.3.14	Liebhaberei	156
4.3.15	Ein Ausblick – aktuelle Gesetzgebung	159
4.4	Gewerbsteuer	161
4.4.1	Grundlagen	162
4.4.2	Bemessungsgrundlage	162
4.4.3	Hinzurechnungen	163
4.4.4	Kürzungen	163
4.4.5	Steuerermäßigung	164
4.4.6	Ein oder zwei Betriebe?	164
4.5	Weitere Steuerarten	166
4.5.1	Bauabzugssteuer	166
4.5.2	Grunderwerbsteuer	169
4.5.3	Lohnsteuer	171
	Weiterführende Literatur	175

5 Strategien	177
5.1 Investitionszulage	177
5.1.1 Gesetzliche Grundlagen	177
5.1.2 Eingeschränkte Förderung	178
5.1.3 Begünstigte Investition	178
5.1.4 Fotovoltaik	179
5.1.5 Weitere Voraussetzungen	180
5.2 Haushaltsnahe Steuerermäßigung	181
5.3 Gemeinschaftsanlagen	182
5.3.1 Rechtsformen	183
5.3.2 GbR	183
5.3.3 Abfärbung	183
5.4 Fremdes Dach	185
5.4.1 Rechtliche Grundlagen	185
5.4.2 Wirtschaftliche Grundlagen	185
5.4.3 Rechtliche Grundlagen	186
5.4.4 Tatsächliche Grundlagen	187
5.4.5 Steuerliche Folgen	187
5.4.6 Leasing	188
5.4.7 Verpachtung/Rückverpachtung	189
5.5 Probleme aus der Praxis	189
5.5.1 Rechtliche Problemfelder	190
5.5.2 Sachliche Problemfelder	190
5.6 Weitere rechtliche Tipps	192
5.6.1 Krankenversicherung	192
5.6.2 Rentenzahlungen	192
Literatur	193
6 Anlagen	195
6.1 Anlage 1: Förderung für ältere Anlagen	195
6.2 Checkliste	213
Literatur	214
Appendix A. Anhang	215
Stichwortverzeichnis	217



1.1 Begriff

Der Begriff „Photovoltaik“ setzt sich zusammen aus

- „Photos“ – dem griechischen Wort für Licht und
- „Volta“ – nach Alessandro Volta, dem Pionier der Elektrotechnik.

In diesem Werk wird die Schreibweise „Fotovoltaik“ bevorzugt. Seit der letzten Rechtschreibreform ist „Fotovoltaik“ die gängige Schreibweise, „Photovoltaik“ bzw. die Abkürzung „PV“ und PV-Anlage ist aber als Nebenform weiterhin zulässig und eine derzeit noch gebräuchliche Variante. Beides meint jedoch dasselbe, nämlich die direkte Umwandlung von Sonnenenergie mittels Solarzellen in elektrischen Strom.

Tipp

Lassen Sie sich nicht irritieren: Anstelle des Begriffs „Photovoltaikanlage“ werden in den Medien gelegentlich auch Bezeichnungen wie Solarmodul, Solarzelle, PV-Modul, etc. verwendet. Gemeint ist meistens das Gleiche – die Fotovoltaik, also das Erzeugen von Strom aus der Sonnenenergie.

Die Fotovoltaik ist jedoch nur ein Teilbereich der Solartechnik. Der andere Kernbereich der Solartechnik ist die **Solarthermie**. Gemeinsam ist beiden Nutzungsformen, dass sie auf die Kraft der Sonne zurückgreifen. Dennoch sollten beide Formen unterschieden und nicht verwechselt werden:

- Fotovoltaik – es wird Strom erzeugt,
- Solarthermie – es wird Wärme erzeugt.

Die Solarthermie nutzt die Sonneneinstrahlung nicht zur Gewinnung von elektrischem Strom, sondern es wird direkt die Wärmestrahlung der Sonne genutzt. Eine Solarthermieanlage unterstützt oder ersetzt die Heizungsanlage bei der Erwärmung des Trink- bzw. Heizungswassers. Die Thermiekollektoren auf dem Dach sehen auf den ersten Blick aus wie Solarkollektoren. Doch diese Kollektoren werden von einer Flüssigkeit durchströmt, welche die Wärme aufnimmt. Ein Wärmetauscher entzieht diese Wärme, sie gelangt in einen Speicher. Das abgekühlte Wasser strömt wieder zurück in den Kollektor; der Kreislauf beginnt erneut.

1.2 Ökologie

Die Sonnenenergie besteht aus Licht und Wärme. Zusammengenommen sendet die Sonne fast 9000-mal mehr Energie zur Erde als alle Menschen an Primärenergie benötigen. Oder plastischer gesagt – dieser riesige „Fusionsreaktor Sonne“ sendet in nur einer Stunde so viel Energie zur Erde wie alle Bewohner unseres Planeten in einem Jahr verbrauchen. Und das trotz manchmal verregener Sommermonate und der dunklen, sonnenarmen Winterzeit. In konkreten Zahlen stellt sich dies wie folgt dar:

- Die gesamte Menschheit benötigt als Energieleistung derzeit ca. 17 Terawatt.
- Die Sonneneinstrahlung auf die Erde liegt dagegen bei 150.000 Terawatt.

Dabei wandelt die Sonne in jeder Sekunde rund 650 Mio. Tonnen Wasserstoff zu Helium um (vgl. Schmitz und Volkmann [2022](#)). Nach irdischen Maßstäben gerechnet ist das Potenzial der Sonne unerschöpflich. Die Sonne wird weitere 4 Mrd. Jahre ihre Energie zur Erde aussenden.

Der sog. Lichtenergieeintrag durch die Sonne kann aufgefangen und in Elektrizität umgewandelt werden. Und das unter ökologisch sehr guten Bedingungen. Denn der wesentliche Vorteil dabei ist, dass dies ohne Nebenprodukte – insbesondere ohne Abgase wie Kohlendioxid (CO_2) – möglich ist. Richtig ist aber auch, dass für die Produktion einer Fotovoltaikanlage eine große Menge Energie benötigt wird und damit zunächst ein zusätzlicher CO_2 -Ausstoß verbunden ist. Doch bereits nach 3–4 Jahren ist die Energiebilanz wieder positiv, da die mit der Anlage erzeugte Energie den Energiebedarf für deren Herstellung übersteigt. Fortan wird Energie erzeugt, ohne dass dies die Umwelt belastet.

Erstmals in der Geschichte war 2011 in Deutschland mehr Energiekapazität durch Solarkraftwerke am Netz als durch Kernkraftwerke. Einer Gesamtnennleistung von ca. 15 Gigawatt aus Kernkraft standen ca. 17 Gigawatt Nennleistung aus Fotovoltaik gegenüber. Zwar war dies vor allem bedingt durch das Abschalten der älteren Atomreaktoren in 2011. Es zeigt jedoch auch die bereits ab 2011 recht verbreitete Nutzung der Sonnenkraft im Land und die beträchtliche damals bereits daraus erzeugte Strommenge.

Doch dieser Vergleich hinkt etwas, da er auf der Nennleistung beruht. Während ein Kernkraftwerk oder ein anderer Kraftwerkstyp (Kohle, Gas, etc.) nahezu die vorgesehene Nennleistung auch im Dauerbetrieb erreicht, ist dies bei der Fotovoltaik gerade nicht der Fall. Wolken, Nebel und Regen, und nicht zuletzt die Nachtstunden reduzieren die tatsächliche Leistung aller Fotovoltaikanlagen ganz erheblich. Diese stark schwankenden Strahlungsmengen erschweren die Verbreitung und den wirtschaftlichen Einsatz der Fotovoltaik. Die wetterbedingten Schwankungen sind kaum vorhersehbar. Doch nicht nur die Tageszeit bedingte Sonneneinstrahlung differiert ganz beträchtlich, auch die Jahreszeit bedingte Sonneneinstrahlung weist einen enormen Unterschied auf. So erbringt eine Fotovoltaikanlage bei sonst gleichen Bedingungen im Monat Juli gegenüber dem Dezember einen bis zu 15× höheren Ertrag.

Deutlich zum Positiven verändert haben sich hingegen die Investitionskosten für eine PV-Anlage. War noch vor ein paar Jahren eine fotovoltaische Stromerzeugung angesichts der Investitionskosten für eine Anlage deutlich teurer als eine Produktion in konventionellen Kraftwerken, so wurde die Differenz der Investitionssummen immer geringer und ist mittlerweile in etwa ausgeglichen. Und spätestens wenn man in die Berechnung auch noch die enormen bzw. nur schwer kalkulierbaren Folge- und Langzeitkosten anderer Erzeugungsarten (speziell der Kernkraft) mit einbezieht, ist eine Fotovoltaikanlage heute ein gleichwertiger Mitspieler auf dem Energiemarkt.

Dennoch kann derzeit die Fotovoltaik nur ein Baustein im gesamten Energiemix sein. Dies spiegelt sich auch in folgendem Zahlenwerk wider: Von der gesamten in Deutschland erzeugten Strommenge des Jahres 2021 stammen ca. 9,1 % aus der Fotovoltaik, der Anteil aller erneuerbaren Energien zusammen lag in 2021 bei 42 %. Problematisch ist nach wie vor die Schwankungsbreite der Fotovoltaik: Zwar ist diese mittlerweile in der Lage fast 100 % des Stromverbrauchs an einem sonnigen Sommer-Sonntag abzudecken, doch bereits an einem sonnigen Werktag sind dies nur 48 %, an einem regen-trüben Tag hingegen 0 %. So erklärt sich auch, dass der Anteil der Fotovoltaik bezogen auf die gesamte Energieerzeugung – insbesondere Strom und Wärme – trotz der erheblicher installierter Nennleistung bei nur ca. 3 % immer noch relativ gering ist.

Erfreulich ist hingegen ein Blick auf Details. In manchen Städten werden mittlerweile schon 70 % des benötigten Stroms durch Fotovoltaikanlagen erzeugt. Für das gesamte Bundesland Bayern sind dies bereits 17 %. Auch wenn das Wachstum des Solarmarkts nicht mehr ganz so stürmisch verläuft wie noch vor 5–10 Jahren, ist die Zunahme des aus der Fotovoltaik erzeugten Stroms an der Gesamtproduktion doch nachhaltig und eindeutig. Die oben genannten noch eher bescheidenen Zahlen sind damit nur eine Momentaufnahme.

Der sog. Zubau, also die Gesamtleistung der neu ans Netz gegangenen Solarstromanlagen, hatte sich in Deutschland in nur wenigen Jahren jeweils verdoppelt. Doch in den Jahren 2011 bis 2018 kam es erstmals zu teils stagnierenden und sodann nur noch gemäßigt ansteigenden Zubauraten. Dieser Rücksetzer war bedingt durch eine Kürzung der staatlichen Förderung, die stetig angepasst und damit auf verantwortbare Werte reduziert wird. Das hat sich aus mehreren Gründen in den letzten Jahren wieder erfreulicher entwickelt. Und spätestens die aktuellen Überlegungen zu einer sog. Solardachpflicht sollten einen neuen Boom auslösen.

Der größte Solarmarkt der Welt ist Deutschland; hier sind derzeit rund 27 % aller Anlagen installiert; 2010 lag der deutsche Anteil noch bei über 50 %. Anders dagegen die Seite der Produktion: Zum Jahresende 2021 kamen rund 95 % der weltweit hergestellten Solarzellen und mehr als 90 % der Module aus dem asiatischen Raum (überwiegend aus China). Die einstmals aufstrebende deutsche Solarindustrie ist überwiegend zum Erliegen gekommen; viele Firmen mussten Insolvenz anmelden.

Doch über allem steht der wesentliche und entscheidende Vorteil einer Fotovoltaikanlage – es wird „sauberer Strom“ produziert. Bei der Stromgewinnung entsteht kein Kohlendioxid (CO₂). Und auch der Energieverbrauch für die Produktion der Anlage ist nach wenigen Jahren wieder kompensiert. Vor allem entsteht am Ende der Nutzungsdauer einer Fotovoltaikanlage kein Sondermüll; eine Anlage lässt sich praktisch vollständig recyceln.

1.3 Historie

Die Fotovoltaik nutzt den fotoelektrischen Effekt. Dieser wurde 1839 durch den französischen Physiker Alexandre Edmond Becquerel entdeckt. Er stellte fest, dass bei Beleuchtung einer Elektrolytzelle eine elektrische Spannung entsteht (vgl. Schmitz und Volkmann 2022). Diesen Zusammenhang zwischen Licht und Strom konnte er sich aber nicht erklären.

In den Folgejahren haben verschiedene Forscher den Effekt an einem Selenkristall nachvollzogen und dabei auch eine deutlich erhöhte Leitfähigkeit von Selen bei dessen Belichtung registriert.

Doch erst 1904 hat der deutsche Physiker Hallwachs mit seinen Untersuchungen des fotoelektrischen Effekts die Grundlage für eine Entwicklung einer Fotozelle gelegt – der nach ihm benannte Hallwachseffekt.

Die abschließende theoretische Herleitung blieb jedoch Albert Einstein vorbehalten. Dieser hat das zugrunde liegende Prinzip 1905 mit seiner Lichtquantenhypothese wissenschaftlich erklärt und dafür 1921 den Nobelpreis für Physik erhalten.

Erst nach vielen weiteren Entwicklungsschritten gelang es 1954 Wissenschaftlern in den USA die erste Siliziumzelle mit einem passablen Wirkungsgrad von 4 % zu produzieren.

Damit eröffnete sich die wirtschaftliche Nutzung der Fotovoltaik – sofern diese auf die Nutzung durch den Menschen bezogen wird. Denn das Pflanzenreich nutzt die Energie der Sonne von Anbeginn im Rahmen der Fotosynthese zur Gewinnung von Energie für das Pflanzenwachstum.

Die erste bedeutende Verwendung fand 1955 zur Stromversorgung von Telefonverstärkern statt. Doch der eigentliche Beginn der Nutzung des Sonnenstroms lag im Weltraum. Dort wurde Ende der 1950er-Jahre mit Sonnenkollektoren Energie für den Betrieb der Satelliten gewonnen. 1958 startete der amerikanische Satellit „Vanguard 1“, der immerhin 6 Jahre lang seinen Sendebetrieb dank Solarzellenenergie aufrechterhalten konnte (vgl.

Schmitz und Volkmann 2022). Die Nachfrage aus der Raumfahrt trug ganz wesentlich zu den entscheidenden Fortschritten in der Entwicklung von Fotovoltaikzellen bei.

Auf der Erde begann die Nutzung der Fotovoltaik zur Stromerzeugung erst später. Ein Auslöser waren die Energiekrisen in den 1970er-Jahren, insbesondere die Ölkrise 1973, sowie das gestiegene Umweltbewusstsein in der Bevölkerung. Dadurch kam es verstärkt zur Nutzung und vor allem zu einer technischen Weiterentwicklung dieser Energiewandler. Solarzellen finden seither ihre Anwendung auf Dachflächen, bei Parkscheinautomaten, in Taschenrechnern, an Schallschutzwänden und auf Freiflächen.

1982 ging das erste Solarkraftwerk mit einer Leistung von 1 Megawatt in Kalifornien in Betrieb. 1985 folgte ebenfalls in Kalifornien eine Anlage mit bereits 6,5 Megawatt. Die Nutzung wurde auch durch eine verstärkte staatliche Förderung der Fotovoltaik begünstigt. Für Deutschland ist hierzu das 1000-Dächer-Programm in 1990, das Sonne-in-der-Schule-Programm und das sehr erfolgreiche 100.000-Dächer-Programm in den Jahren 2001–2003 zu nennen (vgl. Schmitz und Volkmann 2022).

Der Durchbruch der Fotovoltaik in die Breite wurde ab 1991 durch die Förderung im Rahmen des deutschen Stromeinspeisungsgesetzes unterstützt. Dies verpflichtete die Energieversorger, den Solarstrom für 16,61 Pfennig je kWh abzunehmen. Diese erste Förderung wurde durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ab 2000 weiter ausgebaut und in größerem Umfang durch finanzielle Anreize gefördert.

Eine weitere positive Zwischenetappe konnte dann in 2011 gezogen werden: In Deutschland überstieg die Energiekapazität der Solarkraftwerke erstmals das der Kernkraftwerke. Hauptursache dafür war jedoch das Abschalten der älteren Atomreaktoren in Deutschland, mittelbar ausgelöst durch die Katastrophe in Fukushima in der Woche ab dem 11.03.2011. Dennoch zeigt sich anhand dieser Werte die mittlerweile große Verbreitung der Fotovoltaik vor allem in Deutschland (vgl. BSW-Solar 2022).

1.4 Physik

Die Sonne sendet seit Milliarden von Jahren ihre Energie zur Erde und wird es weitere 4 Mrd. Jahre unablässig tun. Die Sonnenenergie ist enorm. Selbst das nicht gerade in Äquatornähe gelegene Deutschland erreicht Sonnenenergie mit einer Leistung von 900–1200 kWh je Quadratmeter. Oder plastischer gesagt, mit einem Energiegehalt, der 90–120 Litern Heizöl entspricht. Damit kann bereits eine ca. 30 qm große Fotovoltaikanlage den Stromverbrauch eines durchschnittlichen Haushalts abdecken.

Es gibt innerhalb Deutschlands bezogen auf die erzielbare Sonnenenergie gewisse regionale Unterschiede, doch sind diese nicht so gravierend. So kann im süddeutschen Raum mit einer Anlage ein Jahreswert von etwa 1100 kWh/kWp erzielt werden. Hingegen sind dies in Norddeutschland selbst bei optimaler Ausrichtung und Neigung der Anlage nur etwa 900 kWh/kWp. Doch auch dies ist ein Wert, der einen wirtschaftlichen Betrieb einer Fotovoltaikanlage ermöglicht.

Die obigen Daten bringen aber den ersten Erläuterungsbedarf mit sich

- **kWh** steht für Kilowatt mal Stunde,
- **kWp** für Kilowatt Peak.

Kilowatt Peak (kW peak) steht für die mögliche Spitzenleistung (engl. Peak = Spitze). Der Wert gibt die Leistung an, die ein Modul bei voller Sonneneinstrahlung erreicht. Dabei wird als maßgebende Standortbedingung von einem Kilowatt je Quadratmeter ausgegangen; dies ist ein Wert der in Deutschland an einem Sommertag in den Mittagsstunden erreicht wird. 1 kWp entspricht ca. 1000 kWh Stromerzeugung im Jahr.

Diese Peak-Leistung wird meist auch als „Nennwert“ bzw. „Nennleistung“ bezeichnet. Da weder die Sonne ständig voll scheint, noch immer Sommer ist, handelt es sich dabei um einen nicht ständig realisierbaren Wert. Zudem muss beachtet werden, dass allein durch die Erwärmung der Solarzellen bis zu 25 % weniger Leistungsausbeute möglich sein kann.

1.4.1 Wie funktioniert Fotovoltaik?

Fotovoltaik ist die direkte Umwandlung des Sonnenlichts in elektrischen Strom. Die Sonne gibt ihre Energie nicht nur als Licht- und Wärmestrahlung, sondern auch als elektromagnetische Strahlen ab. Der Wellenlängenbereich dieser Strahlen reicht vom kurzwelligen und damit nicht sichtbaren Ultraviolett (UV-Licht), über das sichtbare Licht bis hin zur langwelligen Wärmestrahlung im infraroten Bereich.

Für die Umwandlung der elektromagnetischen Strahlen in Strom wird der sog. fotovoltaische bzw. **fotoelektrische Effekt** genutzt. Die Photonen treffen in einer Solarzelle auf eine speziell behandelte Schicht – meist aus einem auf Silizium basierenden Halbleitermaterial (Fotozelle) – und bringen dort Elektronen in Fluss. Dadurch entsteht ein elektrischer Stromfluss.

Bei einer Fotovoltaikanlage bilden viele Solarzellen zusammen ein Solarmodul – meist in der Größe $1 \times 0,5$ m. Mehrere Module verbunden bilden die Fotovoltaikanlage.

Es gibt verschiedene Zelltypen (vgl. Schmitz und Volkmann 2022). Diese unterscheiden sich nach der Art der Materialien und Konzepte, der Form, Farbe und der Leistung. Im Wesentlichen wird unterschieden in:

- Kristalline Zellen (monokristallin, polykristallin). Diese ist die derzeit am häufigsten anzutreffende Form.
- Dünnschichtzellen (amorphes Silizium, Cadmium-Tellurit, Kupfer-Indium-Diselenid), welche aktuell eher die Ausnahme sind.

Dünnschichtmodule haben ein besseres Schwachlichtverhalten und bringen damit einen besseren Ertrag – rund 78 % mehr Spitzenleistung bei ungünstigen Lichtverhältnissen. Insgesamt liegt die Stromausbeute aber um ca. 12 % hinter den kristallinen Zelltypen

zurück. Der Vorteil der Dünnschichtmodule besteht in einem geringeren Material- und Energieeinsatz (vgl. Frentrup 2008). Auch sind nahezu alle Modulformate darstellbar. Dem stehen die höheren Kosten gegenüber.

Die Anlage erzeugt Gleichstrom, der durch einen sog. Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt wird. Als Wechselstrom kann er in das öffentliche Netz eingespeist oder im Haushalt direkt verbraucht werden.

Fotovoltaikanlagen sind mittlerweile technisch sehr zuverlässig und können auch in ihrer Einsatzdauer mit konventionellen Heiz- bzw. Stromerzeugungsanlagen Schritt halten. Nachdem anfangs mit einer Nutzungsdauer von 20 Jahren kalkuliert wurde, wird heute eine wirtschaftliche Nutzungsdauer von 25–30 Jahren, teilweise bereits auch von bis zu 35 Jahren zugrunde gelegt.

1.4.1.1 Komponenten einer Solaranlage

Eine an das allgemeine Stromnetz angeschlossene Fotovoltaikanlage besteht aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten. Diese werden in alphabetischer Reihenfolge nachfolgend genannt und in ihrer Funktionsweise kurz erläutert.

Akkumulator

Für Inselanlagen (siehe nächster Abschn. 1.4.2) ist die Speicherung der erzeugten Energie ganz wesentlich. Dies erfolgt mittels einer Batterie – dem Akkumulator – der die Zwischenlagerung des Stroms bis zu dessen Verbrauch übernimmt. Diese oder andere Formen der Speicherung der erzeugten Energie werden für die weitere Verbreitung und Nutzung von Fotovoltaikanlagen jeglicher Art von sehr großer Bedeutung sein! Hier liegt daher auch ein Schwerpunkt der aktuellen Forschung (siehe dazu auch: „Speicher“).

Ausrichtung

Eine Fotovoltaikanlage ist idealerweise in Richtung Süden mit einer Neigung von 30 Grad zur Sonne ausgerichtet. Diese Ausrichtung ermöglicht den höchsten Ertrag der Anlage. Nicht immer weist eine Dachfläche diese optimale Ausrichtung auf, jedoch lässt sich dies durch verschiedenartige Aufstellungen bzw. Gestelle meist problemlos nachbessern. Dazu bedient sich der Fachmann sog. dachparalleler Gestelle für Schrägdächer oder aufgeständerter Gestelle für Flachdächer.

Freischalter

Diese abgeschlossene Einrichtung einer Anlage wird von den Energieversorgern bzw. Netzbetreibern gefordert und ist grundsätzlich nur diesen zugänglich. Sie trennt den Wechselrichter vom Netz in das eingespeist wird.

Gleichstromleitung

Dies ist die Hauptleitung. Sie verbindet den Generatoranschlusskasten, in welchem alle Fotovoltaikmodule zusammengeschaltet werden (siehe: Verschaltung) mit dem Wechselrichter.

Schalteinrichtungen

Es gibt gleichstromseitige (vor dem Wechselrichter) und wechselstromseitige Schalteinrichtungen (nach dem Wechselrichter). Diese dienen jeweils der Notabschaltung der Anlage, wodurch diese spannungsfrei gestellt wird.

Silizium

Silizium ist ein Halbleitermaterial mit Elektronen, die in einer Kristallstruktur verhältnismäßig gut an die Atomkerne gebunden sind. Zwar ist Silizium das zweithäufigste Element der Erdkruste, es kommt aber nicht in reiner Form vor. Vielmehr muss es aufwändig aus anderen Verbindungen – insbesondere aus Sand, Quarz und Bergkristall – herausgelöst werden. Die Siliziumzellen haben meist eine Größe von 10×10 cm, neuerdings auch $12,5 \times 12,5$ cm oder 15×15 cm. Sie sind mit einer durchsichtigen Antireflexschicht überzogen, die dem Schutz der Zelle dient und Reflexionsverluste vermindert.

Solarzellen

Solarzellen – oder auch fotovoltaische Zellen genannt – sind elektrische Bauelemente, welche die im Licht enthaltene Strahlungsenergie in elektrische Energie umwandeln. Im Regelfall bestehen Solarzellen aus Silizium, das in zwei verschiedenen Schichten angeordnet ist. Dies sind ein positiver Ladungsträgerüberschuss – die p-leitende Halbleiterschicht – und ein negativer Ladungsträgerüberschuss – die n-leitende Halbleiterschicht. Im Grenzbereich dieser beiden Schichten entsteht ein sog. p-n-Übergang, an welchem sich ein elektrisches Feld aufbaut (vgl. Frentrop 2008).

Zwischen diesen beiden Siliziumschichten liegt eine Spannung, das elektrische Feld. Strahlt Licht ein, werden die Elektronen durch die Photonen von den Atomkernen gelöst und wandern von der unteren in die obere Schicht. Dadurch wird der untere Halbleiter zum Pluspol, der obere zum Minuspol. Werden beiden Pole mit einem Kabel verbunden, ist der Stromkreislauf geschlossen – dasselbe Prinzip wie bei einer Batterie. Damit eine höhere Leistung erzielt werden kann, werden mehrere Solarzellen zu einem Solarmodul zusammengeschlossen.

Die abgreifbare Spannung beträgt bei Silizium ca. 0,5 V. In der Praxis werden mindestens 50 Solarzellen zu einem Solarmodul zusammengefasst. Bei einem 1 qm großen Siliziummodul erreicht die Stromstärke bei maximaler Einstrahlung von rund 1000 W/qm einen Wert von ca. 2 A. je Solarmodul: Daraus lassen sich 120–140 W Strom erzeugen. Die Leistung einer Solarzelle ist zudem von der Temperatur der Zelle abhängig. Eine höhere Zelltemperatur reduziert den Wirkungsgrad, also den Grad mit dem eingestrahktes Sonnenlicht in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

Speicher

Mit einem Solarstromspeicher lässt sich der mit einer PV-Anlage erzeugte und nicht sofort verbrauchte Strom speichern. Auf den gespeicherten Strom kann dann am Abend bzw. in der Nacht zugegriffen werden. Ebenso kann daraus der Strombedarf an nachfolgenden

Regentagen gedeckt werden. Technisch handelt es sich um einen Batteriespeicher. Die Speicher werden in unterschiedlichen Größen angeboten und können so individuell nach dem jeweiligen Bedarf installiert werden. Mit einem Speicher ist es möglich, den Verbrauch des selbsterzeugten Stroms zu verdoppeln. Positiver Nebeneffekt ist, dass die Stromnetze durch die Solarstromspeicher entlastet werden.

Lassen Sie sich nicht verwirren durch die unterschiedlichen Bezeichnungen für einen Speicher – egal ob Solarstromspeicher, Solar-Akku, Solarbatterie, Fotovoltaikspeicher oder auch Fotovoltaik-Akku – gemeint ist immer das Gleiche.

In technischer Hinsicht gibt es zwei Arten von Speichern

- der Blei-Akku
- der Lithium-Ionen-Akku.

Den Blei-Akku kennen Sie von Ihrem Auto. Es ist eine ausgereifte Batterietechnologie, die Selbstentladung ist gering. Hingegen ist deren Gewicht recht hoch, sie weisen eine geringe Energiedichte auf, ihr Wirkungsgrad liegt zwischen 70 % und 80 %.

Der Lithium-Ionen-Akku hat hingegen eine sehr hohe Energiedichte, die Akkus sind kompakter, können deutlich öfter geladen und entladen werden (sog. Ladezyklen mit 2000 bei Blei und 5000 bei Lithium) und weisen auch eine höhere Entladetiefe auf. Der Wirkungsgrad liegt bei 90 %. Allerdings sind diese Akkus (derzeit noch) teurer als Blei-Akkus, auch weil sie ein Energie-Management-System benötigen. Da die Vorteile für Lithium-Ionen-Akkus jedoch klar überwiegen, werden aktuell nahezu nur noch diese verbaut.

Transformator

Aufgabe des Transformators ist es, die vom Wechselrichter eingehende Wechselspannung in eine höhere Wechselspannung umzuwandeln. Den Wechselrichter verlassen im Regelfall 240 V, das Einspeisenetz (allgemeines Stromnetz) weist hingegen eine um ein Vielfaches höhere Spannung auf.

Verschaltung

Darunter wird die leitungstechnische Verbindung der Solarmodule miteinander verstanden; diese sind verschaltet. Dies wird auch als Modulleitung bezeichnet, mit welcher die einzelnen Fotovoltaikmodule zu einem sog. Solargenerator zusammengeschaltet werden. Je nach Größe und Bedarf erfolgt dies „in Reihe“ oder „parallel“, jeweils mittels Steckverbindungen. Eine Reihenschaltung (auch Serienschaltung genannt) erreicht eine höhere Gesamtspannung, die Stromstärke bleibt gleich. Eine Parallelschaltung ermöglicht eine Spannung, die bei steigender Stromstärke überall gleich ist.

Versorgungsleitung

Diese stellt eine Verbindung zwischen dem Wechselrichter und dem Hausnetz dar.

Wechselrichter

Mit Solarzellen wird Gleichstrom erzeugt. Um die elektrische Energie in das Stromnetz einspeisen zu können, muss dieser in Wechselstrom umgewandelt werden. Diese Aufgabe nehmen Wechselrichter wahr, welche aus dem Gleichstrom einen Wechselstrom mit 230 V und 50 Hz erzeugen. Der Wechselstrom kann dann ins Stromnetz eingespeist werden, weshalb der Wechselrichter auch als Netzeinspeisegerät (NEG) bezeichnet wird (vgl. Schmitz und Volkmann 2022). Eine hohe Qualität des Wechselrichters ist besonders wichtig. Dies ist wohl auch der Grund, weshalb bei einer Fotovoltaikanlage auch heute der Wechselrichter oftmals „Made in Germany“ ist. Trotz hoher Qualität hält ein Wechselrichter meistens nur die halbe Lebensdauer einer Solaranlage durch – spätestens nach 15 Jahren wird ein Austausch erforderlich sein.

Allerdings schreitet die Forschung und Entwicklung auch im Bereich der Wechselrichter stetig voran. So gibt es mittlerweile auch Wechselrichter, die mehrere Eingänge haben, die sog. Strings. Diese „Multistring-Wechselrichter“ können mit verschiedenen Modulanzahlen und unterschiedlichen Leistungen gefahren werden. Ebenso werden Wechselrichter angeboten, bei denen eine Parallelschaltung der Module möglich ist. Unterschiedliche Leistungen, z. B. durch Verschattung, wirken sich durch die separate Verkabelung nicht negativ auf die Gesamtleistung aus.

Zähler

Die Aufgabe eines Stromzählers ist allgemein bekannt. Eine Fotovoltaikanlage verfügt über einen (häufig auch mehrere) gesonderten Zähler, der den erzeugten und ggf. auch den selbst verbrauchten Strom aufzeichnet. Neben dem üblichen Haushaltszähler ist ein Einspeisezähler erforderlich. Bei Eigenverbrauch wird der Haushaltszähler durch einen Zweirichtungszähler ersetzt, der die erzeugte abgehende und die verbrauchte fremdbezogene Energiemenge misst. Die von den Zählern gemessenen Werte sind jeweils Grundlage für die Berechnung der Vergütung für den Solarstrom, der in das Netz eingespeist worden ist. Und ja – deren Daten werden auch für die Besteuerung der Anlage herangezogen.

1.4.2 Unterschiedliche Systeme

1.4.2.1 Inselsystem

Darunter wird eine Anlage verstanden, die nur der Stromversorgung eines Gebäudes dient und nicht mit dem allgemeinen Stromnetz verbunden ist. Um dies zu ermöglichen, ist neben einer Fotovoltaikanlage auch ein Stromspeicher (Batterie) erforderlich. Daher sind Insellösungen vor allem in Entwicklungsländern oder in Staaten ohne flächendeckendes Stromnetz anzutreffen. In Deutschland sind Insellösungen die absolute Ausnahme und meist nur in abgelegenen Gegenden anzutreffend, wie z. B. auf Berghütten. Als Kleinanwendung sind Inselsysteme zur Energieversorgung von Parkscheinautomaten, Verkehrswarnzeichen oder Weidezäunen hingegen verbreitet anzutreffen.

Ein Grund für die eher nachrangige Bedeutung ist auch, dass Insellösungen mangels Anschluss an das allgemeine Stromnetz nicht unter das EEG fallen und damit für den produzierten Strom keine Einspeisevergütung gezahlt wird. Erst wenn die Produktion von Stromspeichern (Akkus) technisch nicht mehr so aufwändig und teuer ist, könnten Insellösungen im Kommen sein. Daran wird derzeit mit Nachdruck geforscht, da dies auch eine merkliche Entlastung der Netze zur Folge haben würde.

1.4.2.2 Netzsystem

Was bei einer Insellösung der Stromspeicher ist, wird bei der Netzlösung durch das allgemeine Stromnetz übernommen. Der erzeugte und nicht sofort verbrauchte Solarstrom wird in das Stromnetz eingespeist und findet irgendwo einen Verbraucher. Dies ist auf absehbare Zeit das gängigste und weltweit verbreitete System für eine Fotovoltaikanlage.

1.4.3 Einflussfaktoren für die Stromerzeugung

Die Menge des erzeugten Solarstroms ist von einer Vielzahl einzelner Einflussfaktoren abhängig. Die wesentlichen sind:

Ausrichtung

Je optimaler ein Solarmodul zur Sonne ausgerichtet ist, umso stärker ist die Sonneneinstrahlung und umso höher damit der Ertrag. Die Ausrichtung der Anlage nach Süden ist am idealsten. Noch deutlich mehr Effizienz bringen Anlagen, die mit der Sonne wandern – die sog. nachgeführten Solaranlagen. Diese sind drehbar gelagert und folgen automatisch dem Verlauf der Sonnenbahn. Die nicht optimale Ausrichtung wird in „Azimut“ gemessen. Dies bezeichnet den Winkel, um den die Anlage von einer Südausrichtung abweicht. Wäre eine Fotovoltaikanlage z. B. nach Westen ausgerichtet, würde diese einen Azimut von 90 Grad aufweisen.

Globalstrahlung

Hierunter versteht man die gesamte auf die Erde auftretende Sonnenstrahlung. Diese setzt sich aus der direkten, der diffusen und auch der reflektierten Strahlung zusammen. Je höher der Anteil der direkten Strahlung ist, desto höher liegt der Ertrag der Anlage. Dennoch sollte die diffuse Strahlung nicht unterschätzt werden; sie beträgt in Deutschland im Jahresdurchschnitt zwischen 50 % und 70 %. Daraus errechnet sich hierzulande eine Globalstrahlung von rund 1000 kWh je Quadratmeter im Jahr. Nach aktuellen Zahlen sind davon wiederum ca. 10 % nutzbar, sodass ca. 100 kWh/qm elektrischer Strom erzeugbar sind. Dies entspricht der Energiemenge von etwa 100 Litern Heizöl.

Neigung

Nicht nur die Himmelsrichtung ist für ein Solarmodul entscheidend, auch dessen Neigung sollte möglichst optimal zur Sonne sein. In Deutschland treffen bei einer Neigung der Anlage von 30 Grad die Sonnenstrahlen nahezu senkrecht auf die Solarmodule (vgl. [iMPLI 2022](#)).

Qualität

Der Stromertrag einer Fotovoltaikanlage hängt ganz entscheidend auch von der Qualität der Anlage ab. Hierbei kommt es letztlich auf jede einzelne Komponente der Gesamtanlage an. Die größten Qualitätsunterschiede gibt es neben den Wechselrichtern vor allem bei den Solarmodulen. Hier sollten Sie darauf achten, dass diese zertifiziert sind und als Zertifizierung die Kürzel IEC 61215 bzw. IEC 616146 oder neuer aufweisen.

Reihen- und Parallelschaltung

Die Reihenschaltung ermöglicht eine höhere Gesamtspannung bei gleicher Stromstärke. Dazu wird der Minuspol des einen mit dem Pluspol des nächsten Solarmoduls verbunden. Diese Schaltung ist aber anfällig für Störungen. Fällt auch nur ein Element aus oder bringt es eine schwächere Leistung, hat dies Auswirkung für die komplette Reihe. Dieser Effekt ist bekannt aus einer Lichterkette, z. B. am Weihnachtsbaum. Dies ist auch die Ursache für drastische Leistungsminderungen bei einer zeitweisen Verschattung (siehe unten).

Anders die Schaltung bei einer Parallelschaltung. Hier werden alle Pluspole und alle Minuspole miteinander verbunden. Damit entspricht die Gesamtspannung der Spannung eines Solarmoduls und die Summe der Einzelströme aller Module ergibt die Gesamtstromstärke der Anlage. Damit können einzelne Module ausfallen oder beeinträchtigt sein, ohne dass sich dies nennenswert auf die Gesamtleistung auswirkt. Folglich lässt sich mit einer Parallelschaltung gegenüber einer Reihenschaltung meist ein höherer Ertrag erzielen.

In der Praxis wird oft eine Kombination aus Reihen- und Parallelverschaltung installiert – die sog. Paarmodulverschaltung. Damit sollen die jeweiligen Vorteile genutzt und zugleich deren Nachteile ausgeklammert werden.

Strahlungsstärke

Dagegen ist die Strahlungsstärke nicht beeinflussbar. Gegen Mittag strahlt die Sonne intensiver, im Süden stärker als im Norden des Landes, im Sommer mehr als im Winter. Dies ist jeweils bedingt durch die Neigung der Erdoberfläche, wodurch die Sonnenstrahlen mehr oder weniger steil auf die Erdoberfläche treffen. Bei einer hohen Strahlungsstärke liegen auch die Erträge höher.

Verschattung

Liegt ein Teil der Fotovoltaikanlage im Schatten, sinkt deren Ertrag. Dies wird bei der Installation einer Anlage oft nicht gründlich genug bedacht. So werden häufig temporäre Teilverschattungen im Tagesverlauf übersehen, z. B. morgens oder abends bei entsprechend tieferem Sonnenstand. Letztlich führt auch eine Verschmutzung der Module zu einer gewissen Verschattung. Da dies ein so wichtiger Bereich ist, finden sich im nachfolgenden Kapitel zur Verschattung weitere umfangreiche Ausführungen.

Wirkungsgrad

Beim Wirkungsgrad ist zu unterscheiden zwischen Zellwirkungsgrad und Gesamt- bzw. Systemwirkungsgrad.