

## HVG-Mitteilung Nr. 2146

### Bedeutung des Eisengehaltes von Deckgläsern für Photovoltaik-Module auf deren Systemeigenschaften

H. Müller-Simon, HVG, Offenbach

Vortrag auf der 83. DGG-Tagung in Amberg

Deckgläser für Photovoltaik-Module müssen verschiedenen Anforderungen gerecht werden. Auf der einen Seite müssen sie die Halbleiterelemente schützen, je nach Aufbau müssen sie für die erforderliche Stabilität der Anordnung sorgen, sie dürfen auf der anderen Seite aber die Versorgung der Photozelle mit Licht nicht einschränken. Die Transmissionseigenschaften des Deckglases können zwar durch einen geringen Eisengehalt grundsätzlich verbessert werden, es macht jedoch wenig Sinn im Rahmen einer nachhaltigen Wirtschaft wertvolle eisenarme Sande für Massenartikel, wie es Photovoltaik-Module ja sein sollten, zu verbrauchen.

Die Leistung eines Photovoltaik-Moduls insgesamt ergibt sich

- aus der Leistung der Photozelle,
- der Intensität der Sonneneinstrahlung und
- den Transmissionseigenschaften des Deckglases.

Diese drei Einflussgrößen sollen im Folgenden betrachtet werden.

#### Leistung der Photozelle

Photozellen sind Dioden deren Stromspannungskurve der typischen Diodencharakteristik gehorchen. Daraus lassen sich die wesentlichen Gebrauchsmerkmale ableiten. Für den Aufbau von Dioden werden zwei Halbleiter mit unterschiedlicher Fermienergie aneinandergesetzt (Bild 1). Dadurch bildet sich im Bereich der Kontaktfläche eine Raumladungszone aus. Photonen mit einer Energie, die größer als die Energie der Bandlücke ist, werden in den Halbleitern absorbiert und erzeugen dabei Elektron-Loch-Paare. Normalerweise rekombinieren diese Elektron-Loch-Paare in relativ kurzer Zeit wieder. Im Bereich der Raumladungszone werden sie jedoch so schnell getrennt, dass sie über einen Verbraucher abgeleitet werden können. Das elektrische Verhalten einer Diode und somit auch einer Solarzelle wird durch die Diodengleichung

$$I(V) = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

mit der elektrischen Ladung  $q$ , dem Strom  $I$  und der Spannung  $V$  beschrieben. Bild 2 zeigt die Kennlinie einer herkömmlichen Diode, sowie zweier Photodioden unter Lichteinstrahlung. Für den Wirkungsgrad einer Photozelle gilt

$$\eta = \frac{P_{\text{elektrisch}}}{P_{\text{optisch}}} = \frac{V_{MPP}}{1000} = \frac{FF J_{sc} V_{oc}}{1000} \quad (2)$$

Mit der Spannung  $V_{MPP}$  im Maximum Power Point (s. Bild 3). D.h. je höher der Formfaktor  $FF$ , der Kurzschlussstrom  $J_{sc}$  und die Leerlaufspannung  $V_{oc}$  sind, desto höher ist der Wir-

kungsgrad der Photozelle. Den Zusammenhang zwischen Kennlinie, Leistung und Formfaktor zeigt Bild 3. Der Formfaktor ist eine Eigenschaft des gewählten Halbleitermaterials und soll hier nicht weiter verfolgt werden.

Um die Leistung einer Photozelle zu maximieren müssen sowohl der Strom als auch die Spannung möglichst hoch sein. Die erreichbare Spannung kann aber nie größer als die Bandlücke werden (s. Bild 1), so dass von dieser Seite die Bandlücke möglichst groß gewählt werden sollte. Umgekehrt können die eingestrahnten Photonen nur Elektronen in das Leitungsband anheben, wenn  $h\nu$  mindestens die Energie der Bandlücke hat. D. h. auf der langwelligen Seite begrenzt die Bandlücke die Ausbeute, weil Photonen mit einer geringeren Energie als der Bandlücke keinen Beitrag zum Photostrom leisten. Die Bandlücken üblicher Photozellen liegen zwischen 1 und 3 eV, was Photonen mit einer Wellenlänge zwischen 1200 und 600 nm entspricht. Der nicht genutzte Anteil ist in Tabelle 1 für einige Halbleiter zusammengestellt. Nach Gleichung 2 nimmt die Leistung einer Solarzelle mit zunehmender Spannung zu. Da die Spannung nicht größer als die Bandlücke sein kann, und umgekehrt die genutzte solare Einstrahlung mit zunehmender Bandlücke abnimmt weist der Wirkungsgrad einer Solarzelle ein Maximum als Funktion der Bandlücke auf. Dieser Zusammenhang ist in Bild 4 dargestellt. Halbleiter im Maximum der Kurve in Bild 4 müssen nicht zwangsläufig die beste Wahl sein, da auch noch Gesichtspunkte wie Verarbeitbarkeit, Preis, räumliche Photonenabsorption etc. für die Effektivität bestimmend sind.

### **Eigenschaften der Einstrahlung**

Der Strom, den ein Solarmodul erzeugt, ist proportional zur von der Sonne eingestrahnten Leistung. Außerhalb der Erdatmosphäre gleicht die Sonne einem schwarzen Strahler mit einer Temperatur von ca. 5800 K. Das Strahlungsmaximum eines solchen Strahlers liegt bei 500 nm. In der Erdatmosphäre wird ein Teil der Strahlung absorbiert, wodurch das Strahlungs-Spektrum der Sonne zum einen eine UV-Kante erhält und zum anderen typische Absorptionsbanden entstehen. Im Infraroten verursachen  $H_2O$ ,  $CO_2$  und  $O_2$  deutliche Absorptionsbanden. Im UV absorbiert hauptsächlich Ozon. Die Hugginsbanden führen zwischen 380 und 300 nm zu einer annähernd linearen Abnahme der eingestrahnten Leistung, bei 290 nm sinkt die Transmission der Erdatmosphäre durch die Hartleybanden auf Null. Der UV-seitige Abfall der Strahlungsleistung des schwarzen Strahlers und die Absorption des Ozons führen zu einem sehr schnellen Verschwinden der solaren Strahlung zwischen 450 und 300 nm. Die Stärke der Absorption hängt von der Weglänge der Strahlung in der Atmosphäre ab. Üblicherweise wird für Vergleiche das AM1,5G-Spektrum herangezogen, das einer Neigung von  $48^\circ$  gegenüber der senkrechten Einstrahlung entspricht. Dieses Spektrum repräsentiert die eingestrahlte Sonnenleistung in den mittleren Breitengraden (Bild 5).

### **Einfluss der Deckgläser**

Die Strahlungsintensität wird durch die Deckgläser auf zwei Arten beeinflusst:

- durch Reflexion an der Oberfläche und
- durch Absorption im Inneren.

Die Reflexion für senkrecht einfallende Strahlung hängt entsprechend der Gleichung

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (3)$$

von der Brechzahl ab. D. h. Gläser mit einer höheren Brechzahl haben geringere Reflexionsverluste an der Oberfläche. Weitaus effektiver als eine Änderung der Brechzahl über die Glaszusammensetzung sind jedoch Antireflex-Schichten auf der Oberfläche, die die Reflexionsverluste auf weniger als 1 % absenken. Das gilt für die Grenzfläche Luft/Glas. Weitaus größere Reflexionsverluste treten an der Grenzfläche Glas/Halbleiter auf, da die gängigen Halbleitermaterialien im Bereich der solaren Einstrahlung Brechzahlen zwischen 4 und 7 haben. Auch hier kann mit AR-Schichten eine Verbesserung des Wirkungsgrades erzielt werden.

Die Absorptionsverluste im Inneren des Glases werden in erster Linie durch die Verunreinigung mit Eisen hervorgerufen. Eisen führt in zwei Bereichen der Sonneneinstrahlung zu Verlusten, im UV-Bereich zwischen 350 und 420 nm durch das dreiwertige Eisen und zwischen 800 und 1200 nm durch das zweiwertige Eisen.

Beide Eisenspezies liegen außerhalb des Haupteinstrahlungsbereiches der Sonne. Bild 6 zeigt in einem Diagramm das AM 1,5 G-Spektrum, das Transmissionsspektrum eines besonders eisenarmen Floatglases und das Transmissionsspektrum eines Fensterglases. Die Absorptionsbanden des  $\text{Fe}^{3+}$  liegen bei den gleichen Wellenlängen wie die des Ozon. Im Infrarotbereich zeigt sich ein ähnliches Bild für die  $\text{Fe}^{2+}$  Bande. Diese überlagert sich mit dem Abfall der Strahlungsleistung des schwarzen Strahlers und der Absorption durch die Bandlücke. In Bild 7 wurde versucht durch Simulation des Transmissionsspektrums eisenhaltiger Gläser den Einfluss des  $\text{Fe}^{2+}$  und des  $\text{Fe}^{3+}$  zu trennen. Der Verlust in der Strahlungsleistung ist als Funktion der  $\text{Fe}^{2+}$ - bzw.  $\text{Fe}^{3+}$ -Konzentration aufgetragen. Als weiterer Parameter wurde die Bandlücke betrachtet. Die Eisengehalte herkömmlicher Fenstergläser variieren zwischen 0,05 und 0,13 Gew.-%. In diesem Bereich verliert man durch  $\text{Fe}^{3+}$  2 – 3 % der Strahlungsleistung und durch  $\text{Fe}^{2+}$  7 – 30 % der Strahlungsleistung. Floatgläser enthalten üblicherweise  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  im Verhältnis 1/4. Nach Bild 7 liegen die Strahlungsverluste für Gesamteisenkonzentrationen von 0,05 – 0,13 % für diese Gläser bei 5 – 8 %.

In Floatgläsern stellt sich das  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnis primär durch die Zugabe an reduzierenden Komponenten mit dem Gemenge und die Wechselwirkung mit dem Schwefel ein. Es ist aber auch bekannt, dass die Zugabe weiterer polyvalenter Elemente geeignet ist, das  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnis in die eine oder andere Richtung zu verschieben [2]. Photodioden mit kleiner Bandlücke nutzen die Photonen im Bereich der  $\text{Fe}^{2+}$ -Bande. In diesen Gläsern sollte das  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnis möglichst klein sein. Hier ist eine kombinierte Schwefel/Antimon-Läuterung zu empfehlen bei der durch das Antimon eine zusätzliche Entfärbung erfolgt. Photodioden mit großer Bandlücke nutzen den Bereich der  $\text{Fe}^{2+}$ -Bande nicht. Dadurch machen sich die Verluste in der Nähe UV-Kante stärker bemerkbar. In diesem Fall sollten die Gläser möglichst reduzierend mit Schwefel geläutert werden. Möglicherweise können Zink oder Zinnzugaben eine weitere Erhöhung des  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnisses bewirken. Der Wirkungsgrad einer Photozelle sinkt mit zunehmender Temperatur des Halbleiters. Bei Halbleitern mit großer Bandlücke würde längerwellige Strahlung ausschließlich zu einer Erwärmung der Photozelle führen. In diesem Fall wäre ein Deckglas, das bei größeren Wellenlängen absorbiert von Vorteil, da ein Teil der nicht genutzten Strahlung vom Deckglas wieder an die Umgebung abgegeben wird, sei es durch Strahlung oder Konvektion an der Oberfläche.

## Ökonomische Aspekte

Ein wesentlicher Kostenfaktor, der in Zukunft sicher noch an Bedeutung gewinnen wird, ist die Beschaffung eisenarmer Rohstoffe. Aus diesem Grund ist es wichtig, eisenarme Deckgläser nicht als Dogma hinzunehmen, sondern abzuschätzen, welche Vor- und Nachteile einzelne Änderungen im Gesamtaufbau eines Solarmoduls erbringen. Betrachtet man die spezifischen Modul-Preise, so fällt auf, dass ein höherer Preis nur bis zu einem gewissen Punkt auch eine äquivalente Ertragssteigerung bedeutet. Nimmt man an, dass in Bild 7 die höheren Preise grob einen höheren Aufwand bei der Herstellung repräsentieren, so ist der Zusammenhang zwischen Ertragssteigerung und Preissteigerung der Module offensichtlich nicht linear. Die gestrichelte Linie in Bild 7 kennzeichnet den Verlauf, bei dem sich eine Kostenerhöhung nach 20 Jahren gerade amortisiert. Es sollte möglich sein, etwa durch Variation des  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnisses auch bei Eisenkonzentrationen von 0,05 bis 0,15 % im Deckglas Solar-Module herzustellen, die keine nennenswerten Einbußen in der Ausbeute aufweisen. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass bei einem Wirkungsgrad der Solarzelle von 10-20 % (Si-Zellen) eine Minderung der Einstrahlung aufgrund einer erhöhten Eisenkonzentration um 1 % den Gesamtwirkungsgrad nur um 0,1 bis 0,2 % mindert.

## Literatur

- [1] Würfel, P.: Physics of Solar Cells. Weinheim: Wiley-VCH 2009.
- [2] Müller-Simon, H.: Elektronenaustausch zwischen Paaren polyvalenter Elemente in technischen Gläsern und seine Auswirkungen auf die industrielle Glasherstellung. Offenbach: Verlag der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft 2007.

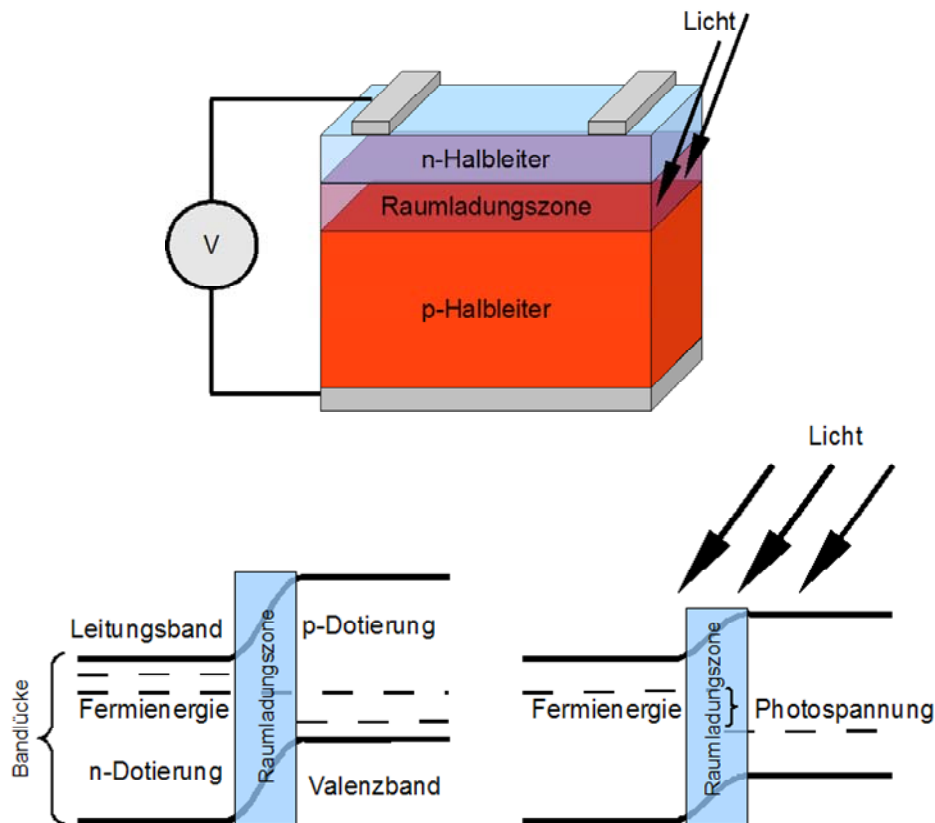


Bild 1: Aufbau einer Photodiode.

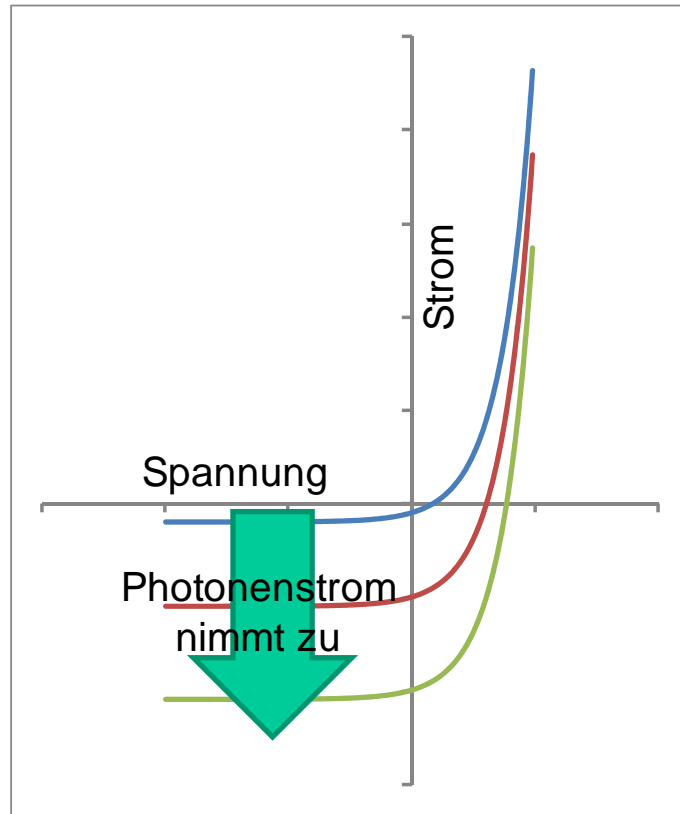


Bild 2: Kennlinie einer Photodiode.

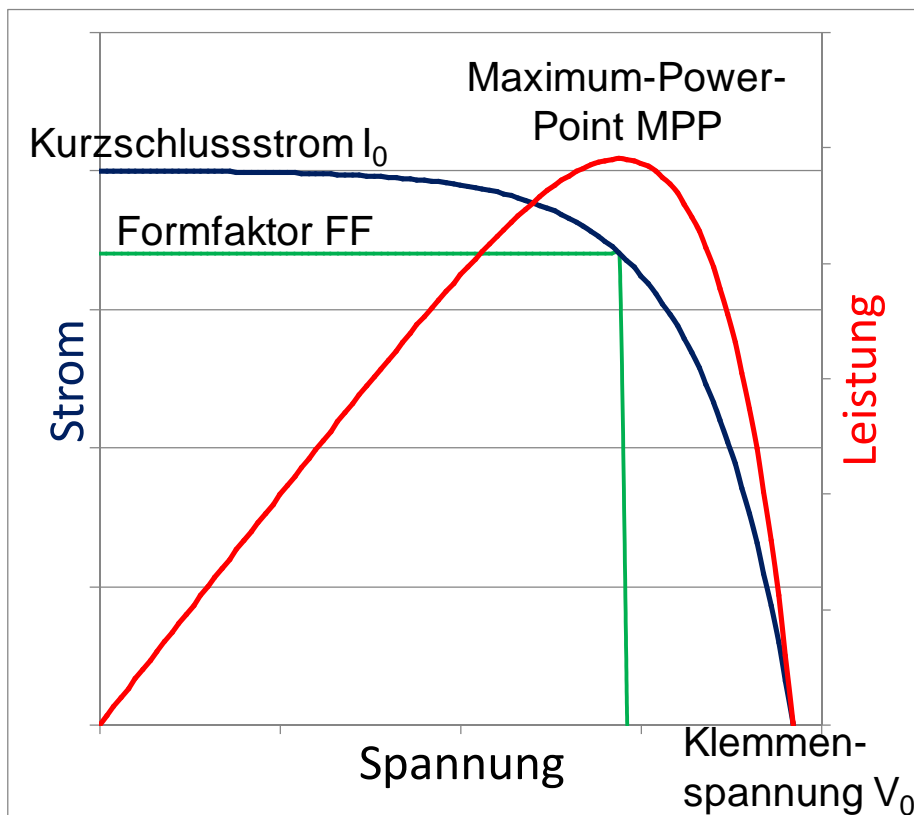


Bild 3: Zusammenhang zwischen Kennlinie, Leistung und Formfaktor einer Photodiode.

## Eisengehaltes in Deckgläsern für Photovoltaik-Module

Halbleiter	Bandlücke in eV	abgeschnittene Wellenlänge in nm	ungenutzte Strahlung in %
CuInSe <sub>2</sub>	1.05	1180	17
Si	1.12	1107	20
InP	1.24	1000	23
GaAs	1.42	873	33
CdTe	1.45	855	35
CuInS <sub>2</sub>	1.52	816	39
Si amorph	1.8	690	51

Tabelle 1: Aufgrund der Bandlücke nicht genutzte solare Strahlung.

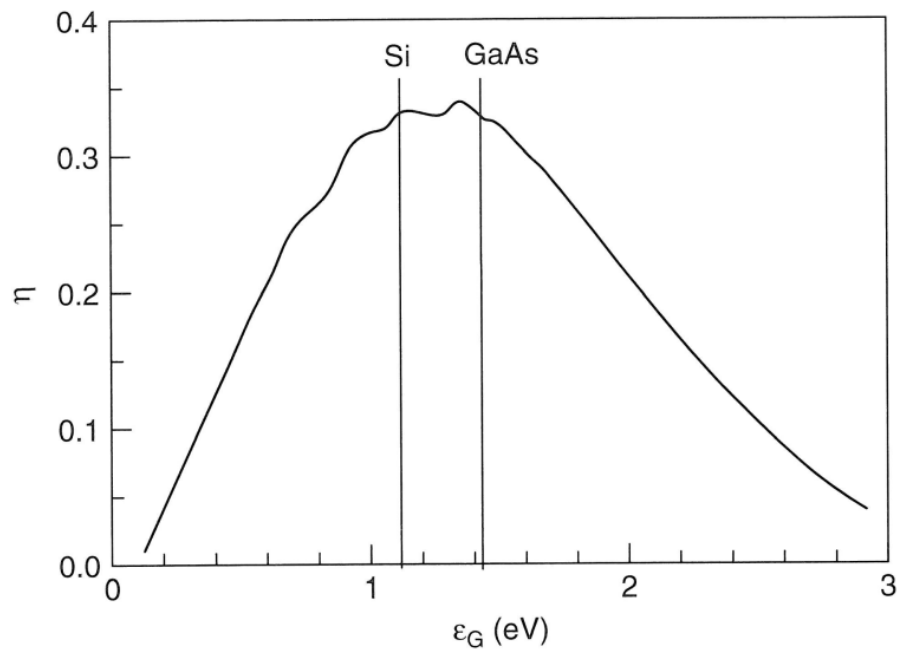


Bild 4: Wirkungsgrad von Solarzellen als Funktion der Bandlücke.

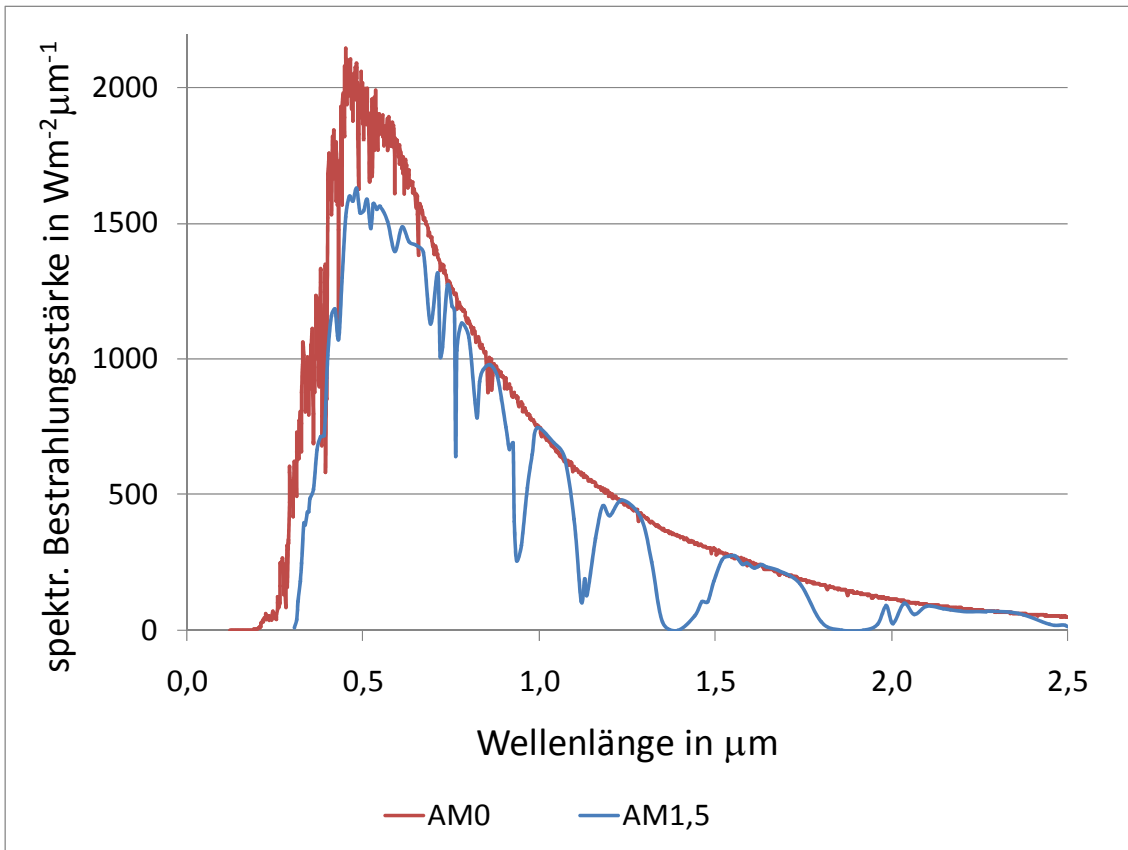


Bild 5: Solare Einstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre (AM0) und in mittleren Breiten nach Durchqueren der Erdatmosphäre.

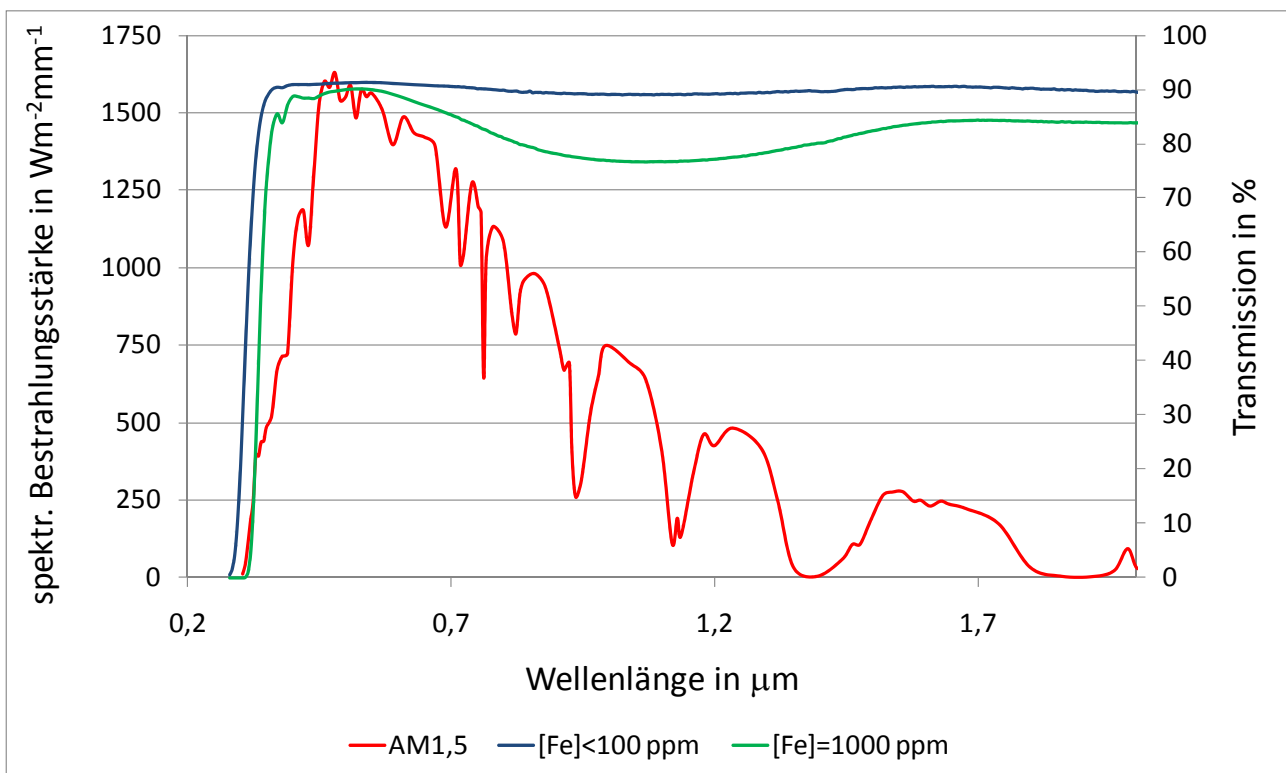


Bild 6: AM1,5G-Spektren und Transmissionsspektren eines Fensterglases und eines eisenarmen Floatglases.

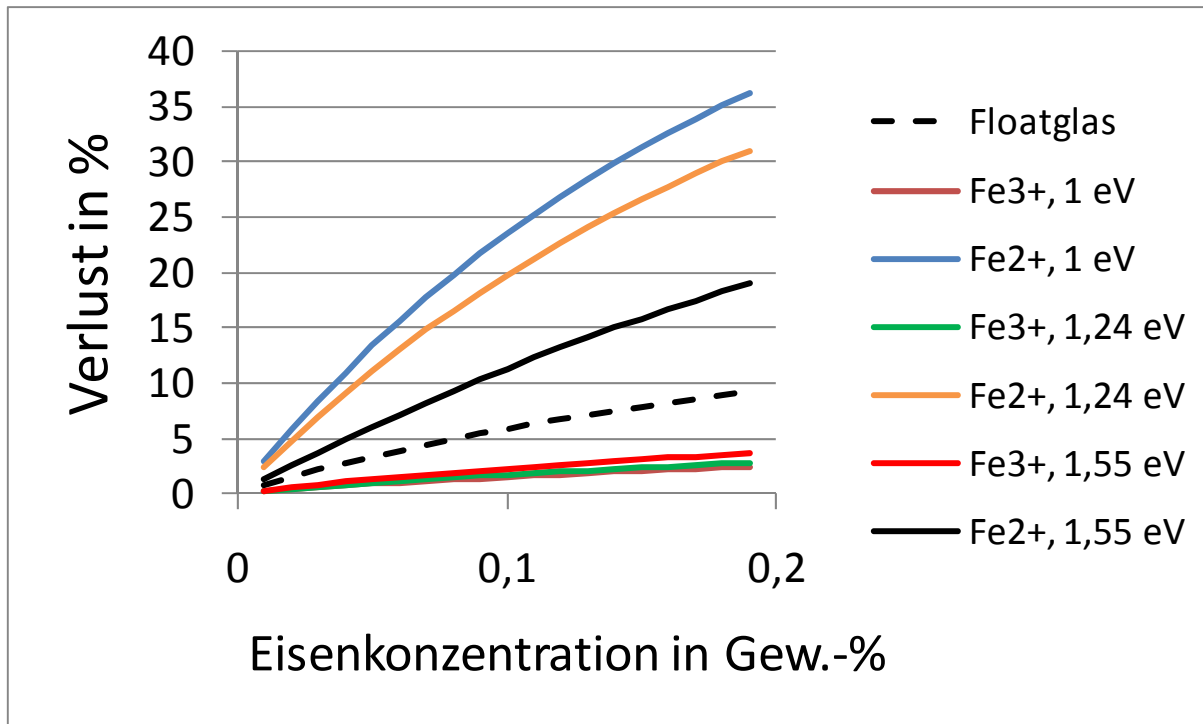


Bild 7: Verluste der solaren Einstrahlung durch ein Floatglas (4 mm) für verschiedene Fe<sup>2+</sup> und Fe<sup>3+</sup>-Konzentrationen.

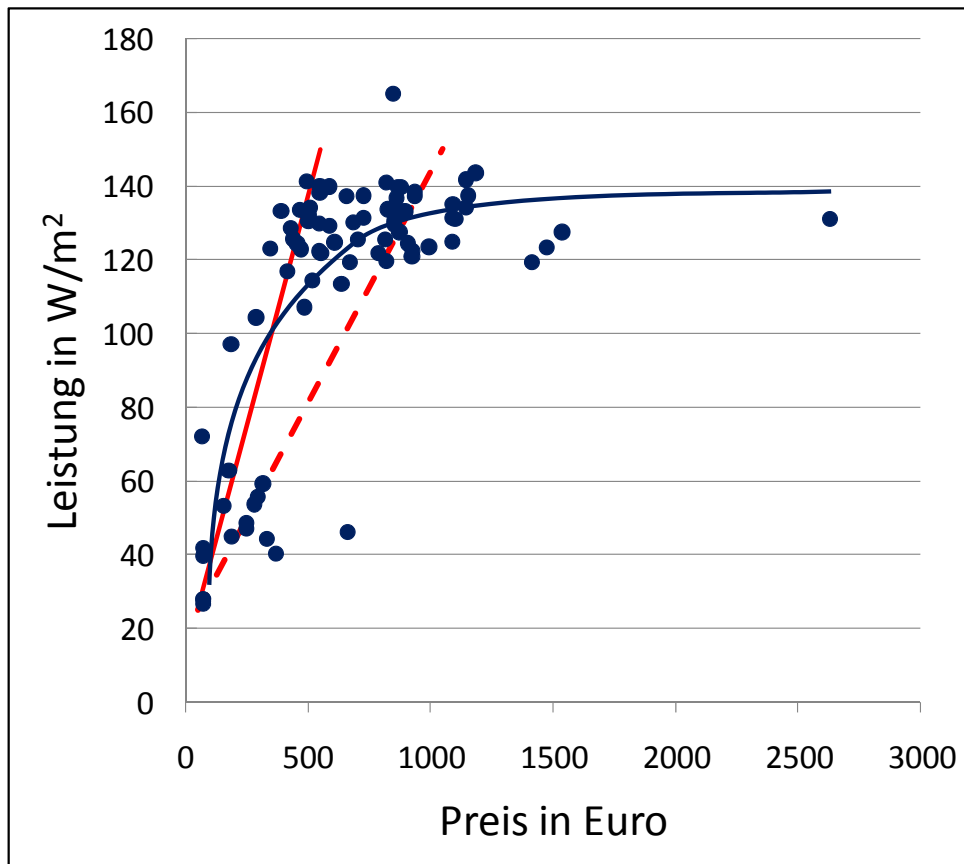


Bild 8: Zusammenhang zwischen Modulpreis und spezifischer Leistung (Quelle: Photon 8/2009).