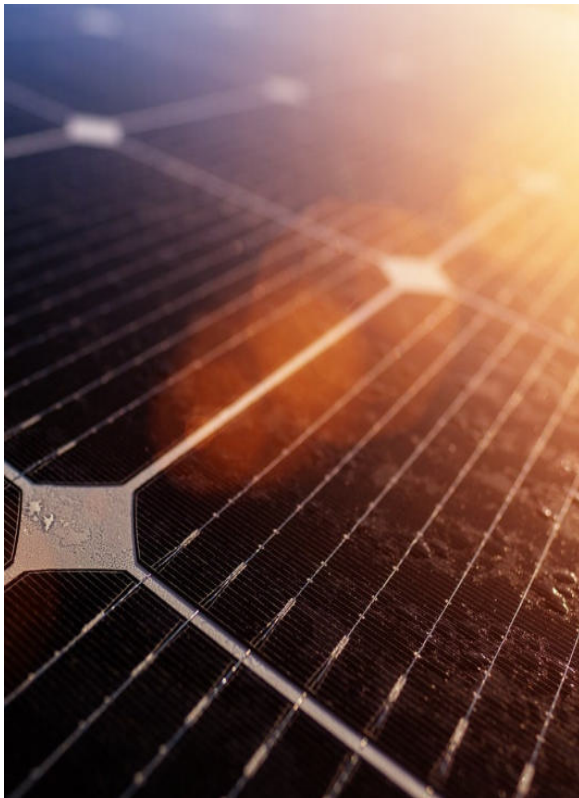


## **Travail personnel**

Carl Jakob Zenthöfer

Tutor Harald Schleicher  
Lycée Ermesinde Mersch  
5C5  
2023/24



## **PHOTOVOLTAIK**

Technik  
Innovation  
Zukunft

# Inhaltsverzeichnis

## **1. Die physikalischen Prozesse hinter der Technik**

1.1 Was ist Energie?

1.2 Was ist Licht?

## **2. Die Technik**

2.1 Photovoltaik

2.2 Halbleiter

2.3 Die Dotierung der Halbleiter

2.3.1 Die n-Dotierung (die negative Dotierung)

2.3.2 Die p-Dotierung (die positive Dotierung)

2.4 Der pn-Übergang

2.5 Halbleiter und Licht

2.6 Indirekte und direkte Halbleiter

2.7 Warum Halbleiter?

2.8 Die Solarzelle

2.9 Absorption von Licht in der Solarzelle

2.10 Das Back-Surface-Field

2.11 Effiziente Absorption von Photonen in der Solarzelle

2.12 Der Quantenwirkungsgrad

## **3. Innovation**

3.1 Innovative Konzepte und Entwicklungen

3.2 n-typ Solarzellen

3.3 TopCon Solarzellen (Tunnel Oxide Passivated Contact) und Tunneleffekt in der Quantenmechanik

3.4 IBC Solarzellen (Interdigitated Back Contact)

## **4. Solarkataster und PV-Potenzial in Luxemburg**

## **5. Fazit**

## **6. Literaturverzeichnis**

## Einleitung

Als Teil der Entreprise LEM Science arbeite ich in diesem Schuljahr am Projekt Energiewende mit. Schon im vergangenen Jahr konnte ich in dieses Projekt reinschnuppern und war direkt begeistert von den vielen Möglichkeiten und interessanten Aspekten, die ich hier kennenlernen konnte und noch immer kann.

Die Energiewende ist ein riesiges Thema, nicht nur für uns am LEM und nicht nur in Luxemburg, sondern weltweit. Der von Menschen gemachte Klimawandel ist eine der größten Bedrohungen unserer Zeit. Die Energieversorgung verursacht weltweit immense Mengen an Treibhausgasen, die schädlich für das Klima sind. Um etwas so Grundlegendes wie die Energieversorgung sicherzustellen, ohne dabei unsere Lebensgrundlage zu gefährden, bedarf es nachhaltiger Konzepte zur Nutzung von erneuerbaren und klimafreundlichen Energien.

Ein Thema, das mich hierbei besonders fasziniert, ist die Photovoltaik (PV). Durch diese Arbeit hatte ich die Möglichkeit, mich umfassend mit dem Thema PV auseinander zu setzen und habe technische Zusammenhänge nachvollzogen. Hierdurch ist mir die Funktionsweise von PV klar geworden. Während der Arbeit an diesem Travail personnel konnte ich mir viel nützliches Wissen aneignen, das sich auch außerhalb des Themas PV in vielen technischen Bereichen anwenden lässt, zum Beispiel Halbleitertechnik und Quantenmechanik.

Ich möchte an dieser Stelle meinem Tutor Harald Schleicher danken, der mich mit seinem Fachwissen stets unterstützte und half. Ich bin froh, mich für das Thema PV entschieden zu haben.

Quellen Abbildungen Titelbild:

<https://pixabay.com/de/photos/solar-panel-solarenergie-5567525/> , abgerufen am 21.04.2024

<https://pixabay.com/de/photos/solarzelle-solarpanel-photovoltaik-4045029/> , abgerufen am 21.04.2024

# 1. Die physikalischen Prozesse hinter der Technik

## 1.1 Was ist Energie?

Wenn von Energie die Rede ist, beschreibt diese grundsätzlich die Fähigkeit eines Körpers, mechanische Arbeit zu verrichten, Wärme abzugeben oder Licht auszusenden.<sup>1</sup> Dieser Vorgang ist so allgegenwärtig und grundlegend, dass beispielsweise sämtliche Arbeit, die verrichtet wird, von Energie abhängig ist. Das bedeutet, dass während ich dieses Travail personnel schreibe, chemische Energie aufgewendet werden muss, die ich vorher in Form von Essen zu mir genommen habe, damit mein Gehirn Informationen verarbeiten kann, so dass mein Körper mechanische Energie aufwendet, um die Tasten an meiner Tastatur zu bedienen. Damit diese Informationen digital geschrieben und gespeichert werden können, benötigt mein Computer elektrische Energie. Diese Energie kann nicht erschaffen oder vernichtet werden, sie wird jedoch umgewandelt in verschiedene Energieformen. Diese Tatsache wird im Energieerhaltungssatz festgehalten.<sup>2</sup>

Stoffe, die Energie enthalten, nennt man Energieträger. Diese besitzen Energie aufgrund ihrer Lage (Lageenergie), ihrer Bewegung (kinetische Energie und mechanische Energie), ihrer Temperatur (thermische Energie), ihrer chemischen Energie, ihrer magnetischen Energie, ihrer Lichtenergie oder ihrer Kernenergie.<sup>3</sup> Um diese von der Natur ausgehenden Energien, also Primärenergien, zu nutzen, werden in den meisten Fällen Umwandlungsprozesse benötigt, um daraus Sekundärenergie zu gewinnen.<sup>4</sup> Diese Sekundärenergie ist besser nutzbar, da diese in der Regel flexibler ist. Dies trifft zum Beispiel auf elektrischen Strom zu, der in vielen Fällen der Energieumwandlung die Sekundärenergie darstellt.

Im Fall von Photovoltaik (PV) kann die Umnutzungskette beispielsweise so aussehen: Primärenergie in Form von Sonnenlicht trifft auf ein PV-Modul – durch die PV-Anlage wird die Primärenergie zu Sekundärenergie in Form von elektrischer Energie umgewandelt – diese elektrische Energie wird zur Nutzenergie, die einen Backofen betreibt.<sup>5</sup>

*Primärenergie(Lichtenergie) ⇒ Sekundärenergie (elektrische Energie) ⇒ Nutzenergie (thermische Energie)*

---

<sup>1</sup> Hoche, Detlef; Küblbeck, Josef; u.a., **Basiswissen Schule: Physik**, Berlin, Duden, 7. aktualisierte Auflage, 2021, S. 356.

<sup>2</sup> Hoche, Detlef; Küblbeck, Josef; u.a., **Basiswissen Schule: Physik**, Berlin, Duden, 7. aktualisierte Auflage, 2021, S. 356.

<sup>3</sup> Hoche, Detlef; Küblbeck, Josef; u.a., **Basiswissen Schule: Physik**, Berlin, Duden, 7. aktualisierte Auflage, 2021, S. 357-358.

<sup>4</sup> Hoche, Detlef; Küblbeck, Josef; u.a., **Basiswissen Schule: Physik**, Berlin, Duden, 7. aktualisierte Auflage, 2021, S. 359.

<sup>5</sup> Hoche, Detlef; Küblbeck, Josef; u.a., **Basiswissen Schule: Physik**, Berlin, Duden, 7. aktualisierte Auflage, 2021, S. 359.

Hierbei ist allerdings wichtig zu beachten, dass nur ein Teil der Primärenergie in elektrische Energie umgewandelt wird und ein anderer Teil in Wärmeenergie. Diese Wärmeenergie gilt jedoch als nicht für den Verbraucher nutzbar und fließt somit nicht in den Prozentsatz des Wirkungsgrads mit ein.

Um die Energie, die uns ständig umgibt, zu messen, gibt es verschiedene Einheiten. Die wichtigste Einheit, um Energie zu messen, ist Joule. James Prescott Joule (1818-1889) war ein britischer Physiker und Bierbrauer.<sup>6</sup> Ein Joule entspricht einer Watt Sekunde. James Watt (1736-1819) war ein schottischer Erfinder, dessen wichtigste Erfindung die Verbesserung und Weiterentwicklung der Dampfmaschine war.<sup>7</sup>

$$1J = 1Ws = \frac{kg\ m^2}{s^2}$$
<sup>8</sup>

Watt ist eine gängige Einheit, um elektrische Energie zu messen. Am bekanntesten ist wahrscheinlich die Einheit kWh, also Kilowatt Stunde. Eine kWh ist ein Vielfaches von Ws (= Watt Sekunde), da es sich hier um 1000 Watt und 3600 Sekunden handelt.<sup>9</sup> Watt und Joule sind geläufige Einheiten, wenn es um das Messen von Energie geht.

Mit der Einheit Joule beschreibt man generell Energie, mit der Einheit Watt beschreibt man Leistung als Energieumsatz pro Zeitspanne. Daher sind dies die Normeinheiten. Watt ist ein Produkt aus elektrischer Spannung (U) und Stromstärke (I):

$$W = I \times U$$

Die Einheit Elektronenvolt, auch als Elektronvolt bezeichnet, ist das Produkt aus Elementarladung (e), also die kleinstmögliche Ladung, die ein frei existierendes Teilchen, wie beispielsweise ein Elektron, besitzen kann und der elektrischen Spannung, die üblicherweise in Volt gemessen wird.<sup>10</sup> Alessandro Volta (1745-1827) war ein italienischer Physiker.<sup>11</sup>

$$1eV = 1,602176634 \times 10^{-19}J$$

Die Einheit eV wird in einem der folgenden Kapitel beim Thema der Halbleitertechnik eine Rolle spielen. Hier wird mithilfe dieser Einheit beschrieben wie groß die Bandlücke oder „verbotene Zone“ in verschiedenen elektrischen Leitern sein kann.

---

<sup>6</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/James\\_Prescott\\_Joule](https://de.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule) abgerufen am 13.02.2024.

<sup>7</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/James\\_Watt](https://de.wikipedia.org/wiki/James_Watt) abgerufen am 13.02.2024.

<sup>8</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Joule> abgerufen am 13.02.2024.

<sup>9</sup> Hübscher, Heinrich; Jagla, Dieter; u.a., **Elektrotechnik Grundwissen Lernfelder 1-4**, Köln, Westermann, 6. Auflage, 2021, S. 28.

<sup>10</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Elementarladung> abgerufen am 14.02.2024.

<sup>11</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Alessandro\\_Volta](https://de.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta) abgerufen am 14.02.2024.

## 1.2 Was ist Licht?

Licht ist eine elektromagnetische Strahlung, die aus kleinen Ladungsträgern (Photonen) sich wellenförmig mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.<sup>12</sup> Diese Photonen sind masselos, jedoch besitzen sie Energie und einen Impuls, da sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.<sup>13</sup> Licht beschreibt den Teil der elektromagnetischen Strahlung, den die Menschen mit bloßem Auge sehen können.<sup>14</sup> Es besitzt immer eine gewisse Frequenz, genauso wie die restliche elektromagnetische Strahlung.



Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches\\_Spektrum](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum), abgerufen am 14.02.2024

Um die Energie eines Photons zu bestimmen, welches maßgebend für den Energieertrag ist, muss man sich diese Formel anschauen:<sup>16</sup>

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

Diese Formel beschreibt das Verhältnis zwischen Energie (E) dem Impuls (p), der Masse (m) und der Lichtgeschwindigkeit (c). Wenn die Masse 0 ist, da Licht masselos ist, erhält man, nachdem gekürzt wurde, diese Formel:<sup>17</sup>

$$E = p \times c$$

Um den Impuls zu ermitteln, benötigt man die Frequenz ( $\nu$ ) und das plancksche Wirkungsquantum (h). Benannt ist dies nach Max Planck (1858-1947), einem deutschen Physiker.<sup>18</sup> Dieses drückt aus, dass es in einem schwingenden System ein konstantes Verhältnis zwischen Frequenz und kleinstmöglicher Energie gibt:<sup>19</sup>

$$E = h\nu$$

Das plancksche Wirkungsquantum beträgt:<sup>20</sup>

$$6,62607015 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

<sup>12</sup> Southorn, Graham; Sparrow, Giles, **Physik. 100 Konzepte**, Kerkdriel (NL), Libero IBP, 2018, S. 86.

<sup>13</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Photon> abgerufen am 14.02.2024.

<sup>14</sup> Southorn, Graham; Sparrow, Giles, **Physik. 100 Konzepte**, Kerkdriel (NL), Libero IBP, 2018, S. 86.

<sup>15</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches\\_Spektrum](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum) abgerufen am 14.02.2024.

<sup>16</sup> <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/photon-2264> abgerufen am 14.02.2024.

<sup>17</sup> <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/photon-2264> abgerufen am 14.02.2024.

<sup>18</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Max\\_Planck](https://de.wikipedia.org/wiki/Max_Planck) abgerufen am 15.02.2024.

<sup>19</sup> <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/plancksches-wirkungsquantum-1818> 14.02.2024;

<https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/photon-2264> abgerufen am 14.02.2024.

<sup>20</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Konstante> abgerufen am 14.02.2024.

Die Energie eines Photons ist also abhängig von der Frequenz, die vom Photon aus geht. Wenn man beispielsweise gelbes Licht mit einer Frequenz von  $5,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ <sup>21</sup> in diese Gleichung einfügt:

$$5,2 \times 10^{14} \text{ Hz} \times 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ Js} \cong 3,44 \times 10^{-19} \text{ J}$$

erhält man den Wert der Energie, die dieses Photon besitzt. Dieser Wert wird in Joule angegeben, da sich Frequenz und Sekunden heraus kürzen.<sup>22</sup> So ist es möglich die Energie eines Photons zu bestimmen. Es muss lediglich die Lichtgeschwindigkeit (c) hinzugerechnet werden.

Lange Zeit war unklar, ob Licht den Charakter einer Welle oder eines Teilchens aufweist, heutzutage ist bekannt, dass es sich bei Licht um ein Wellen-Teilchen-Dualismus handelt.<sup>23</sup> Mit der Formel von Max Planck, kann dieser Dualismus nachgewiesen werden, was von großer Bedeutung ist, um das Photon zu verstehen.<sup>24</sup> Folgende Formel:

$$E = h\nu$$

beweist dies.<sup>25</sup> Hierbei wird eine Verbindung zwischen der Energie, die einen Teilchencharakter aufweist, und der Frequenz, welche einen Wellencharakter aufweist, geschaffen.<sup>26</sup>

Dies sind wichtige Grundlagen, um den Vorgang im PV-Modul zu verstehen.

---

<sup>21</sup> <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Licht+frequenz+gelb> abgerufen am 14.02.2024.

<sup>22</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=2DOqF4Mt35Y> abgerufen am 14.02.2024.

<sup>23</sup> Southorn, Graham; Sparrow, Giles, **Physik. 100 Konzepte**, Kerkdriel (NL), Libero IBP, 2018, S. 182.

<sup>24</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Konstante> abgerufen am 15.02.2024.

<sup>25</sup> <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/photon-2264> abgerufen am 14.02.2024.

<sup>26</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=2DOqF4Mt35Y> abgerufen am 15.02.2024.

## 2. Die Technik

### 2.1 Photovoltaik

Photovoltaik (PV) ist meiner Meinung nach eine ganz besondere Art und Weise, elektrische Energie zu gewinnen. Es ist schon bemerkenswert, dass die Umwandlung von Sonnenlicht zu elektrischer Energie auf solch kleinem Raum stattfinden kann. Bei großen Kohlekraftwerken beispielsweise wird Kohle verbrannt, um Wasser zu erhitzen, damit schließlich mit dem Wasserdampf eine Turbine angetrieben werden kann, welche elektrischen Strom erzeugt.<sup>27</sup> All diese Schritte werden bei der Photovoltaik nicht benötigt. Hier geschieht der ganze Prozess in den einzelnen Wafern, die Teil der Solarzelle sind.

### 2.2 Halbleiter

Halbleiter spielen eine ganz interessante und wichtige Rolle in der Welt der Physik und vor allem im Bereich der Photovoltaik. Jedes Atom hat mindestens ein Elektron und ein Proton. Die Protonen und die Neutronen bilden den Kern, während sich die Elektronen sogar in großen Abständen zu den Kernen befinden. Es gibt verschiedene Schichten, auf denen diese Elektronen liegen; K, L, M, N, O, und Q.<sup>28</sup> Wichtig zu beachten ist jedoch, dass es sich hierbei um ein Modell handelt, nämlich das Atommodell nach Niels Bohr. Bohr (1885-1962) war ein bedeutender Atomphysiker und stammte aus Dänemark.<sup>29</sup> Je mehr Elektronen ein Atom hat, desto mehr Schichten kann es belegen. Hierbei spielen die Elektronen in der letzten belegten Schicht eine entscheidende Rolle, auch wenn diese Schicht nicht vollständig belegt ist.<sup>30</sup> Diese wird Valenzschicht genannt und bestimmt, wie viele Bindungen ein Element eingehen kann.<sup>31</sup> Ein Silizium-Atom beispielsweise hat vier Elektronen auf der Valenzschicht. Das bedeutet, dass dieses Atom auf vier Punkten eine Bindung eingehen kann. Für den Ausdruck Valenz kann auch der Ausdruck Wertigkeit verwendet werden.<sup>32</sup>

---

<sup>27</sup> <https://www.enbw.com/energie-entdecken/energieerzeugung/konventionelle-erzeugung/kohlekraftwerk.html> abgerufen am 31.10.2023.

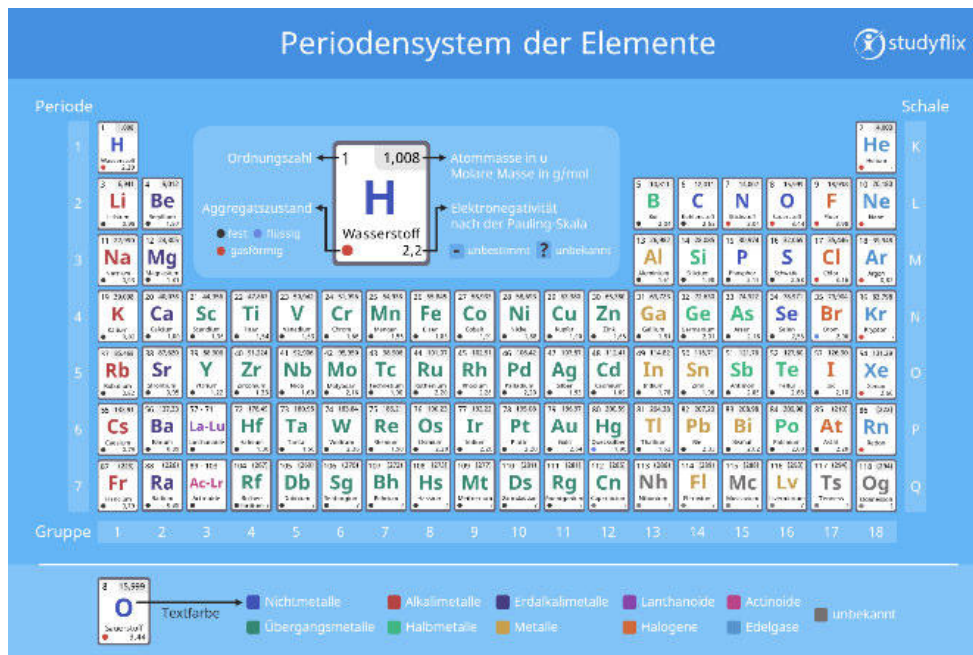
<sup>28</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 64.

<sup>29</sup> Hoche, Detlef; Küblbeck, Josef; u.a., **Basiswissen Schule: Physik**, Berlin, Duden, 7. aktualisierte Auflage, 2021, S. 329.

<sup>30</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 64-66.

<sup>31</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 66.

<sup>32</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 66.



Quelle: <https://studyflix.de/chemie/periodensystem-270> abgerufen am 2.11.2023

Wie hier auf der Abbildung des Periodensystems der Elemente (PSE) zu sehen ist, besetzen verschiedene Atome verschiedene Schichten (Perioden). Auch hier lässt sich rechts ablesen welches Element welche Schicht besetzt.

Wichtig zu wissen ist, dass die Elektronen in der Lage sind, auf eine höhere Schicht gebracht zu werden, z.B. durch Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung.<sup>33</sup> Dies ist im Fall der PV das Sonnenlicht. Ein Wafer der PV besteht größtenteils aus Silizium.<sup>34</sup> Silizium wird verwendet, da es ein Halbleiter ist. Wie der Name vermuten lässt, leitet Silizium elektrischen Strom, also negativ geladene Elektronen, jedoch nicht so gut wie reine Metalle (diese sind keine Halbleiter, sondern Leiter).<sup>35</sup>

Es gibt bei Metallen, Halbleitern und Isolatoren ein Valenzband und ein Leitungsband.<sup>36</sup> Wenn sich Atome nah aneinander befinden, koppeln sie sich gegenseitig. Je mehr Elektronen ein Atom besitzt, desto mehr Niveaus können geformt werden. Da es in den Wafern relativ viele Atome gibt, die sich miteinander koppeln, entstehen so aus den verschiedenen Niveaus Energiebänder.<sup>37</sup> Das „Letzte“ der Energiebänder spielt hier vor allem eine wichtige Rolle, weil nach ihm die „verbotene Zone“ kommt, welche von den geladenen Elektronen

<sup>33</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 65.

<sup>34</sup> <https://gruenes.haus/photovoltaik-aufbau-einfach-erklart/> abgerufen am 3.11.2023.

<sup>35</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 69.

<sup>36</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 69.

<sup>37</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 68.

überwunden werden muss.<sup>38</sup> Dies muss geschehen, damit diese Elektronen in das Leitungsband gelangen können und so elektrische Energie gewonnen werden kann.<sup>39</sup>

Damit Energie aus den Wafern gewonnen werden kann, müssen sich die Elektronen auf der Valenzschicht (also die Elektronen, die eine Kopplung mit anderen Elektronen von anderen Atomen eingehen) lösen.<sup>40</sup> Hierbei entsteht schließlich ein „Loch“. Das aus seiner Bindung gelöste Elektron muss nun die Bandlücke oder „verbotene Zone“ überwinden.<sup>41</sup> Dieser Vorgang wird Generation eines Elektron-Loch-Paars genannt.<sup>42</sup> Dieser Vorgang findet aber in umgekehrter Form statt. Nachdem die Elektronen im Leitungsband ihre Energie abgegeben haben, fallen sie wieder herunter und rekombinieren sie sich wieder im Valenzband. Wenn es sich hierbei lediglich um das gleiche Element oder Atom handeln würde, ergäbe die Anzahl der gelösten Elektronen auch die Anzahl der Löcher, allerdings gibt es bei den Wafern von PV-Anlagen einen kleinen, aber wichtigen Unterschied.<sup>43</sup>

## 2.3 Die Dotierung der Halbleiter

Um die Leistungsfähigkeit der Wafer extrem zu verbessern, werden die Halbleiter dotiert.<sup>44</sup> Das bedeutet, dass vergleichsweise wenige Silizium Atome durch andere Atome ersetzt werden, welche mehr oder weniger Elektronen im Valenzband besitzen. Die Dotierung ist notwendig, um genügend Energie zu gewinnen. Hierbei gibt es zwei verschiedene Arten der Dotierung: die **n-Dotierung** und die **p-Dotierung**.<sup>45</sup> Um die Dotierung richtig zu verstehen, ist es nötig, sich das PSE noch einmal näher anzuschauen. Hierbei sind vor allem die lateinischen Zahlen, die über den Elementen stehen, von Bedeutung. Wir sehen bei der Nummer vier das Silizium Atom (Ordnungszahl 14), welches vier Elektronen in der Valenzschicht besitzt. Die beiden anderen Atome besitzen ein Elektron mehr und ein Elektron weniger: Das Bor-Atom ist dreiwertig und das Phosphoratom fünfwertig.

---

<sup>38</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 68.

<sup>39</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 69.

<sup>40</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 69.

<sup>41</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 70.

<sup>42</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 70.

<sup>43</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 70.

<sup>44</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 74.

<sup>45</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 74-75.

13 - III	14 - IV	15 - V	16 - VI	17 - VII
5 <b>B</b> Bor 10.811 2.04	6 <b>C</b> Kohlenstoff 12.011 2.55	7 <b>N</b> Stickstoff 14.007 3.04	8 <b>O</b> Sauerstoff 15.999 3.44	9 <b>F</b> Fluor 18.998 3.98
13 <b>Al</b> Aluminium 26.982 1.61	14 <b>Si</b> Silicium 28.086 1.9	15 <b>P</b> Phosphor 30.974 2.19	16 <b>S</b> Schwefel 32.065 2.58	17 <b>Cl</b> Chlor 35.453 3.16
31 <b>Ga</b> Gallium 69.723 1.81	32 <b>Ge</b> Germanium 72.64 2.01	33 <b>As</b> Arsen 74.922 2.18	34 <b>Se</b> Selen 78.96 2.55	35 <b>Br</b> Brom 79.904 2.96

Quelle: <https://www.schubu.at/p190/periodensystem-der-elemente> abgerufen und verändert am 3.11.2023.

### 2.3.1 Die n-Dotierung (die negative Dotierung)

Im Valenzband werden einige Atome durch ein Phosphor-Atom ersetzt. Das führt dazu, dass es in der Kristallstruktur des Siliziums einen Überschuss an Elektronen gibt, da vier Elektronen auf der Valenzschicht eine Bindung eingehen, eines jedoch nicht, da nur Platz für vier Elektronen ist.<sup>46</sup> Da dieses Elektron nicht wirklich an den Atomrumpf gebunden ist, also den Teil des Atoms ist, welches sich nicht auf der Valenzschicht befindet, liegt es ungebunden vor.<sup>47</sup> Dadurch entsteht ein neues Niveau im Energieband, auf dem sich das überschüssige Atom befindet. Das Besondere hierbei ist, dass es nur einen Bruchteil der Energie benötigt, um die „verbotene Zone“ zu überwinden, als wenn es aus der Bindung mit anderen Atomen gelöst werden müsste.<sup>48</sup>

Nicht nur die Elektronen auf der Valenzschicht spielen hier eine Rolle, sondern auch der Fakt, dass das Phosphor-Atom ein Proton mehr als die Silizium-Atome besitzt. Hierdurch entsteht eine ortsfeste positive Ladung, da das Phosphor-Atom nun mit den Silizium-Atomen gekoppelt ist, das überschüssige Atom jedoch nicht.<sup>49</sup>

<sup>46</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 74.

<sup>47</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 74.

<sup>48</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 74.

<sup>49</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 76.

### 2.3.2 Die p-Dotierung (die positive Dotierung)

Bei der p-dotierten Schicht, also beim Leitungsband, **ist es genau anders herum**.<sup>50</sup> Hier wird das dreiwertige Bor-Atom genutzt. Dadurch kann eine der vier Bildungsmöglichkeiten nicht genutzt werden. Damit das Bor-Atom in einer der für die kristalline Struktur benötigte Konfiguration vorliegt, springt wortwörtlich eines der benachbarten Elektronen ein und „füllt“ somit das entstandene Loch.<sup>51</sup> Dies ändert aber nichts daran, dass nun ein Elektron im Leitungsband fehlt und so ein Loch entsteht. Sobald das geschehen ist, kommt es zur Löcherleitung. Dies bedeutet, dass das Atom, welches eingesprungen ist, nicht bei dem Bor-Atom bleibt, mit welchem es zuerst in Kontakt gekommen ist, sondern weitergeleitet wird zum nächsten Bor-Atom.<sup>52</sup> Hierdurch werden die Löcher in den hinteren Reihen früher gefüllt als beispielsweise die Löcher direkt nach der „verbotenen Zone“, wo die Atome eigentlich zuerst ankommen.<sup>53</sup>

Auch bei der Anzahl der Protonen im Kern ist es beim Bor-Atom genau gegensätzlich, hier entsteht eine ortsfeste negative Ladung, da das Bor-Atom ein Proton weniger im Kern hat, als das Silizium-Atom.<sup>54</sup>

## 2.4 Der pn-Übergang

Durch die ortsfesten Ladungen wird der Überschuss oder der Mangel der Elektronen ausgeglichen, sodass **die p-dotierte und n-dotierte Schicht elektrisch neutral sind**.<sup>55</sup> Da die p-dotierte und die n-dotierte Schicht jedoch miteinander in Kontakt kommen, bleibt es nicht hierbei. Die überschüssigen Elektronen auf Seiten der n-dotierten Schicht diffundieren in Richtung der p-dotierten Schicht, wodurch die Löcher gefüllt werden.<sup>56</sup> Umgekehrt geschieht dies auch auf Grund der Löcherleitung, so dass diese sich auch Richtung n-dotierte Schicht bewegen, um dort von den Elektronen gefüllt zu werden. Da sich die Elektronen nun in Richtung der p-dotierten Schicht bewegen und die Löcher in Richtung der n-dotierten Schicht, sind in der Umgebung des Übergangs, also dort, wo die beiden Schichten aufeinandertreffen, weder Elektronen, noch Löcher, wodurch die ortsfesten Ladungen nicht

---

<sup>50</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 75.

<sup>51</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 75.

<sup>52</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 75.

<sup>53</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 75.

<sup>54</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 76.

<sup>55</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 76.

<sup>56</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 76.

mehr ausgeglichen werden können.<sup>57</sup> Dadurch entsteht ein elektrisches Feld, welches den Vorgang ausbremst und die Elektronen wieder zurück in die n-dotierte Schicht treibt und die Löcher wieder in Richtung der p-dotierten Schicht.<sup>58</sup> Dadurch entsteht ein Potenzialunterschied, da sich auf der n-dotierten Seite wieder mehr Elektronen und auf der p-dotierten Seite wieder mehr Löcher befinden. Die Elektronen können dann ihren Impuls abgeben und so fließt der elektrische Strom. Das nennt man auch Halbleiter Diode. Die Diode sorgt dafür, dass der Strom zum Schluss nur in eine Richtung fließen kann und nicht in die andere.<sup>59</sup> In der Praxis wird das Valenzband als die n-dotierte Schicht oft stärker dotiert, als die p-dotierte Schicht.<sup>60</sup>

Der pn-Übergang ist eine Diode. Dies bedeutet, dass der elektrische Strom nur in eine Richtung fließen kann. In die andere Richtung kann lediglich ein minimaler Sperrstrom fließen. Mit höher angelegter Spannung wird die „verbotene Zone“ oder Raumladungszone immer größer.<sup>61</sup>

Wenn man einer Halbleiterdiode Spannung anlegt, werden die Elektronen zur n-dotierten Schicht getrieben und die Defektelektronen oder die Löcher zur p-dotierten Seite.<sup>62</sup> Deswegen werden die ortsfesten Ladungen wieder rückgängig gemacht. Da sie erst durch die Abwesenheit der Elektronen bzw. Elektronenlöcher entstehen, weil diese nicht mehr zu der gegenüberliegenden Seite wandern können aufgrund der Diffusionsspannung, die sie daran hindert.<sup>63</sup> Durch die angelegte Spannung kann diese abgebaut werden. Bei unterschiedlichen Halbleitermaterialien wird eine unterschiedliche Spannung benötigt, bei Silizium ist es beispielsweise 0,7 V und bei Germanium 0,3 V, welches auch Verwendung in Solarzellen findet.<sup>64</sup>

Wenn man Spannung falsch anlegt, also bei Rückwärtsspannung, wächst die Raumladungszone, da hier der Prozess genau umgekehrt vonstattengeht: Je höher die angelegte Spannung, desto stärker die Raumladungszone.<sup>65</sup> Es kann also kein oder nur ein geringer Sperrstrom über die Halbleiterdiode fließen.<sup>66</sup>

---

<sup>57</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 76.

<sup>58</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 76.

<sup>59</sup> <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/halbleiterdiode#> abgerufen am 29.12.2023.

<sup>60</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 77.

<sup>61</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 79.

<sup>62</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 79.

<sup>63</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 79.

<sup>64</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Diffusionsspannung> abgerufen am 03.12.2023.

<sup>65</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 80.

<sup>66</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 80.

## 2.5 Halbleiter und Licht

In den vorherigen Abschnitten habe ich beschrieben, wie der pn-Übergang funktioniert, was Energiebänder sind, sowie das eigentliche Prinzip hinter der Energiegewinnung. Allerdings kommt diese Energie ja schließlich nicht aus dem Nichts, sie kommt aus dem Licht der Sonne, das bis zur Erde reicht und dort von den PV-Anlagen absorbiert wird. Wenn ein Photon, also Lichtteilchen,<sup>67</sup> genügend Energie hat, kann es ein Elektron von der Valenzschicht zum Leitungsband und über die „verbotene Zone“ bringen.<sup>68</sup> Damit dies gelingen kann, muss das Photon erst einmal das Leitungsband erreichen. Auf diesem Weg wird das Photon jedoch ab einem bestimmten Punkt aufgehalten. Zum Beispiel: Wenn es sich um Licht mit einer Frequenz von 500 Terra Hz<sup>69</sup> oder mit 600nm Wellenlänge handelt, dringt das Licht 2,5µm in die Solarzelle ein.<sup>70</sup> Da kristallines Silizium Licht bei 600nm Wellenlänge einen Absorptionskoeffizienten von 4000 pro cm hat, erläutert folgende Formel das Ergebnis:

$$2,5\mu m = \frac{1}{4000cm}$$

Wenn die Photonen dann diesen Punkt erst einmal erreicht haben, stoßen sie auf Phononen.<sup>71</sup>

Diese sind die Teilchen, die sich durch den Impuls von anderen Teilchen (in diesem Fall Photonen) bewegen; sie sorgen dafür, dass sich Teilchen in der kristallinen Struktur des Siliziums kollektiv bewegen, da sich die Teilchen in dieser Struktur nicht unabhängig voneinander bewegen können.<sup>72</sup> In unserem Beispiel sind die Rahmenbedingungen bzw. das Bezugssystem jedoch anders: Das Photon stößt mit seiner Energie gegen das Phonon, was dazu führt, dass sich das Phonon bewegt.<sup>73</sup> Allerdings bewegt sich nur ein Phonon, da der Impuls eines Photons gering ist, es hat jedoch mehr Energie als das Phonon. Sobald das Phonon angestoßen wird, wird die Energie in einen Impuls umgewandelt, den das Teilchen bzw. Elektron auf der Valenzschicht braucht, um die „verbotene Zone“ zu überqueren und somit elektrische Energie zu liefern.<sup>74</sup> Hierbei entsteht wieder ein Elektronenlochpaar, von dem schon in den vorherigen Abschnitten die Rede war.

---

<sup>67</sup> „Photonen, auch Lichtquanten oder Lichtteilchen, sind anschaulich gesagt die Energie-„Pakete“, aus denen elektromagnetische Strahlung besteht. Physikalisch wird das Photon als Austauschteilchen betrachtet“: <https://de.wikipedia.org/wiki/Photon> abgerufen am 01.01.2024.

<sup>68</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 65.

<sup>69</sup> [https://www.chemie.de/lexikon/Hertz\\_%28Einheit%29.html](https://www.chemie.de/lexikon/Hertz_%28Einheit%29.html) abgerufen am 29.12.2023.

<sup>70</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 82.

<sup>71</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 83.

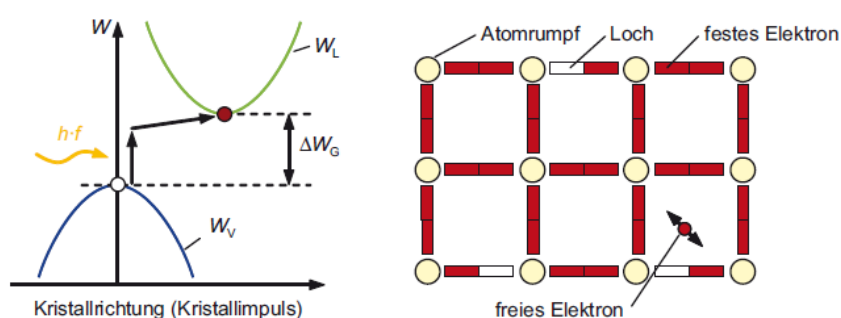
<sup>72</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Phonon> abgerufen am 28.12.2023.

<sup>73</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 83.

<sup>74</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Impuls> abgerufen am 28.12.2023.

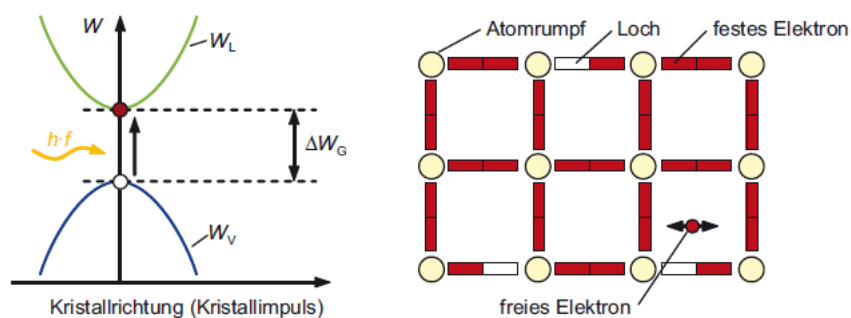
## 2.6 Indirekte und direkte Halbleiter

Ein Phonon, also ein Teilchen, dem von einem Photon Energie zugeführt wird, ist jedoch nicht bei allen Halbleitern von Bedeutung.<sup>75</sup> Bei Silizium wird Energie vom Photon auf das Phonon übertragen. Das passiert aber erst, nachdem das Photon eine gewisse Strecke im Si-Kristall zurückgelegt hat. Das Photon reißt ein Elektron aus der Bindung, dieses wandert dann durch die kristalline Struktur, bis es mit einem Atomrumpf kollidiert und so die Schwingung des Gitters abbekommt, so dass es sich in Richtung des Leitungsbandes bewegt.<sup>76</sup> Das Photon kann sich nicht einfach gradlinig bewegen, weil sich das Elektronenloch in dem Leitungsband versetzt zum ionisierten Elektron aus dem Valenzband befindet.<sup>77</sup> Das gilt für indirekte Halbleiter wie zum Beispiel Silizium.



Quelle: [https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/auflage\\_6/abbildungen\\_6/Abbildungen%20Lehrbuch-PV\\_f-62\\_1.png](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/auflage_6/abbildungen_6/Abbildungen%20Lehrbuch-PV_f-62_1.png) abgerufen am 12.02.2024.

Bei einem direkten Halbleiter ändert sich die Schwingungsrichtung nicht, hier reicht es, wenn das Elektron aus seiner Bindung gerissen wird und sich einfach gradlinig zum Leitungsband bewegt.<sup>78</sup>



<sup>75</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 83.

<sup>76</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 84.

<sup>77</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 84.

<sup>78</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 84.

Quelle : [https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/auflage\\_6/abbildungen\\_6/Abbildungen%20Lehrbuch-PV\\_f-63\\_1.png](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/auflage_6/abbildungen_6/Abbildungen%20Lehrbuch-PV_f-63_1.png), abgerufen am 12.02.2024

Da bei einem indirekten Halbleiter das Elektron nicht so einfach zum Leitungsband gelangt wie bei einem direkten Halbleiter, ist der zurückgelegte Weg größer und somit auch die Eindringtiefe.<sup>79</sup>

## 2.7 Warum Halbleiter?

Halbleiter sind beliebt in Industrie und Technik, vor allem Silizium spielt eine wichtige Rolle in einer globalisierten Wirtschaft. Halbleiter haben große Vorteile im Vergleich zu anderen Materialien, hierzu zählt beispielsweise die effiziente und kontrollierbare Leitfähigkeit. Bei niedriger Temperatur leitet ein Halbleiter, anders als bei Metallen, gar nicht – bei hohen Temperaturen jedoch leiten sie sehr gut.<sup>80</sup>

Bei hohen Temperaturen im Halbleiter gelingt es mehr Elektronen die „verbotene Zone“ zu überkehren.<sup>81</sup> Bei kalter Temperatur gelangt keine Energie von außen an die Halbleiter heran, keine Wärmeenergie und dann in diesem Fall auch keine Photonen, was dazu führt, dass die Elektronen nicht aus der Valenzschicht gehoben werden können.<sup>82</sup> Bei Metallen stehen die Elektronen bereits zur Verfügung, was sie elektrisch leitend macht. Bei hohen Temperaturen entsteht Wärmeenergie. Durch die schlechte Struktur des Metalls (also die schlechte Anordnung der Phononen im Metall) stoßen die Phononen aufeinander und es entsteht Wärmeenergie. Dadurch entsteht ein Widerstand.<sup>83</sup> Der Widerstand vermindert bekanntlich die Leitfähigkeit, wodurch Energie in eine Form umgewandelt wird, die nicht für den Verbraucher von Nutzen ist.

Ein weiterer Faktor ist, dass die Elektronen bei Metallen im pn-Übergang unerwünscht rekombinieren. Das liegt daran, dass den Metallen die „verbotene Zone“ nicht groß genug ist, um das zu verhindern.<sup>84</sup> Hier sind bei Eisen beispielsweise lediglich 0,55 eV (Elektronen Volt) nötig um von Valenzband zu der Mitte der „verbotene Zone“ zu kommen, da sich dort ein Energieniveau befindet.<sup>85</sup> In dem die Strecke, die das geladene Elektron zurücklegen muss, unterteilt wird, ist die Überkehrung einfacher.<sup>86</sup> Ist die „verbotene Zone“ erst einmal überkehrt kommt es dann zur Rekombination. Die rekombinierten Elektronen können folglich nicht mehr über n-dotierte Seite gelangen, was bedeutet das weniger elektrischer Strom genutzt werden kann.

---

<sup>79</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 84.

<sup>80</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Halbleiter> abgerufen am 28.12.2023.

<sup>81</sup> <https://wissenstexte.de/physik/niveau.html> abgerufen am 28.12.2023.

<sup>82</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Halbleiter> abgerufen am 28.12.2023.

<sup>83</sup> <https://wissenstexte.de/physik/niveau.html> abgerufen am 28.12.2023.

<sup>84</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 93

<sup>85</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 93

<sup>86</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 93.

## 2.8 Die Solarzelle

Der Aufbau der Solarzelle wurde bereits teilweise in vorherigen Abschnitten erläutert. Auf dieser Abbildung ist gut zu sehen, wie die Elektronen durch das elektrische Feld zur n-dotierten Schicht wandern und dann zur Stromsammelschiene (Minuspol) und der Rückkontakt (Pluspol). Gut zusehen ist ebenfalls das Verhältnis zwischen der n-dotierten und p-dotierten Schicht, hier wurde unsymmetrisch dotiert, das bedeutet, dass die Dichte an Phosphor-Atomen in der kleinen n-dotierten (Emitter) Schicht größer ist als die Dichte an Bor-Atomen in der p-dotierten Schicht (Basis).<sup>87</sup>

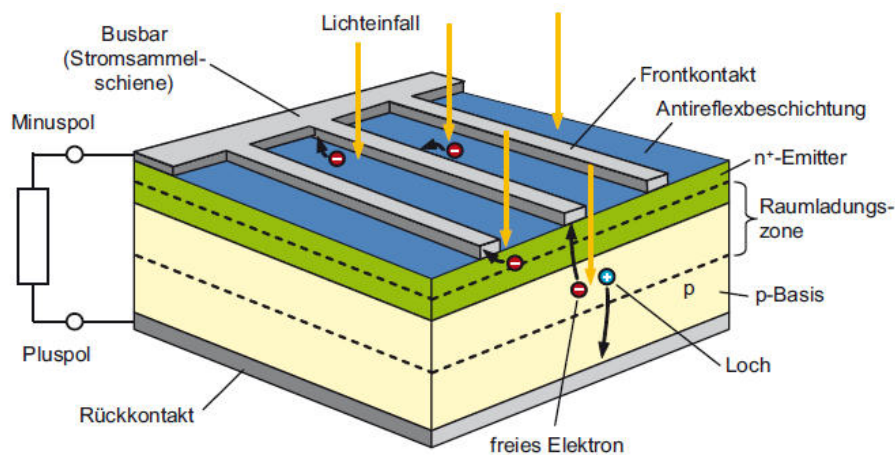


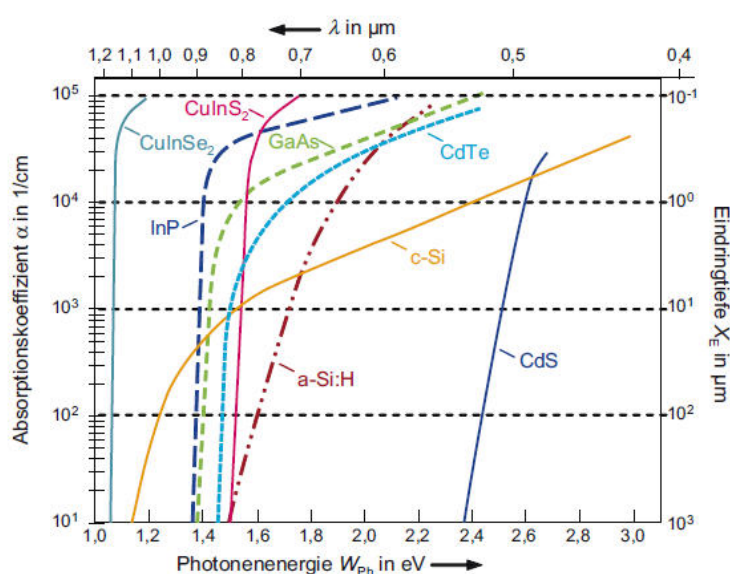
Bild 4.4 Typische Silizium-Solarzelle

Quelle : [https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen\\_6.html#Kapitel4](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen_6.html#Kapitel4) abgerufen am 02.01.2024

<sup>87</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 92.

## 2.9 Absorption von Licht in der Solarzelle

Die masselosen Photonen, welche nun auf die Solarzelle treffen, können sich an verschiedenen Stellen wieder rekombinieren.<sup>88</sup> Das liegt daran, dass Licht je nach Wellenlänge unterschiedlich gut bzw. schnell absorbiert wird. Hier ist auch der Absorptionskoeffizient interessant: Dieser gibt, an wie schnell Licht mit einer gewissen Wellenlänge absorbiert wird.<sup>89</sup> Ein hoher Absorptionskoeffizient bedeutet, dass das Licht schnell absorbiert wird und dass die Eindringtiefe in die Zelle klein ist. Ein niedriger Absorptionskoeffizient bedeutet, dass das Licht deutlich tiefer in die Zelle eindringen kann.<sup>90</sup> Um zu verstehen, warum dies so ist, muss man folgende Grafik detailliert begutachten:



Quelle: [https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/aufgabe\\_6/abbildungen\\_6/Abbildungen%20Lehrbuch-PV\\_f-64\\_1.png](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/aufgabe_6/abbildungen_6/Abbildungen%20Lehrbuch-PV_f-64_1.png) abgerufen am 12.02.2023.

Hier sind verschiedene Halbleitermaterialien aufgelistet, direkte und indirekte. Diese Grafik zeigt, wie tief ein Photon mit bestimmter Wellenlänge und Energie in ein bestimmtes Halbleitermaterial eindringen kann, bzw. wie schnell es absorbiert wird.

Nehmen wir beispielsweise c-Si.

$$c - Si: \alpha (W_{Ph} = 2,21 \text{ eV}) = 6 * \frac{10^3}{\text{cm}} \Rightarrow X_E = 1/\alpha = 1,67 \mu\text{m}$$

Wenn bei kristallinem Silizium, Licht mit einer Photonenenergie von 2,21 eV absorbiert wird, entspricht dies einem Absorptionskoeffizient von  $6 * 10^3/\text{cm}$ , wie man links ablesen kann. Diese Zahl gibt an, wie stark das Licht in einem cm des Halbleiters absorbiert wird. Daraus

<sup>88</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 94.

<sup>89</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 94.

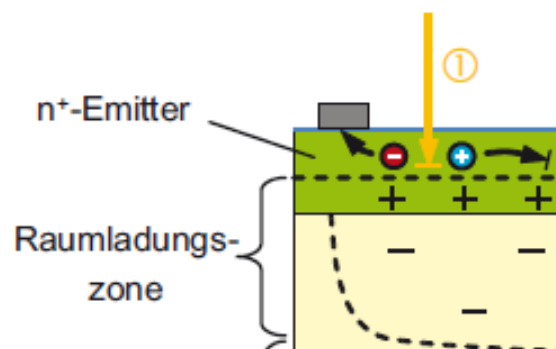
<sup>90</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 82 und 94.

lässt sich die Eindringtiefe in  $\mu\text{m}$  ermitteln. Die kann jedoch auch mit der schon im Abschnitt Halbleiter und Licht benutzten Formel ermittelt werden:

$$X_E = \frac{1}{\alpha} = 1,67 \mu\text{m} = \frac{1}{6 \cdot \frac{10^3}{\text{cm}}}$$

### Szenario 1: Eindringtiefe des Lichtes $\leq 0,1\mu\text{m}$

Bei extrem kleiner Eindringtiefe hat das Defektor-Elektron, also das Elektronenloch, dass durch das Photon entstanden ist, nur eine minimale Chance, es zurück zur Basis zu schaffen, bevor es wieder rekombiniert, da es sich im stark negativ dotierten Bereich des Emitters befindet.<sup>91</sup> Dies hat zur Folge, dass ein Elektron, welches eigentlich zum Busbar wandern sollte, auf seinem Weg rekombiniert wird und die Energie so nicht genutzt werden kann.<sup>92</sup>



Quelle : [https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen\\_6.html#Kapitel4](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen_6.html#Kapitel4) abgerufen am 03.01.2024.

### Szenario 2: Eindringtiefe des Lichtes $\leq 1\mu\text{m}$

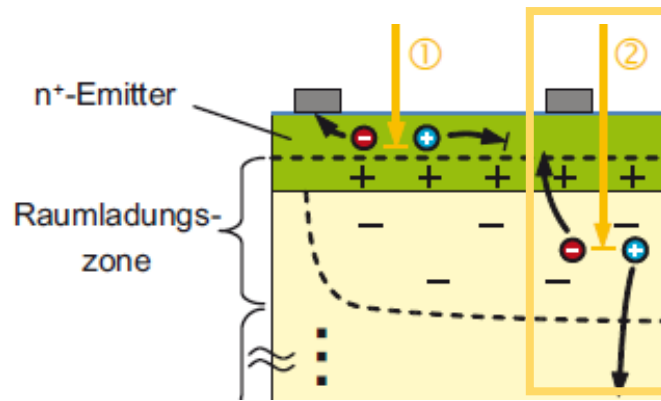
Wenn das Photon es bei diesem Szenario doch bis zur Raumladungszone schafft, also zur verbotenen Zone, sieht es schon deutlich besser aus mit der Energiegewinnung. Sobald ein Elektronenlochpaar entsteht, wird das Elektron durch die Raumladungszone in Richtung Minuspol und das Defektelektron in Richtung Pluspol geleitet.<sup>93</sup> Es kommt hierbei meistens nicht zu einer Rekombination, und das Elektron kann problemlos zum Busbar gelangen und daraus resultiert ein elektrischer Strom, der genutzt werden kann.<sup>94</sup>

<sup>91</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 94.

<sup>92</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 94.

<sup>93</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 95.

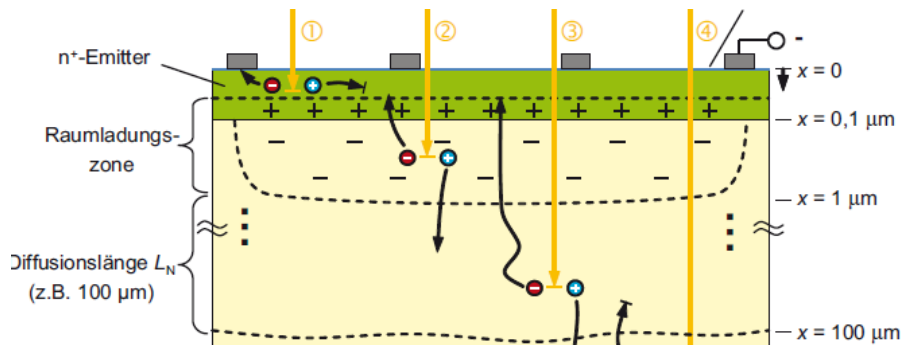
<sup>94</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 95.



Quelle: [https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen\\_6.html#Kapitel4](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen_6.html#Kapitel4) abgerufen am 03.01.2024.

### Szenario 3: Eindringtiefe des Lichtes $\leq 100 \mu\text{m}$

Das Photon dringt noch in gutes Stück tiefer ein und wird erst dann absorbiert. Das ionisierte Elektron hat noch relativ gute Chancen, die Raumladungszone zu erreichen und zum elektrischen Leiter zu gelangen.<sup>95</sup> Das liegt an der Diffusionsenergie, die noch weit hinter der Raumladungszone dafür sorgen kann, dass das Elektron sein Ziel, wenn auch nur langsam, mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht.<sup>96</sup>



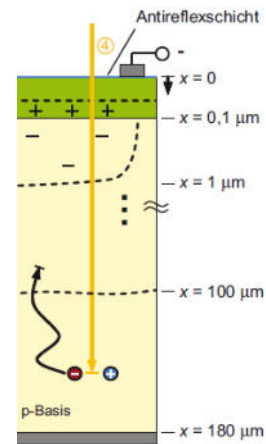
Quelle: [https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen\\_6.html#Kapitel4](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen_6.html#Kapitel4) abgerufen am 03.01.2024.

<sup>95</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 95.

<sup>96</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 95.

#### Szenario 4: Eindringtiefe des Lichtes $\leq 180 \mu\text{m}$

Wenn das Photon tief in das Innere der p-Basis gelangt, erreicht das Elektron die Raumladungszone selten.<sup>97</sup> Die erzeugte Energie kann also auch hier nicht genutzt werden, da sich das Elektron schon außerhalb der Diffusionslänge befindet und so keine Diffusionsenergie das Elektron zum Busbar leitet, bevor es rekombiniert.<sup>98</sup>



Quelle: [https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen\\_6.html#Kapitel4](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/abbildungen_6.html#Kapitel4) abgerufen am 03.01.2024.

## 2.10 Das Back-Surface-Field

Beim Pluspol der Solarzelle befindet sich, wie zuvor schon erwähnt, ein Rückkontakt. Dieser Rückkontakt besteht aus Metall, ist elektrisch leitend, und kann zur Rekombination von Elektronen führen, die im unteren Teil der Zelle, also in der P-Basis, aus ihrer Bindung gerissen wurden.<sup>99</sup> Um die Effizienz einer Zelle möglichst zu steigern, liegt es im Interesse das dies möglichst nicht geschieht. Um das zu verhindern gibt es die Möglichkeit eine stark p-dotierte Schicht hinter die p-dotierte Basis zu setzen.<sup>100</sup> Da die starke p-dotierte Schicht ( $p^+$ ) über eine größere Anzahl an Löchern verfügt, die aufgrund von Diffusionsstrom in die p-dotierte Schicht strömen, bleibt in der  $p^+$  dotierten Schicht eine negative ortsfeste Ladung zurück.<sup>101</sup> Das liegt daran, dass das Bor-Atom ein Proton weniger im Kern hat. Durch die starke Dotierung und den Diffusionsstrom entsteht ein potenzialer Unterschied.<sup>102</sup> Dadurch wiederum entsteht ein elektrisches Feld, das aufgrund der ortsfesten negativen Ladung Elektronen abstößt und so daran hindert, sich zur rekombinieren.<sup>103</sup>

<sup>97</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 95.

<sup>98</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 95.

<sup>99</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 96.

<sup>100</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 96.

<sup>101</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 96.

<sup>102</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 96.

<sup>103</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 96.

## 2.11 Effiziente Absorption von Photonen in der Solarzelle

Das Licht, das auf die Solarzelle trifft, ist die Basis dafür das überhaupt elektrische Energie in der Zelle gewonnen werden kann. Um einen hohen Wirkungsgrad, also wenig Verluste in der Diode bei der Umwandlung der Energie erst einmal zu ermöglichen, ist es wichtig, dass die eintreffende Energie absorbiert wird, damit sie effizient genutzt werden kann.<sup>104</sup> Die Formel um einen Wirkungsgrad zu errechnen ist z.B.:

$$\text{nutzbare Energie} \div \text{eintreffende Energie} = \eta \text{ (Eta)}$$

Das heißt in unserem Fall, man muss die Anzahl der absorbierten Photonen durch die Anzahl der eintreffenden Photonen teilen.<sup>105</sup> Die Zahl, die man anschließend erhält, lässt sich in Prozente umrechnen und man erhält somit den Wirkungsgrad. Damit möglichst ein Großteil der eintretenden Energie umgewandelt werden kann, ist es von Vorteil, wenn die Solarzelle dick genug ist, damit auch Licht mit großer Wellenlänge absorbiert werden kann, wie beispielsweise infrarotes Licht.<sup>106</sup>

## 2.12 Der Quantenwirkungsgrad

Nicht nur hohe Effizienz bei der Absorption ist wichtig für einen hohen Gesamtwirkungsgrad. Auch der Schritt der sich danach abspielt ist von Bedeutung, also in der Diode bei der Entstehung eines Elektronenlochpaares.<sup>107</sup> Bedauerlicherweise können nicht alle entstandenen Elektronenlochpaare zu der benötigten elektrischen Energie beitragen, da sie sich eventuell rekombinieren, bevor der Ladungsträger die Raumladungszone bzw. den Busbar erreichen kann.<sup>108</sup> Dadurch kann maximal nur ein Wirkungsgrad von knapp unter 100 Prozent erreicht werden. Man muss um den internen Quantenwirkungsgrad ermitteln zu können (intern, weil es sich innerhalb der Zelle abspielt) und hierzu folgende Formel benutzen:

$$\text{Anzahl Nutzbare Elektronen} - \text{Lochparre} \div \text{Anzahl auftreffender Photonen.}^{109}$$

---

<sup>104</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 97.

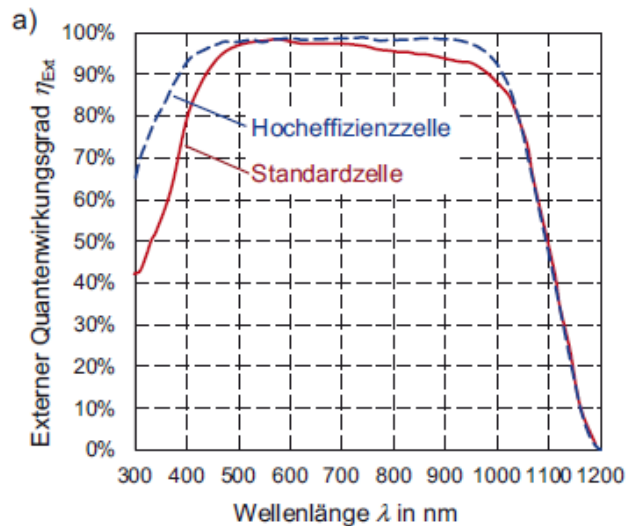
<sup>105</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 97.

<sup>106</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 97.

<sup>107</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 98.

<sup>108</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 98.

<sup>109</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 98.



[https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/auflage\\_6/abbildungen\\_6/Abbildungen%20Lehrbuch-PV\\_f-76\\_1.png](https://www.lehrbuch-photovoltaik.de/auflage_6/abbildungen_6/Abbildungen%20Lehrbuch-PV_f-76_1.png)

abgerufen am 05.01.2024.

Wie man auf der oben abgebildeten Grafik sehen kann, ist der Wirkungsgrad bei ultraviolettem, blauem und Infrarotlicht deutlich niedriger.<sup>110</sup> Das hängt mit der Wellenlänge des Lichtes zusammen. Blaues Licht hat eine niedrige Wellenlänge und somit auch eine niedrige Eindringtiefe in die Photodiode, also die Solarzelle. Wie im Abschnitt Absorption von Licht in der Solarzelle bereits erläutert, rekombiniert sich dort ein Elektron im n-Emitter schnell mit dem entstanden Defektelektron, so kann also keine Energie gewonnen werden.<sup>111</sup> Umgekehrt ist es bei infrarotem Licht: Hier ist die Wellenlänge so lang, dass das entstandene Elektron sofort mit einem Defektelektron rekombiniert, von denen es in der p-Basis nur so wimmelt.<sup>112</sup>

Interessant zu sehen ist jedoch die Kurve der Hocheffizienzzelle, hier fallen die Verluste bei blauem und ultraviolettem Licht deutlich niedriger aus. Das zeigt, das hier durchaus Potenzial besteht, einen höheren Wirkungsgrad zu erreichen.

<sup>110</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 98.

<sup>111</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 98.

<sup>112</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 98.

# 3. Innovation

## 3.1 Innovative Konzepte und Entwicklungen

Es gibt viele innovative Konzepte bezüglich der Solartechnik. Hierzu zählen beispielsweise Tandemzellen, die aus zwei verschiedenen Zellen mit einer unterschiedlichen Bandlücke zusammengesetzt sind.<sup>113</sup> Das eintreffende Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen wird in verschiedenen Bereichen der Zelle absorbiert, kurzwelliges Licht in der ersten Zelle und langwelliges Licht in der zweiten Zelle.<sup>114</sup> Eine weitere Innovation stellen die Perowskit-Solarzellen dar, die hohe Absorptionskoeffizienten und Diffusionslängen aufweisen.<sup>115</sup> Allerdings sind diese oft noch nicht zuverlässig und somit nicht marktreif.<sup>116</sup> Des Weiteren gibt es Bestrebungen, Si-basierte und Perowskit-Solarzellen in Tandem Solarzellen zu kombinieren, da diese sich gut ergänzen.<sup>117</sup> Hier konnte 2022 bei einem Versuch ein Wirkungsgrad von 32.5 % erreicht werden.<sup>118</sup>

Die bisher effizienteste Zelle mit einem atemberaubenden Wirkungsgrad von 47,6 % wurde bei einem Versuch am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) getestet. Die Tandem Zelle besteht aus den Elementen Gallium, Indium, Aluminium, Arsenid und Phosphid.<sup>119</sup> Diese Elemente sind allerdings zum großen Teil sehr selten, bzw. ihr Massenanteil an der Erdhülle ist minimal.

Element	Masse Anteil an der Erdhülle in %
Gallium	0,000014 <sup>120</sup>
Aluminium	7,57 <sup>121</sup>
Arsenid	0,0000055 <sup>122</sup>
Indium	0,0000001 <sup>123</sup>
Phosphor	0,09 <sup>124</sup>

<sup>113</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 139.

<sup>114</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 139.

<sup>115</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 153.

<sup>116</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 153.

<sup>117</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 154.

<sup>118</sup> <https://www.scinexx.de/news/energie/neuer-weltrekord-fuer-tandem-solarzelle/> abgerufen am 08.04.2024.

<sup>119</sup> [Fraunhofer ISE entwickelt effizienteste Solarzelle der Welt mit 47,6 Prozent Wirkungsgrad - Fraunhofer ISE](#) abgerufen am 08.04.2024.

<sup>120</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Gallium> abgerufen am 08.04.2024.

<sup>121</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Aluminium> abgerufen am 08.04.2024.

<sup>122</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Arsen> abgerufen am 08.04.2024.

<sup>123</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Indium> abgerufen am 08.04.2024.

<sup>124</sup> <https://www.chemie.de/lexikon/Phosphor.html> abgerufen am 08.04.2024.

Die Seltenheit dieser Elemente kann dazu führen, dass diese Solarzellen nicht in hoher Stückzahl produziert werden können und dass die Preise solcher Zellen das Budget eines durchschnittlichen Haushalts übersteigen. Trotzdem ist dies ein bahnbrechender Fortschritt, der zeigt, dass PV-Modulen eine blühende Zukunft bevorsteht.

Um den Wirkungsgrad zu verbessern, muss noch erwähnt werden, dass das Fraunhofer ISE eine Antireflexionsbeschichtung (eine Beschichtung, die Reflexionen verschiebt, sodass sie sich auslöschen)<sup>125</sup> und konzentriertes Sonnenlicht verwendet hat.<sup>126</sup> Konzentriertes Sonnenlicht kann durch Konzentrationssysteme entstehen. Konzentrationssysteme spiegeln Sonnenlicht mithilfe von Reflektoren, was zu einem höheren Wirkungsgrad führt.<sup>127</sup> Allerdings ist es diesen Reflektoren nicht möglich, diffuses Licht zu nutzen, was langfristig zu weniger Ertrag führt.<sup>128</sup>

### 3.2 n-typ Solarzellen

Viele der oben genannten innovativen Ansätze haben trotz ihrer Genialität nicht wenige Schwächen. Das kann dazu führen, dass diese noch nicht marktreif sind. N-typ Solarzellen stellen hier eine Ausnahme dar, sie sind bereits am Markt erhältlich und das sehr erfolgreich.

TaiyangNews ist eine Nachrichtenseite, welche über Neuerungen und Entwicklungen in der Solarbranche berichtet.<sup>129</sup> Zu dieser Berichterstattung gehört ein monatliches Ranking des Wirkungsgrades der am Markt verfügbaren Solarzellen. Der Rekordhalter im März 2024 ist die chinesische Firma Aiko mit einem Wirkungsgrad von 24 %.<sup>130</sup> Wenn man sich einen Ausschnitt dieses Rankings anguckt, fällt eines sofort auf: der Wafertyp ist mit nur einer Ausnahme immer der n-typ.

---

<sup>125</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 86.

<sup>126</sup> [Fraunhofer ISE entwickelt effizienteste Solarzelle der Welt mit 47,6 Prozent Wirkungsgrad - Fraunhofer ISE](#) abgerufen am 08.04.2024.

<sup>127</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 157.

<sup>128</sup> Mertens, Konrad, **Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 157.

<sup>129</sup> <https://taiyangnews.info/top-solar-modules-listing-march-2024/> abgerufen am 11.04.2024.

<sup>130</sup> <https://taiyangnews.info/top-solar-modules-listing-march-2024/> abgerufen am 11.04.2024.

# TaiyangNews Top Modules

## Highest Efficient Commercial Solar Modules 3-2024

Rank	Company	Series	Model	Wafer type	Cell Size	Cells No.	Cell Tech	Module Technology	Power (W)	Efficiency (%)
1	<b>AIKO</b>	ABC White hole	AIKO-A620-MAH72Mw	n-type	182	144	ABC	Half-cell, Back Contact	620	24.0
2	<b>LONGI</b>	Hi-MO X6	LR5-72HTH-600M	p-type	182	144	HPBC	Half-cell, Back Contact	600	23.2
3	<b>HUIJASUN</b>	Himalaya	HS-210-B132DS	n-type	210	132	HJT	Bifacial, Half-cell, MBB	715	23.02
4	<b>TW SOLAR</b>	-	TWMHF-66HD715W	n-type	210	132	HJT	Bifacial, Half-cell, MBB	715	23.0
4	<b>Maxeon</b>	Maxeon 6	SPR-MAX6-445-E4-AC	n-type	166	66	IBC	Back Contact	445	23.0
6	<b>ASTROENERGY</b>	Astro N5	CHSM72N(DG)/F-BH	n-type	182	144	TOPCon	Bifacial, Half-cell, MBB	590	22.8
6	<b>TW SOLAR</b>	-	TWMND-72HS590W	n-type	182	144	TOPCon	Half-cell, MBB	590	22.8
6	<b>SPIC</b>	ANDROMEDA 3.0	SPICN6(LDF)-60/BIH	n-type	166	120	TBC	Back Contact, Half-cell, MBB	410	22.8
9	<b>Jinko</b>	Tiger Neo	JKM585N-72HL4-BDV	n-type	-	144	TOPCon	Bifacial, Half-cell, MBB	585	22.65
10	<b>中来股份</b>	Niwa Pro	JW-HD108N	n-type	182	108	TOPCon	Bifacial, Half-cell, MBB	440	22.53
11	<b>risen</b>	Hyper-ion	RSM132-B-700BHGD	n-type	210	132	HJT	Bifacial, Half-cell, MBB	700	22.5
11	<b>Trina</b>	Vertex N	TSM-NEG21C.20	n-type	210	132	TOPCon	Bifacial, Half-cell, MBB	700	22.5
11	<b>DASOLAR</b>	-	DAS-DH156NA	n-type	182	156	TOPCon	Bifacial, Half-cell, MBB	630	22.5
11	<b>JA SOLAR</b>	DeepBlue 4.0 Pro	JAM72D42 630/LB	n-type	182	144	TOPCon	Bifacial, Half-cell, MBB	630	22.5
11	Canadian Solar	TOPHIKu6	CS6W-580T	n-type	182	144	TOPCon	Half-cell, MBB	580	22.5
11	<b>SHANGHAI</b>	Infinity	DM580M10T-B72HSW	n-type	182	144	TOPCon	Bifacial, halfcell, MBB	580	22.5

<https://taiyangnews.info/top-solar-modules-listing-march-2024/> abgerufen am 10.04.2024.

Aber was hat es mit n-typ Solarzellen überhaupt auf sich? Hierbei müssen wir uns noch einmal das Prinzip der n-dotierten und der p-dotierten Schicht angucken. Bisher war es immer so, dass in den Solarzellen die n-dotierte Schicht als Emitter und die p-dotierte als Basis gedient hat. Bei einer n-typ Solarzelle ist das Prinzip genau umgekehrt; die n-dotierte Schicht dient als Basis und die p-dotierte als Emitter.<sup>131</sup> Das führt dazu, dass es gerade am Anfang der Nutzung von der Zelle zu einer geringeren Degradation kommt.<sup>132</sup> Das bedeutet, dass sich der Wirkungsgrad am Anfang der Lebensdauer nicht so stark verschlechtert wie bei herkömmlichen PV-Zellen. Das liegt wohl daran, dass es nicht zu Bor-Sauerstoff-Verbindungen kommt. Da Bor ein Valenzelektron fehlt, neigt es dazu, sich mit Sauerstoff-Atomen zu verbinden. Sobald das passiert ist, verschlechtert sich der Wirkungsgrad.<sup>133</sup>

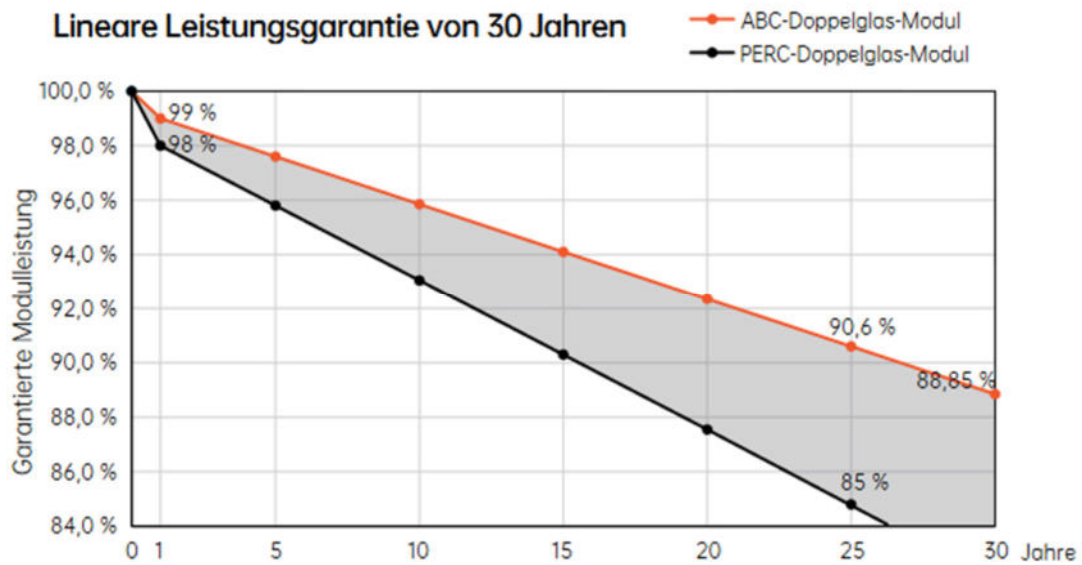
Hier ein Beispiel des Solarherstellers Aiko, der n-typ Zellen (ABC-Doppelglas-Modul) verwendet. PERC-Zellen sind effiziente Zellen, die sich dadurch auszeichnen, auch langwelliges rotes Licht zu absorbieren, das bei herkömmlichen Zellen nicht absorbiert wird.<sup>134</sup> (siehe 2.9 Szenario 4)

<sup>131</sup> <https://www.en-former.com/n-typ-solarzellen-versprechen-hoehere-effizienz/> abgerufen am 11.04.2024.

<sup>132</sup> <https://www.maysunsolar.de/blog/n-typ-vs-p-typ-solarzelle-welches-ist-die-zukunft-der-pv-industrie> abgerufen am 11.04.2024.

<sup>133</sup> <https://www.maysunsolar.de/blog/n-typ-vs-p-typ-solarzelle-welches-ist-die-zukunft-der-pv-industrie> abgerufen am 11.04.2024.

<sup>134</sup> <https://www.innolas-solutions.de/wiki/perc-zellen/> abgerufen am 11.04.2024.



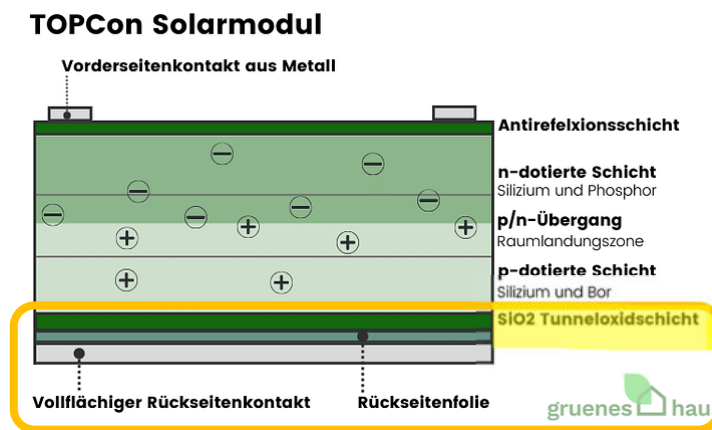
Bildquelle: [file:///C:/Users/User/AppData/Local/Temp/9c82159c-690d-48cb-86e4-6fe26ff314ff\\_AIKO\\_ABC\\_Dual-Glass\\_Module\\_DE.zip.4ff/N-Type\\_ABC\\_module\\_Aiko-A-MAH54Db\\_440-455W\\_DE-LR.pdf](file:///C:/Users/User/AppData/Local/Temp/9c82159c-690d-48cb-86e4-6fe26ff314ff_AIKO_ABC_Dual-Glass_Module_DE.zip.4ff/N-Type_ABC_module_Aiko-A-MAH54Db_440-455W_DE-LR.pdf) abgerufen am 11.04.2024.

Ein weiterer Pluspunkt bei n-typ Solarzellen ist es, dass Phosphor nicht so stark auf metallische Verunreinigungen reagiert wie Bor.<sup>135</sup>

<sup>135</sup> <https://www.en-former.com/n-typ-solarzellen-versprechen-hoehere-effizienz/> abgerufen am 11.04.2024.

### 3.3 TopCon Solarzellen (Tunnel Oxide Passivated Contact) und Tunneleffekt in der Quantenmechanik

Bei herkömmlichen Solarzellen kommt es zu Wirkungsgradeinbußen an den Front- und Rückkontakten, da sich hier Ladungsträger unerwünscht rekombinieren.<sup>136</sup> Das führt dazu, dass die Ladungsträger nicht zur Stromgewinnung beitragen können und so der Wirkungsgrad sinkt.<sup>137</sup> Bei TopCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) wird diese Rekombination durch eine nur wenige Nanometer dicke Schicht aus Siliziumoxid verhindert.<sup>138</sup>



Bildquelle: <https://gruenes.haus/topcon-solarzellen/> abgerufen am 12.04.2024.

Jetzt fragt man sich bestimmt, wie die Elektronen in der Zelle dann überhaupt zum Rückseitenkontakt übertragen werden, damit die umgewandelte Energie genutzt werden kann. Um zu verstehen, wie dies möglich ist, müssen wir noch einmal in einen Blick in die Quantenphysik werfen, speziell auf den Welle-Teilchen-Dualismus (siehe 1.2). Elektronen sind, genauso wie Photonen, Quanten.<sup>139</sup> Quanten haben die Eigenschaft, das man nie wirklich weiß, wo genau sie sich befinden; man kann jedoch die Wahrscheinlichkeit mit der Wellenfunktion errechnen, mit der sich ein Quant an einem gewissen Ort aufhält.<sup>140</sup> Das bedeutet, dass das Quant theoretisch überall sein könnte; jedoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass es an bestimmten Orten ist, deutlich höher.<sup>141</sup> Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit ist von der Amplitude des Quants abhängig.<sup>142</sup> Somit sind Quanten auch in der Lage, Barrieren zu überwinden.<sup>143</sup> Zwar ist die Amplitude vor der Barriere größer, sie ist jedoch auch noch nach der Barriere vorhanden.<sup>144</sup> Dies wird Tunneleffekt genannt.<sup>145</sup>

<sup>136</sup> <https://gruenes.haus/topcon-solarzellen/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>137</sup> <https://gruenes.haus/topcon-solarzellen/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>138</sup> <https://www.solarwatt.de/ratgeber/topcon-zellen-und-module> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>139</sup> <https://www.studysmarter.de/schule/physik/quantenmechanik/tunneleffekt/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>140</sup> <https://www.studysmarter.de/schule/physik/quantenmechanik/tunneleffekt/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>141</sup> <https://www.studysmarter.de/schule/physik/quantenmechanik/tunneleffekt/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>142</sup> <https://www.studysmarter.de/schule/physik/quantenmechanik/tunneleffekt/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>143</sup> <https://www.studysmarter.de/schule/physik/quantenmechanik/tunneleffekt/> abgerufen am 12.04.2024.

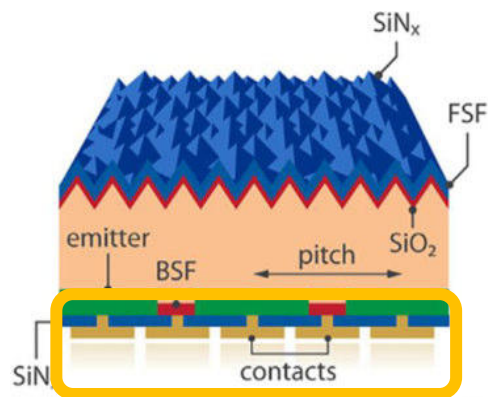
<sup>144</sup> <https://www.studysmarter.de/schule/physik/quantenmechanik/tunneleffekt/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>145</sup> <https://www.studysmarter.de/schule/physik/quantenmechanik/tunneleffekt/> abgerufen am 12.04.2024.

In der Praxis bedeutet das, dass Elektronen die Siliziumoxidschicht durch den Tunneleffekt überwinden können. Da die Schicht nur wenige Nanometer dick ist, geht das auch besser als wenn Sie ein paar Mikrometer dick wäre. So kann der elektrische Strom geleitet werden.<sup>146</sup> Schlussfolgernd lässt sich sagen, die TopCon-Technologie erhöht den Wirkungsgrad, verringert die Degradation und ist vorteilhaft bei schwachem Licht.<sup>147</sup>

### 3.4 IBC Solarzellen (Interdigitated Back Contact)

Die IBC-Technologie steigert, wie die TopCon-Technologie, den Wirkungsgrad. Die Idee ist, die Kontakte auf die Rückseite der Zelle zu verlegen. Das verhindert Verschattungen auf der Vorderseite und bewirkt einen besseren Wirkungsgrad.<sup>148</sup> Auch der Temperaturkoeffizient, also die abfallende Leistung je nach Grad Celsius (über 25 Grad Celsius) ist nicht so hoch wie bei einer vergleichbaren PERC-Zelle.<sup>149</sup> Grundsätzlich lässt sich sagen, dass IBC-Zellen vor allem an Standorten mit hohen Temperaturen mit hoher Leistung punkten können.<sup>150</sup>



Bildquelle: [https://www.pv-magazine.de/wp-content/uploads/sites/4/2023/09/02\\_Webinar-DE-pvmag-091023.pdf](https://www.pv-magazine.de/wp-content/uploads/sites/4/2023/09/02_Webinar-DE-pvmag-091023.pdf)  
abgerufen am 12.04.2024.

<sup>146</sup> <https://gruenes.haus/topcon-solarzellen/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>147</sup> [https://www.pv-magazine.de/wp-content/uploads/sites/4/2023/09/02\\_Webinar-DE-pvmag-091023.pdf](https://www.pv-magazine.de/wp-content/uploads/sites/4/2023/09/02_Webinar-DE-pvmag-091023.pdf)  
abgerufen am 12.04.2024.

<sup>148</sup> <https://www.maysunsolar.de/blog/er-topcon-technologie-fur-solarmodule> abgerufen am 12.04.2024.

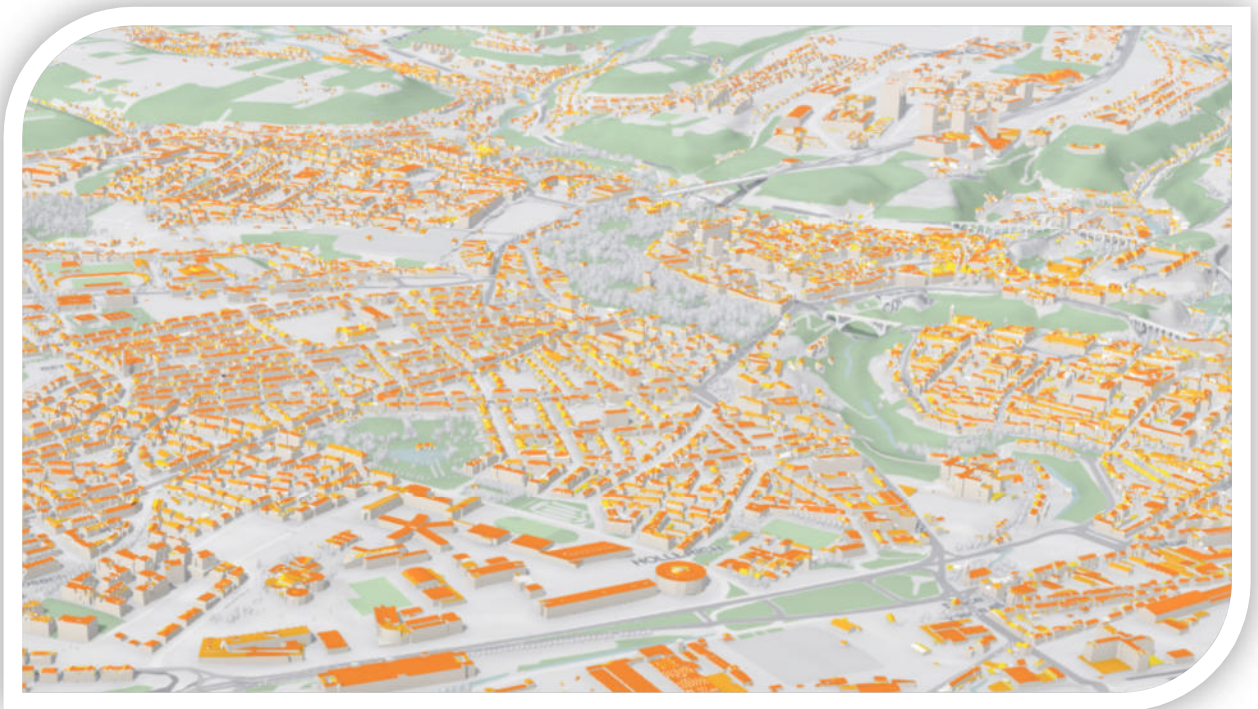
<sup>149</sup> <https://www.pv-magazine.de/unternehmensmeldungen/wie-heben-sich-ibc-solarpanels-in-heissen-umgebungen-ab/> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>150</sup> <https://www.pv-magazine.de/unternehmensmeldungen/wie-heben-sich-ibc-solarpanels-in-heissen-umgebungen-ab/> abgerufen am 12.04.2024.

## 4. Solarkataster und PV-Potenzial in Luxemburg

Die PV-Technik ist bereits ausgereift und verbessert sich durch Innovationen stets. Damit die Energiewende gelingen kann, muss noch stärker auf PV gesetzt werden. Im Jahr 2022 wurde in Luxemburg eine PV-Leistung von 276 GWh<sup>151</sup> ins Stromnetz eingespeist. Vergleicht man diesen Wert mit der eingespeisten elektrischen Leistung im gesamten Netz (6 348 GWh)<sup>152</sup>, besteht durchaus Potenzial für mehr.

Vor allem in der Stadt Luxemburg ist ein großes Potenzial für PV vorhanden. Dies nicht zu nutzen wäre sehr schade. Die luxemburgische Organisation Klima-Bündnis hat errechnet, das durch die Nutzung aller Dachflächen in Luxemburg-Stadt (2.717.902 m<sup>2</sup>) der gesamte Strombedarf des Wohnsektors gedeckt werden könnte.<sup>153</sup> Um dies zu berechnen, wurde das Solarkataster zu Rate gezogen. Das Solarkataster ist eine auf der staatlichen Website Geoportail.lu erhältliche Ansicht des PV-Potenzials in Luxemburg. Hier können sich auch Privatpersonen über das PV-Potenzial ihres Eigenheims informieren.



Bildquelle:

<https://maps.vdl.lu/neo/v1/index.html?webscene=011832c0de4c40c984e7fc452afc57b9&locale=de&activeabout=true>  
abgerufen am 5.11.2023.

<sup>151</sup> <https://assets.ilr.lu/energie/Documents/ILRLU-1685561960-1138.pdf> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>152</sup> <https://assets.ilr.lu/energie/Documents/ILRLU-1685561960-1138.pdf> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>153</sup> <https://www.klimabuendnis.lu/stadt-luxemburg-solarkataster-auf-topographie-lu/> abgerufen am 12.04.2024.

## 5. Fazit

In Zukunft wird PV weltweit eine immer größere Rolle spielen, wenn die Energiewende und somit auch eine klimafreundlichere Zukunft gelingen soll. Um dahin zu gelangen, sind staatliche Subventionen wünschenswert. Dabei sollte besser auf die heimische PV-Industrie geachtet werden. Während noch viel Forschung zum Thema PV in der EU betrieben wird, werden 97 % der Wafer, die weltweit produziert werden, in China hergestellt.<sup>154</sup> Wenn erneuerbare Energien wirklich helfen sollen, wenigstens ein Stück weit unabhängiger von autokratischen Regimen zu werden, muss Europa zumindest einen Teil der Wafer selbst produzieren. Immerhin ist diese Herausforderung bereits bekannt und der *REPowerEU*<sup>155</sup> Plan setzt die Weichen für eine unabhängigere Zukunft.

Abschließend lässt sich sagen, dass man die PV-Technik nicht unterschätzen und sie in Zukunft weiter fördern sollte, da dies der europäischen Wirtschaft zugutekommt. Die PV-Technik hat das Potenzial, durch Innovation noch haltbarer, kostengünstiger und effizienter zu werden. Damit dieser Fortschritt stattfinden kann, müssen auch Investitionen in Forschung und Entwicklung der Solartechnik getätigt werden. Wenn Europa auf dem Gebiet der Solarindustrie wieder konkurrenzfähig werden soll, kann dies nur durch einen maßgeblichen technologischen und qualitativen Vorsprung gelingen.

---

<sup>154</sup> <https://www.fr.de/politik/meyer-energiewende-fotovoltaik-china-abhaengigkeit-solaranlagen-eu-burger-zr-92171564.html> abgerufen am 12.04.2024.

<sup>155</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483> abgerufen am 12.04.2024.

## 6. Literaturverzeichnis

Mertens, Konrad, Photovoltaik. **Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis**, München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl., 2022, S. 64. *(Anmerkung: Wenn Sie sich in die Thematik der PV einarbeiten möchten, ist dieses Buch sehr empfehlenswert.)*

Hoche, Detlef; Küblbeck, Josef; u.a., **Basiswissen Schule: Physik**, Berlin, Duden, 7. aktualisierte Auflage, 2021

Hübscher, Heinrich; Jagla, Dieter; u.a., **Elektrotechnik Grundwissen Lernfelder 1-4**, Köln, Westermann, 6. Auflage, 2021

Southorn, Graham; Sparrow, Giles, **Physik. 100 Konzepte**, Kerkdriel (NL), Libero IBP, 2018