

1

Einführung

Die Versorgung unserer Industriegesellschaft mit elektrischer Energie ist einerseits unverzichtbar, bringt aber andererseits verschiedene Umwelt- und Sicherheitsprobleme mit sich. In diesem ersten Kapitel sehen wir uns daher die bisherige Energieversorgung an und lernen die erneuerbaren Energien als eine zukunftsfähige Alternative kennen. Gleichzeitig wird die Photovoltaik im Schnelldurchgang vorgestellt und ihre kurze aber erfolgreiche Geschichte betrachtet.

■ 1.1 Einleitung

In der Einleitung soll geklärt werden, warum wir uns mit Photovoltaik beschäftigen und für wen dieses Buch geeignet ist.

1.1.1 Wozu Photovoltaik?

In den vergangenen Jahren ist immer deutlicher geworden, dass die bisherige Art der Energieerzeugung nicht zukunftsfähig ist. So wird die **Endlichkeit der Ressourcen** an steigenden Preisen für Öl und Gas bereits heute spürbar. Gleichzeitig erkennen wir die ersten Auswirkungen der **Verbrennung von fossilen Energieträgern**: Das Abschmelzen von Gletschern, ein Anstieg des Meeresspiegels und eine Zunahme von Wetterextremen. Schließlich zeigte die **Atomkatastrophe in Fukushima**, dass auch die Atomenergie keinen zukunftsfähigen Weg weist: Neben der **ungelösten Endlagerfrage** sind immer weniger Menschen bereit, das **Risiko der Verstrahlung** großer Landesteile in Kauf zu nehmen.

Glücklicherweise gibt es eine **Lösung**, mit der eine nachhaltige Energieversorgung sichergestellt werden kann: Die **erneuerbaren Energien**. Diese nutzen unerschöpfliche Quellen als Grundlage der Energieversorgung und können bei geeigneter Kombination verschiedener Technologien wie Biomasse, Photovoltaik, Windkraft etc. eine Vollversorgung sicherstellen. Eine besondere Rolle im Reigen der erneuerbaren Energien spielt die **Photovoltaik**. Sie erlaubt die direkte, emissionsfreie Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie und wird aufgrund ihres großen Potentials eine **wesentliche Säule des zukünftigen Energiesystems** sein. Allerdings ist die Umstellung unserer Energieversorgung eine **gewaltige Aufgabe**, die nur mit der **Phantasie** und dem **Sachverstand von Ingenieuren und Technikern** zu meistern sein wird. Das vorliegende Buch soll dazu dienen, diesen Sachverstand für den Bereich der Photovoltaik zu vergrößern. Es geht dazu auf die Grundlagen, die Technologien, den praktischen Einsatz und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Photovoltaik ein.

1.1.2 Für wen ist dieses Buch gedacht?

Dieses Buch wendet sich in erster Linie an [Studierende der Ingenieurwissenschaften](#), die sich in das Thema Photovoltaik einarbeiten wollen. Es ist allerdings so verständlich geschrieben, dass es sich auch für [Techniker, Elektroniker und technisch interessierte Laien](#) eignet. Außerdem kann es [Ingenieuren im Beruf](#) helfen, sich in die Grundlagen und den aktuellen technischen und wirtschaftlichen Stand der Photovoltaik einzuarbeiten.

1.1.3 Aufbau des Buches

In dieser [Einführung](#) wollen wir uns zunächst mit dem [Thema Energie](#) auseinandersetzen: Was ist Energie und in welche Kategorien können wir sie einteilen? Auf dieser Grundlage betrachten wir dann die heutige Energieversorgung und die damit einher gehenden Probleme. Eine Lösung dieser Probleme stellen die erneuerbaren Energien dar, die als Nächstes in einem kurzen Überblick vorgestellt werden. Da uns in diesem Buch insbesondere die Photovoltaik interessiert, lernen wir zum Abschluss die relativ junge aber stürmische Geschichte der Photovoltaik kennen.

Das [zweite Kapitel](#) behandelt das [solare Strahlungsangebot](#). Wir lernen die Eigenheiten des Sonnenlichts kennen und untersuchen, wie die Solarstrahlung möglichst effizient genutzt werden kann. Schließlich überlegen wir im Sahara-Wunder, welche Fläche notwendig wäre, um den gesamten Weltenergiebedarf aus Photovoltaik zu decken.

Im [dritten Kapitel](#) betrachten wir die [Grundlagen der Halbleiterphysik](#). Hier geht es insbesondere um den Aufbau von Halbleitern und das Verständnis des pn-Übergangs. Außerdem wird das Phänomen der Lichtabsorption erklärt, ohne das keine Solarzelle funktionieren könnte. Wer mit der Halbleiterphysik schon vertraut ist, kann dieses Kapitel ohne weiteres überspringen.

In [Kapitel 4](#) geht es ans Eingemachte: Wir lernen [Aufbau, Wirkungsweise und Kenngrößen von Silizium-Solarzellen](#) kennen. Außerdem wird detailliert betrachtet, von welchen Parametern der Wirkungsgrad einer Solarzelle abhängt. Anhand von Weltrekordzellen sehen wir uns dann an, wie diese Erkenntnisse erfolgreich umgesetzt werden konnten.

[Kapitel 5](#) behandelt die [Zellentechnologien](#): Wie ist der Weg vom Sand über die Silizium-Solarzelle bis zum Solarmodul? Welche anderen Materialien gibt es und wie sieht der Zellaufbau in diesem Fall aus? Neben diesen Fragen betrachten wir außerdem die ökologischen Auswirkungen der Produktion von Solarzellen.

Der [Aufbau und die Eigenschaften von Solargeneratoren](#) sind die Themen von [Kapitel 6](#). Hier geht es z. B. um das optimale Verschalten von Solarmodulen, um die Auswirkungen von Verschattungen zu minimieren. Außerdem stellen wir verschiedene Anlagentypen wie Schrägdach- oder Freilandanlagen vor.

[Kapitel 7](#) betrachtet die [Systemtechnik und den Aufbau von netzgekoppelten Anlagen](#). Zu Beginn steht die Frage, wie man effizient Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Anschließend lernen wir die verschiedenen Wechselrichtertypen und deren Vor- und Nachteile kennen.

Die [Speicherung von Solarstrom](#) ist das sehr aktuelle Thema von [Kapitel 8](#). Wir lernen verschiedene Batterietypen mitsamt ihren Betriebsweisen kennen. Außerdem geht es um Systeme, mit

denen der **Eigenverbrauch** von Solarstrom im Privathaushalt oder in Gewerbebetrieben erhöht werden kann. In einem eigenen Unterkapitel werden **Inselanlagen** für den Einsatz in Entwicklungsländern betrachtet.

In **Kapitel 9** behandeln wir die **photovoltaische Messtechnik**. Neben der Erfassung solarer Strahlung geht es hier insbesondere um die Bestimmung der realen Leistung von Solarmodulen. Außerdem lernen wir moderne Methoden der Qualitätsanalyse wie Thermographie- und Elektrolumineszenz-Messtechnik kennen.

Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen werden in **Kapitel 10** behandelt. Neben der optimalen Planung und Dimensionierung von Anlagen geht es hier um Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung. Außerdem werden Methoden zur Überwachung von Anlagen vorgestellt und die Betriebsergebnisse konkreter Anlagen präsentiert.

Das **elfte Kapitel** stellt einen Ausblick auf die **Zukunft der Photovoltaik** dar. Zunächst schätzen wir ihr Stromerzeugungspotential in Deutschland ab. Daran schließt sich eine Betrachtung der Preisentwicklung der Photovoltaik und des Zusammenwirkens der verschiedenen Energien im heutigen Stromsystem an. Schließlich überlegen wir, wie das Energiesystem der Zukunft aussehen kann und welche Rolle dabei die Photovoltaik spielen wird.

Zu jedem Kapitel gibt es **Übungsaufgaben**, die helfen, den Stoff zu wiederholen und zu vertiefen. Außerdem bieten sie eine Kontrolle des eigenen Kenntnisstandes. Die **Lösungen** zu den Übungsaufgaben finden sich **im Internet** unter www.lehrbuch-photovoltaik.de

■ 1.2 Was ist Energie?

Die **Nutzung von Energie** ist für uns im Alltag **selbstverständlich**, ob beim Bedienen der Kaffeemaschine am Morgen, der Benutzung des Autos am Tag oder der Heimkehr in die warme Wohnung am Abend. Ebenso basiert die **Funktionsfähigkeit der gesamten modernen Industriegesellschaft** auf der Verfügbarkeit von Energie: Produktion und Transport von Waren, Computer gestützte Verwaltung und weltweite Kommunikation sind ohne ausreichende Versorgung mit Energie nicht denkbar.

Gleichzeitig wächst die Erkenntnis, dass die bisherige Art der **Energieversorgung** teilweise **unsicher, umweltschädlich** und **nur begrenzt verfügbar** ist.

1.2.1 Definition der Energie

Was verstehen wir nun genau unter Energie? Vielleicht hilft eine Definition der Energie aus be-rufenem Munde weiter. **Max Planck** (Begründer der Quantenphysik, 1858–1947) beantwortete die Frage folgendermaßen:

Energie ist Fähigkeit eines Systems, äußere Wirkungen (z. B. Wärme, Licht) hervorzu-bringen.

Im Bereich der Mechanik kennen wir zum Beispiel die **potentielle Energie** (oder Lageenergie) einer Masse m , die sich in einer Höhe h befindet (Bild 1.1a):

$$W_{\text{Pot}} = m \cdot g \cdot h \quad (1.1)$$

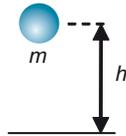
mit g : Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Fällt etwa einem Kegelbruder die über 3 kg schwere Kugel herunter, so kann das System „Ein-Meter-hohe-Kugel“ deutliche Wirkungen an seinem Fuß hervorbringen. Schleudert er stattdessen die Kugel wie geplant nach vorn, verrichtet er **Arbeit** an der Kugel. Mit dieser Arbeit wird dem System Kugel Energie zugeführt. Somit können wir ganz allgemein sagen:

Durch Zufuhr oder Abgabe von Arbeit kann die Energie eines Systems verändert werden. Anders ausgedrückt: Energie ist gespeicherte Arbeit.

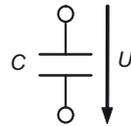
a) Potentielle Energie:

$$W_{\text{Pot}} = m \cdot g \cdot h$$



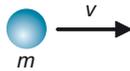
c) Kondensator-Energie:

$$W_{\text{Kon}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$



b) Kinetische Energie:

$$W_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$



d) Energie am Widerstand:

$$W_{\text{El}} = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

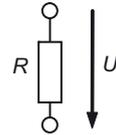


Bild 1.1 Darstellung verschiedener Energieformen

Im Fall des Kegelbruders erhält die Kugel beim Vorwärtsschleudern **kinetische Energie** W_{Kin} (oder Bewegungsenergie, siehe Bild 1.1b):

$$W_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1.2)$$

mit v : Geschwindigkeit der Kugel

Eine ähnliche Formel beschreibt in der Elektrotechnik die in einem **Kondensator** gespeicherte **Energie** W_{Kon} :

$$W_{\text{Kon}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (1.3)$$

mit C : Kapazität des Kondensators

U : Spannung am Kondensator

Liegt wiederum eine Spannung U an einem ohmschen Widerstand R an, so wird in ihm in der Zeit t eine **elektrische Arbeit** W_{El} umgesetzt (Bild 1.1d):

$$W_{\text{El}} = P \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad (1.4)$$

Die **Leistung** P gibt an, welche Arbeit in der Zeit t geleistet wird:

$$P = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} = \frac{W}{t} \quad (1.5)$$

1.2.2 Einheiten der Energie

Leider werden viele verschiedene Einheiten zur Beschreibung von Energie benutzt. Die wichtigste Beziehung lautet:

$$1 \text{ J (Joule)} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 \quad (1.6)$$

Beispiel 1.1 Anheben eines Sacks Kartoffeln

Hebt man einen Zentner Kartoffeln um einen Meter hoch, so erhält er dadurch eine Lageenergie von

$$W_{\text{Pot}} = m \cdot g \cdot h = 50 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m} = 490,5 \text{ Nm} = 490,5 \text{ Ws}$$

■

In der Elektrotechnik ist die Einheit Kilowattstunde (kWh) sehr gebräuchlich, diese ergibt sich zu:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3,6 \text{ MWs} = 3,6 \text{ MJ} \quad (1.7)$$

Da in der Energiewirtschaft oft sehr große Energiemengen behandelt werden, ist hier die Auflistung der Einheitenvorsätze zur Abkürzung von Zehnerpotenzen sinnvoll, siehe [Tabelle 1.1](#).

Tabelle 1.1 Vorsätze und Vorsatzzeichen

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor	Zahl
Kilo	k	10^3	Tausend
Mega	M	10^6	Million
Giga	G	10^9	Milliarde
Tera	T	10^{12}	Billion
Peta	P	10^{15}	Billiarde
Exa	E	10^{18}	Trillion

1.2.3 Primär-, Sekundär- und Endenergie

Energie liegt typischerweise in Form von Energieträgern (Kohle, Gas, Holz etc.) vor. Diese Art der Energie bezeichnen wir als **Primärenergie**. Um sie für praktische Anwendungen nutzen zu können, muss sie umgewandelt werden. Möchte man etwa elektrische Energie erzeugen, so wird z. B. in einem Kohlekraftwerk Steinkohle verbrannt, um damit heißen Wasserdampf zu erzeugen. Der Druck des Wasserdampfes wird wiederum genutzt, um einen Generator anzutreiben, welcher elektrische Energie am Kraftwerksausgang zur Verfügung stellt ([Bild 1.2](#)). Diese Energie bezeichnen wir als **Sekundärenergie**. Durch die beschriebene Prozesskette entstehen relativ hohe **Umwandlungsverluste**. Wird die Energie dann weiter zu den Haushalten transportiert, fallen zusätzliche Verluste in den Kabeln und Trafostationen an. Diese fassen wir unter den **Verteilungsverlusten** zusammen. Beim Endkunden kommt schließlich die **Endenergie** an.

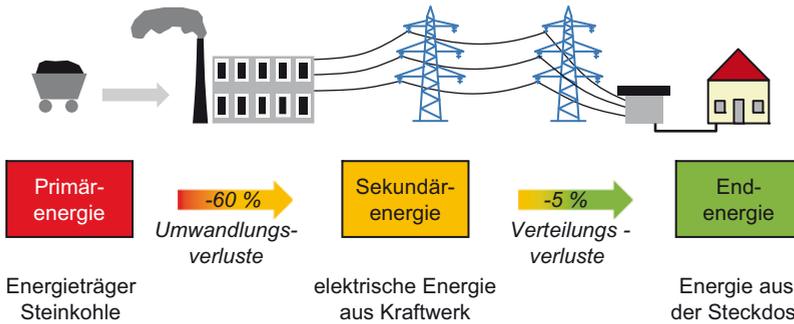


Bild 1.2 Darstellung der Energiearten am Beispiel der Steinkohleverstromung: Nur etwa ein Drittel der eingesetzten Primärenergie kommt beim Endkunden an der Steckdose an

Bei einem mit **Benzin** betriebenen Auto ist das **Erdöl** der Primärenergieträger. Durch Raffination wird es zu **Benzin** umgewandelt (Sekundärenergieträger) und anschließend zur Tankstelle gebracht. Sobald das **Benzin im Tank** ist, liegt es dort als Endenergie vor. Diese muss wiederum von der **Nutzenergie** unterschieden werden; im Fall des Autos ist das die mechanische Bewegung des Fahrzeugs. Da ein Automotor einen Wirkungsgrad von unter 30 % hat, kommt somit nur ein geringer Teil der eingesetzten Primärenergie auf der Straße an. Im Fall der elektrischen Energie wäre die Nutzenergie z. B. Licht (Lampe) oder Wärme (Kochplatten).

Um elektrische Endenergie an der Steckdose zur Verfügung zu stellen, muss die in [Bild 1.2](#) gezeigte Umwandlungs- und Verteilungskette durchlaufen werden. Da der Wirkungsgrad von konventionellen Kraftwerken mit ca. 40 % relativ klein ist, ergibt sich als **Gesamtwirkungsgrad** η_{Gesamt} bis zur Steckdose beim Endverbraucher:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Kraftwerk}} \cdot \eta_{\text{Verteilung}} \approx 0,4 \cdot 0,95 \approx 0,38 \quad (1.8)$$

Somit können wir festhalten:

Im Fall der konventionellen elektrischen Energieversorgung kommt nur etwa **ein Drittel** der eingesetzten **Primärenergie an der Steckdose** an.

Dennoch wird elektrische Energie in vielen Bereichen eingesetzt, da sie einfach zu transportieren ist und Anwendungen erlaubt, die kaum mit anderen Energieformen realisiert werden können (z. B. Computer, Motoren etc.). Gleichzeitig gibt es allerdings Nutzungen, für die der wertvolle Strom nicht verwendet werden sollte. So wird im Fall einer elektrischen Raumheizung nur ein Drittel der eingesetzten Primärenergie genutzt, während es bei einer modernen Gastherme über 90 % sind.

1.2.4 Energieinhalte verschiedener Stoffe

Um den Energiegehalt verschiedener Energieträger einschätzen zu können, sind in [Tabelle 1.2](#) die Umrechnungsfaktoren dargestellt:

Tabelle 1.2 Umrechnungsfaktoren verschiedener Energieträger [Kal20, Wik18]

Energieträger	Energiegehalt	Bemerkungen
1 kg Steinkohle	8,14 kWh	–
1 kg Rohöl	11,63 kWh	Benzin: 8,7 kWh/Liter, Diesel: 9,8 kWh/Liter
1 m ³ Erdgas	8,82 kWh	–
1 kg Holz	4,3 kWh	(bei 15 % Feuchte)

In der Energiewirtschaft wird oft die Einheit **t RÖE** verwendet. Dies bedeutet **Tonnen Rohöleinheiten** und bezieht sich auf den Umrechnungsfaktor für 1 kg Rohöl in obiger Tabelle. 1 t RÖE sind somit $1000 \text{ kg} \cdot 11,63 \text{ kWh/kg} = 11.630 \text{ kWh}$. Entsprechend erfolgt die Umrechnung von **Tonnen Steinkohleeinheiten** (t SKE) mit dem Faktor für Steinkohle aus [Tabelle 1.2](#).

Ganz grob können wir uns als **Faustregel** merken:

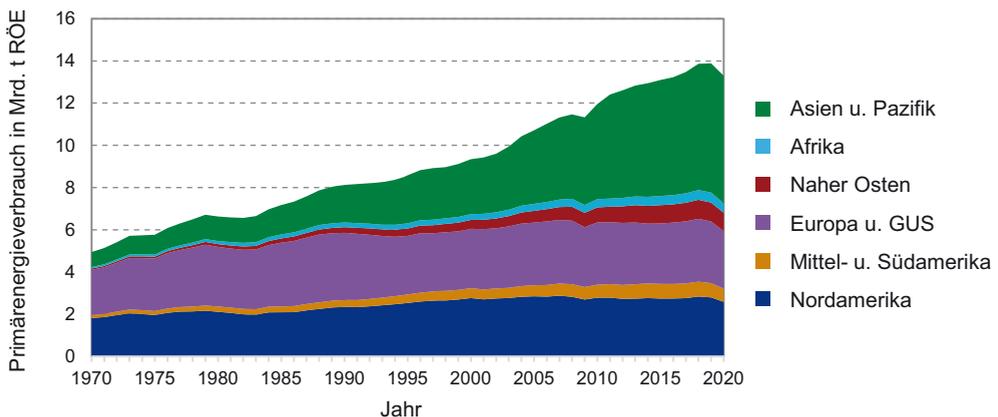
$1 \text{ m}^3 \text{ Erdgas} \approx 11 \text{ Öl} \approx 11 \text{ Benzin} \approx 1 \text{ kg Kohle} \approx 2 \text{ kg Holz} \approx 10 \text{ kWh}$

■ 1.3 Probleme der heutigen Energieversorgung

Die heutige weltweite Energieversorgung bringt eine Reihe von Problemen mit sich, deren wichtigste Aspekte wir im Folgenden vorstellen.

1.3.1 Wachsender Energiebedarf

Bild 1.3 zeigt die Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs seit 1970. Dieser hat sich im betrachteten Zeitraum fast verdreifacht; das durchschnittliche jährliche Wachstum lag

**Bild 1.3** Entwicklung des weltweiten Primärenergiebedarfs seit 1970 [www.bp.com/]

bei rund 2 %. Nachdem zunächst hauptsächlich die westlichen Industrieländer den Hauptteil ausmachten, holten die Schwellenländer, insbesondere China, in den letzten Jahren deutlich auf.

Als Grund für den Anstieg des Energiebedarfs ist zum einen die **wachsende Weltbevölkerung** zu nennen. Diese hat sich in den letzten 40 Jahren von 3,7 Mrd. auf heute knapp 8 Mrd. Menschen verdoppelt. Bis zum Jahr 2050 erwartet die UNO einen weiteren Anstieg auf ca. 10 Mrd. Menschen.

Die zweite Ursache für die beschriebene Entwicklung ist der **steigende Lebensstandard**. So liegt der **Primärenergiebedarf in Deutschland** bei ca. **45.000 kWh/Kopf**; in einem nur schwach industrialisierten Land wie Bangladesch dagegen bei nur 1500 kWh/Kopf. Bei wachsendem Wohlstand in den Entwicklungsländern wird sich der dortige Pro-Kopf-Verbrauch deutlich erhöhen. In China als sehr dynamischem Schwellenland liegt er inzwischen bei rund 30.000 kWh/Kopf. Die internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass China seinen Energiebedarf in den nächsten 25 Jahren um 75 % erhöhen wird, Indien sogar um 100 %.

Der wachsende Energiebedarf wäre grundsätzlich nicht gravierend, wenn nicht eine Reihe von Problemen damit einher ginge:

1. Verknappung der Ressourcen
2. Klimawandel
3. Gefährdung/Entsorgung

Diese werden nun etwas genauer betrachtet.

1.3.2 Verknappung der Ressourcen

Der weltweite Energiebedarf wird heute hauptsächlich durch die **fossilen Energieträger** Erdöl, Erdgas und Kohle gedeckt. In **Bild 1.4** ist zu sehen, dass sie einen Anteil von rund 81 % einnehmen, während Biomasse, Wasserkraft und neue erneuerbare Energien (Wind, Photovoltaik, Solarthermie etc.) bislang lediglich ca. 14 % erreichen.

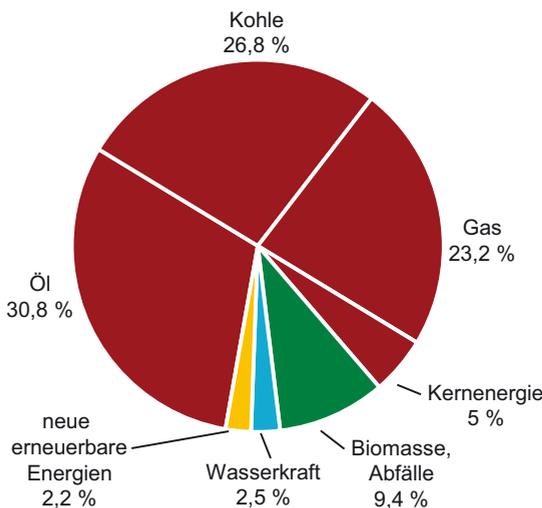


Bild 1.4 Aufteilung der weltweiten Primärenergienutzung im Jahr 2020 nach den Energieträgern [www.iea.org]

Die starke Nutzung der fossilen Quellen führt inzwischen bereits teilweise zu einer Verknappung. Geht man davon aus, dass der Weltenergiebedarf weiterhin wie bisher wachsen wird, so verringern sich die Reichweiten der fossilen Energieträger drastisch. Die Verknappung der Brennstoffe wird zu **stark steigenden Preisen** und ggf. **Verteilungskriegen** führen. Im aktuellen Jahrzehnt wurde begonnen, zusätzlich zur Ölförderung auch **Ölsande und Ölschiefer** abzubauen, um daraus Öl zu gewinnen. Insbesondere in Kanada und den USA gibt es beträchtliche Vorkommen davon. Allerdings ist für die Erzeugung des **synthetischen Erdöls** ein großer Energieeinsatz notwendig. Die Förderung im Tagebau führt darüber hinaus zur Zerstörung von zuvor intakten Ökosystemen. Im Fall von dem auch in Deutschland zeitweise diskutierten **Fracking** wird ein Gemisch aus Wasser, Sand und chemischen Zusätzen in den Boden gepresst, um damit das Gestein aufzubrechen und so das darin gebundene Gas zu erhalten. Hier besteht die Gefahr einer Vergiftung des Grundwassers.

Somit ist die Nutzung dieser **zusätzlichen fossilen Quellen** ebenfalls **keine echte Zukunftsoption**.

1.3.3 Klimawandel

Bei der Verrottung von Biomasse (Holz, Pflanzen etc.) entweicht **Kohlendioxid (CO₂)** in die Atmosphäre. Gleichzeitig wachsen Pflanzen durch Photosynthese neu und nehmen dabei CO₂ aus der Luft auf. Im Lauf der Erdgeschichte hat sich daraus ein Gleichgewicht eingestellt, das zu einer relativ konstanten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre geführt hat.

Werden Holz, Kohle, Erdgas oder Erdöl verbrannt, so entsteht ebenfalls CO₂, das in die Umgebungsluft abgegeben wird. Im Fall von Holz ist das nicht tragisch, so lange abgeholzte Wälder wieder aufgeforstet werden. Das neu wachsende **Holz bindet CO₂** aus der Luft und nutzt es zum Aufbau der entstehenden Biomasse.

Im Fall der fossilen Energieträger sieht dies allerdings anders aus. Diese bildeten sich vor Jahrmillionen aus Biomasse und werden nun innerhalb von ein bis zwei Jahrhunderten im buchstäblichen Sinne verheizt. **Bild 1.5** zeigt den Verlauf der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre in den letzten 20.000 Jahren. Offensichtlich gab es auch schon früher Schwankungen dieser Konzentration, wirklich **beunruhigend** ist allerdings der **steile Anstieg seit Beginn der Industrialisierung**. Im Jahr 2021 lag die Konzentration bei 415 ppm (parts per million), einem Wert, der seit Millionen von Jahren nicht mehr erreicht wurde.

Warum ist die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nun so bedeutend für uns? Der Grund liegt darin, dass CO₂ neben anderen Spurengasen (z. B. Methan, CH₄) über den **Treibhauseffekt** die Temperatur auf der Erde beeinflusst. Wir betrachten zur Erklärung **Bild 1.6**. Das Licht der Sonne (sichtbare und infrarote Strahlung ①) gelangt relativ ungehindert durch die Atmosphäre und wird vom Erdboden absorbiert ②. Hierdurch erwärmt sich die Erdoberfläche ③ und strahlt als sogenannter schwarzer Strahler (siehe **Kapitel 2**) Wärmestrahlung ④ ab. Diese Strahlung wird wiederum von den Spurengasen absorbiert ⑤ und als Wärme an die Umgebung abgegeben ⑥. Die **Wärmeenergie bleibt** somit zum größten Teil **in der Atmosphäre** und wird nur zu einem geringen Teil in den Weltraum zurückgeworfen.

Der Vergleich mit einem Treibhaus ist also durchaus passend: Die Atmosphäre mitsamt der Spurengase wirkt wie die Scheibe eines Treibhauses, die die Sonnenstrahlung in das Treibhaus hineinlässt, die innen entstandene Wärmestrahlung aber zurückhält. Die Folge ist eine Aufheizung des Treibhauses.

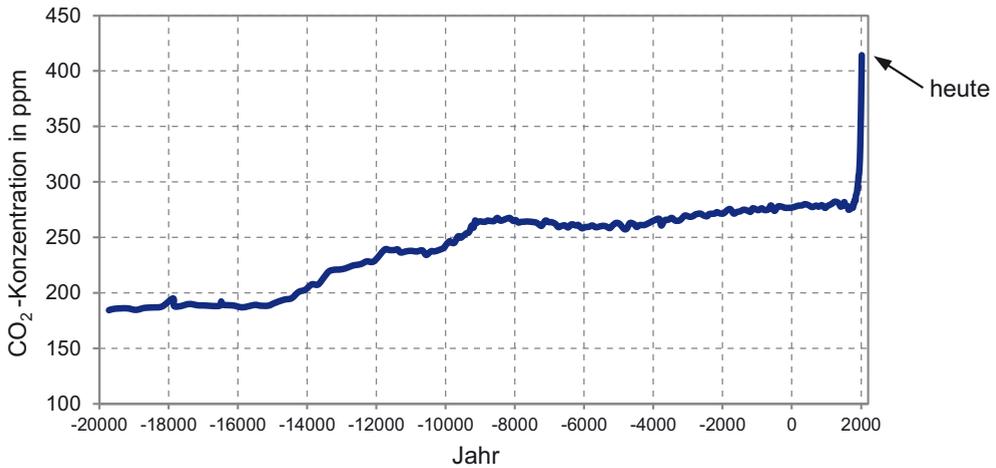


Bild 1.5 Entwicklung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre in den letzten 22.000 Jahren: Auffällig ist der steile Anstieg seit Beginn der Industrialisierung [Nef94, Mon04, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends]

Nun können wir zunächst einmal froh sein, dass es den Treibhauseffekt überhaupt gibt. Ohne ihn läge die mittlere Temperatur auf der Erde bei -18°C . Durch den natürlichen Treibhauseffekt beträgt die tatsächliche mittlere Temperatur ca. 15°C . Die durch den Menschen verursachte zusätzliche Emission von CO₂, Methan etc. führt allerdings als anthropogener Treibhauseffekt zu einer weiteren Erwärmung. Seit Beginn der Industrialisierung lag dieser Temperaturanstieg bei etwa $0,8^{\circ}\text{C}$. Der Weltklimarat erwartet, dass sich dieser bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf mindestens 2°C erhöhen wird, falls die Emissionen an Treibhausgasen nicht gebremst werden [www.ipcc.ch].

Als Folgen der Temperaturerhöhung ist bereits heute die Verkleinerung von Gletschern und des Schmelzen des Eises am Nordpolarmeer zu beobachten. Außerdem werden extreme Wetterphänomene (Hurrikans, Dürreperioden in manchen Regionen) mit dem Temperaturanstieg in Verbindung gebracht. Langfristig rechnet man bei weiter steigenden Temperaturen mit einem deutlichen Meeresspiegelanstieg und der Verschiebung von Klimazonen.

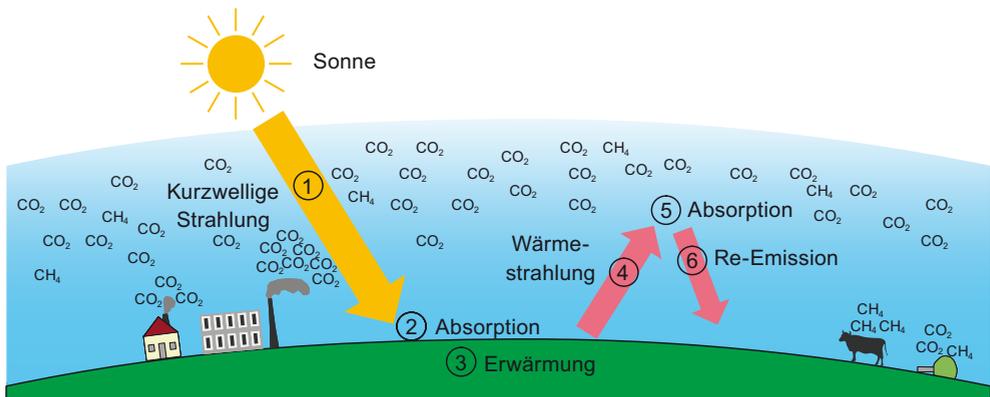


Bild 1.6 Prinzipdarstellung des Treibhauseffekts: Die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung wird von den Treibhausgasen zurückgehalten

Index

70%-Regel 283
1000-Dächer-Programm 39

A

Aachener Modell 39
Abschalteinrichtung 283
Absorption 65, 81
Absorptionskoeffizient 82, 84, 85, 94, 134
Absorptionswirkungsgrad 97
Air Mass 42, 43
Albedo 56
Amortisationszeit 335
Anlagenmonitoring 338
Anlagenvisualisierung 338
Anode 257
Antireflexbeschichtung 86, 92, 115, 117
Arbeit 22
a-Si 135
Auslegungsfaktor 235
Autarkiegrad 221, 273

B

Back-Surface-Field 96, 119, 121, 131
Bändermodell 68
Bandabstand 68, 78, 81, 106, 110, 143
Banddiagramm 77
Bandlücke 68, 70
Bandlückenwellenlänge 110, 111
Basis 92, 95, 131, 132
Bestrahlungsstärke 42, 90, 101
Betonfundament 195
Betriebskosten 334
Beweglichkeit 71, 137
Biomasse 351
Bleiakku 247, 381
Blei-Säure-Akku 247
Blindleistung 240
Blindleistungsbereitstellung 240

Bohrsches Atommodell 64
Bohrsches Postulat 64
Boost Converter 217
Brechungsindex 85
Brick 127
Buck Converter 215
Buried-Contact 117–119
Busbar 93, 117
Bypassdioden 172, 185, 307
Bypassing 260

C

Cadmium-Tellurid (CdTe) 67, 158
CCCV 259, 381
CdTe 67, 84, 158, 162, 185
CID 260, 393
Cloud Enhancements 45
c-Si 82
Current Interrupt Device 260
Current Matching 139
Czochralski-Verfahren 36, 126

D

Dangling Bonds 134, 138
DC/DC-Wandler 214
Dead Layer 94, 122
Degradation 132, 138, 140, 225, 338
Depth of Discharge 249
Diffusionslänge 80, 93, 94, 120
Diffusionsspannung 76, 77, 79, 81
Diffusionsstrom 73, 77, 107
Diffusionszelle 137
Diffusstrahlung 44, 55, 157, 300
Dioden-Kennlinie 80
direkter Halbleiter 83
Direktstrahlung 44, 45, 54, 299
DoD 249
Dotierung 32, 74, 77, 94, 118

Dreikomponentenmodell 53, 331
 Driftgeschwindigkeit 71
 Driftstrom 71
 Driftzelle 137
 DSM 371
 Dünnschichtmodule 141, 184
 Dünnschichtzelle 134, 136, 137, 143
 Dunkelkennlinien 320
 Dunkelstrom 91

E

EEG 33, 39, 334, 337
 effektive Zustandsdichte 71, 78
 EFG 129
 Eigenleitungsdichte 70, 103, 114, 234
 Eigenverbrauch 245
 Eigenverbrauchsanteil 272
 Eigenverbrauchsquote 220, 245, 273, 337
 Eigenverschattungen 330
 Einspeisemanagement 239, 240
 Einspeisevarianten 220
 Einspeisevergütung 220, 335
 Electronic Grade 125
 Elektrolumineszenz-Messtechnik 309
 Emissionsfaktor 306
 Emissionsgrad 306
 Emitter 92, 94, 118, 131, 132
 – lokaler 120
 Empfindlichkeit, spektrale 98
 Endenergie 23
 End-Ertrag 340
 Energie 21
 Energiebänder 68
 Energiemanagementsystem 274, 277, 281, 284
 Entladetiefe 249, 258, 261, 264
 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 33, 39, 334
 Ersatzschaltbild 91, 100
 Ertrag, spezifischer 35, 335
 Ertragswirkungsgrad 351
 Erzeugerzählpeilsystem 99, 169
 europäischer Wirkungsgrad 232
 EVA 132, 141, 158, 173

F

Farbstoffsolarzelle 153
 Fassadenanlagen 200
 Feldstrom 71, 137
 Fermidifferenzen 78
 Flachdachanlagen 197
 Flächennutzungsgrad 330
 Float-Zone-Verfahren 127
 Flussbettreaktor 125
 Foliensilizium 129
 Freilandanlagen 195
 Freilaufdiode 216
 Fresnel-Linsen 155
 Fresnelsche Formeln 88
 Füllfaktor 102, 114, 185

G

GaAs 37, 67, 84, 152
 GaN 233
 Generatoranschlusskasten 192, 193, 221
 Generatorverluste 340
 Gesamtwirkungsgrad 234
 Globalstrahlung 44, 60, 157, 296
 Globalstrahlungssensoren 296
 Grätzel-Zelle 153

H

Halbleiter 64, 69
 – direkter 83
 – indirekter 83
 Halbzellen 179
 Halbzellenmodul 179
 HIT-Zelle 149
 Hocheffizienzzellen 119
 Hochsetzsteller 217
 Hotspots 174, 185
 hybride Waferzellen 148

I

IBC-Zelle 120
 Idealitätsfaktor 100, 107
 indirekter Halbleiter 83
 Ingot 126, 159

integrierte Serienschaltung 141
 Interdigitated Back Contact 120
 Interkalation 257
 Interkalationsmaterial 258
 Investitionskosten 334
 Isolationsüberwachung 224
 Isolator 69
 ITO 136

J

Jahreswirkungsgrad 235

K

Kabelverluste 194, 332
 Kathode 257
 Kernschatten 328
 Klimawandel 27
 Konzentratorsystem 155, 163
 Kurzschlussstrom 101

L

Lawinendurchbruch 81, 170
 Leerlaufspannung 101
 Leistungsoptimierer 223
 Leiter 69
 Leitungsband 68
 Lichtabsorption 81
 Light Trapping 118, 119, 121, 138, 140
 lokaler Emitter 120
 Lückbetrieb 217

M

Maxon-Zelle 120
 Maximum Power Point 101
 metallurgisches Silizium 124
 mikromorph 140
 Minutenreserve 358
 Mismatching 189, 222, 229, 300, 340
 Modul-Wechselrichter 222
 Monitoring 338, 339
 monokristallin 115, 126, 127
 MOSFET 215

MPP-Tracker 219, 229
 multikristallin 127, 128

N

Nachführung 59, 157, 196
 NaS 262
 Natrium-Schwefel 262, 381
 Netzbetreiber 240, 243
 Netzkopplung 326
 Niederspannungsrichtlinie 243
 NOCT 179

O

Objektrendite 336
 Ortszeit, wahre 51, 52

P

Parallelschaltung 170
 Parallelwiderstand 105, 108, 178, 302
 Peakleistungsmessung 303
 PECVD 135
 PERC-Zelle 121, 122
 Performance Ratio 341
 PERL-Zelle 121
 Personenschutz 224
 Photodiode 90, 92, 299
 Photostrom 90, 96
 Photovoltaik 32
 PID 225, 315, 382
 pin-Zelle 136, 141
 pn-Übergang 32, 75, 76, 78, 79, 90
 polykristallin 128
 Polysilizium 124, 162
 Potentialstufe 78
 Power Purchase Agreements 210
 Powerline-Protokoll 223
 Power-to-Gas 370
 PPA 210
 Primärenergie 23, 24, 30
 Primärenergiebedarf 26, 61, 348
 Primärregelung 358
 Punktkontakt-Zelle 120, 132, 157
 Pyranometer 296

Q

Quantenwirkungsgrad 98, 122, 139

R

Rammfundament 195
 Raumladungszone 77, 90, 92, 94, 95, 106, 136
 Rayleigh-Streuung 43
 Recycling 158, 165
 Redox-Flow 265, 381
 Redoxreaktion 247, 248
 Referenz-Ertrag 339
 Reflexionsfaktor 56, 85, 88, 97, 116–118, 121
 Regelernergie 358
 Reihenschaltung 171
 Rekombination 70, 93
 Rückseitenfolie 309
 Runaway 259

S

Sabatier-Prozess 370
 Sättigungsstrom 80, 92, 103, 114
 Sahara-Wunder 61
 Schleusenspannung 81, 172
 Schrägdachanlagen 199
 Schraubfundament 195
 Schwachlichtverhalten 177, 302, 331
 Sekundärenergie 23
 Sekundärregelung 358
 Serienverschaltung, integrierte 141
 Serienwiderstand 105, 109, 130, 302
 Shockley-Gleichung 80, 91, 106
 Shutdown 259
 SiC 233
 Siebdruck 130
 Siemens-Reaktor 125
 Silizium 32, 66, 67, 124
 – metallurgisches 124
 Simulationsprogramme 331
 Sizing Ratio 235
 Smart Meter 371
 SoC 394
 Solar-Grade 125
 Solarkonstante 41, 42

Solarmodul 33, 107, 132, 133, 169
 Solarpark 195
 Solarzelle 32, 33, 36, 92, 94
 Solarzellensymbol 100
 Sonnenazimuth 52
 Sonnenbahndiagramm 52, 328
 Sonnenbahnindikator 327
 Sonnendeklination 48, 51, 53
 Sonnenhöhe 52
 Sonnenhöhenwinkel 43
 Sonnenstandsnachführung 157
 spektrale Empfindlichkeit 98
 spektraler Wirkungsgrad 110, 114
 spezifischer Ertrag 35, 335
 Staebler-Wronski-Effekt 138
 Standard-Ersatzschaltbild 105
 Standardtestbedingungen 34, 44
 Stapelfehler 316
 Stapelzelle 139, 151
 State of Charge 394
 STC 34
 Strahlungsbündelung 155
 Strang 33, 132
 String 33, 132, 186
 Stringdioden 188, 192
 String-Dunkelkennlinien 320
 String-Ribbon 130
 Stringsicherungen 188
 String-Wechselrichter 222
 Stromerzeugungspotential 350
 Substrat-Zelle 139
 Superstrat 136, 226
 Superstrat-Zelle 136, 226
 Systemverluste 340
 Systemwirkungsgrad 62, 350

T

Tandemzelle 139
 Tastgrad 216
 TCO 136
 Tedlar-Folie 132
 Temperaturabhängigkeit 103, 104
 Temperaturkoeffizient 103, 104, 178
 Temperaturverhalten 178
 Texturierung 115, 117, 118, 121, 130, 138
 theoretischer Wirkungsgrad 114, 115

Thermal Runaway 259, 263
Thermalisierungsverluste 111
Thermographie-Messtechnik 305
Tiefsetzsteller 215
Transmissionsverluste 110, 137
Treibhauseffekt 27, 28
Trichlorsilan 124
Tripelzelle 139

U

Umwandlungswirkungsgrad 231

V

Valenzband 68
Vanadium-Redox-Flow 266
Verbindungshalbleiter 67
Verbraucherzählpeilsystem 91, 176, 188
Verschattungsanalyse 327
Verschattungsverluste 117, 172, 189, 332
VisiKid 342
Volllaststunden 47, 339, 340
VRF 266

W

Wafer 128, 130, 132, 158
Waferzellen, hybride 148
wahre Ortszeit 51, 52
Watt-Peak 34
Wechselrichter 34, 223
Wechselrichterwirkungsgrad 234
Wirkleistungsbegrenzung 283
Wirkungsgrad 34, 102, 110, 127, 155, 166,
227, 230
– europäischer 232
– spektraler 110, 114
– theoretischer 114, 115

Z

Zentral-Wechselrichter 221
Zustandsdichte, effektive 71, 78
Zwei-Dioden-Ersatzschaltbild 109
Zwei-Dioden-Modell 106