



“Clean Energy in Michigan” Series, Number 12

# Facts about solar panels: PFAS contamination

By Dr. Annick Anctil, Michigan State University

## Q: Do solar panels contribute to PFAS contamination?

Multiple states have raised concerns about PFAS contamination from solar farms, largely citing academic research on how PFAS could *potentially* be used in photovoltaic (PV) solar panels.<sup>1</sup> The fact is that PFAS is *not* customarily used in solar panels because safer, effective alternatives have already been developed and commercialized. Moreover, no studies have shown the presence or leaching of PFAS from PV panels—either while they are in active use or at the end of their life (e.g., in a landfill).

## Anatomy of a solar panel

These three parts of a solar panel cause confusion about the presence of PFAS.

### Self-Cleaning Coat

A self-cleaning coating on the top of a solar panel helps reduce dust, pollen, and snow adhesion, extending both the power output and the lifetime of the panel.<sup>2</sup> Multiple self-cleaning coating options are available on the market, many of which make use of non-hazardous silicon-based chemistry.<sup>3</sup> Confusion comes from the fact that some other commercialized self-cleaning coating options do make use of PFAS-based chemicals, although even those do not degrade under normal use.

### Adhesives

PV panels are sealed from the elements to maximize power output and lifetime. While PFAS chemicals are found in certain adhesives, such as carpentry glues, they are not typically used in sealant adhesives for solar panels.<sup>4</sup> Instead, solar adhesives are based on silicone polymers, which are well known for their lack of negative health impacts and remarkable stability.<sup>5</sup>

### Substrate

PV modules are housed in a weather-resistant substrate that offers additional protection from the elements. Thin-film PV units use glass as the substrate, while crystalline silicon PV units use a polymer substrate, which has led to the rumors of

Solar Panels. Photo by Mariana Proenca on Unsplash.



MICHIGAN DEPARTMENT OF ENVIRONMENT, GREAT LAKES, AND ENERGY



GRAHAM SUSTAINABILITY INSTITUTE UNIVERSITY OF MICHIGAN

## Acknowledgement

This material is based upon work supported by the Department of Energy and the Michigan Energy Office (MEO) under Award Number EE00007478.

The Clean Energy in Michigan series provides case studies and fact sheets answering common questions about clean energy projects in Michigan.

Find this document and more about the project online at [graham.umich.edu/climate-energy/energy-futures](http://graham.umich.edu/climate-energy/energy-futures).

potential PFAS use in solar panels. The most common polymer used in silicon PV units is Tedlar, a weather resistant polymer that is not a PFAS compound itself and makes no use of PFAS during its manufacturing process.<sup>6</sup> Far more common materials, like those used in construction projects and weather resistant fabrics, present a higher risk of PFAS exposure than PV. In fact, a recent study found that these more common materials release PFAS under conditions where solar panels do not, indicating that PFAS exposure risk may be higher sitting on outdoor furniture, for example, than living next to a solar farm.<sup>7</sup>

## What is PFAS anyway?

Per/Poly Fluoro-Alkyl Substances, PFAS for short, are a class of chemical compounds. PFAS are used in several industries for their unique properties, notably their ability to create coatings that are highly water repellent.

PFAS are extremely persistent within the environment, not breaking down over time. Certain PFAS compounds have been linked to human health issues—notably low infant birth weights, increased risk of certain cancers, and thyroid issues. As a result of their persistence and toxicity, those PFAS compounds that pose a significant risk have been banned from use and production, and subsequently replaced with safer alternatives.

It's important to note that not all PFAS compounds are dangerous. Some PFAS compounds, such as Teflon, are much more stable and present no risk to human health under normal conditions of use.<sup>8</sup>

- 
- 1 S. Maharjan *et al.*, "Self-cleaning hydrophobic nanocoating on glass: A scalable manufacturing process," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 239, Jan. 2020.; . Son *et al.*, "A practical superhydrophilic self cleaning and antireflective surface for outdoor photovoltaic applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2012.; H. C. Han *et al.*, "Enhancing efficiency with fluorinated interlayers in small molecule organic solar cells," *J. Mater. Chem.*, vol. 22, no. 43, 2012.
  - 2 "How a solar cell works – American Chemical Society." [Online]; H. C. Han *et al.*, "Enhancing efficiency with fluorinated interlayers in small molecule organic solar cells," *J. Mater. Chem.*, vol. 22, no. 43, 2012.; M. Simon and E. L. Meyer, "Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*. pp. 106–113, 2010.
  - 3 "Say Goodbye To Solar Panel Cleaning | Ultimate Efficiency | Solar Sharc®." [Online].
  - 4 "Electronics Product Catalog | Dow Inc." [Online]; B. J. Henry *et al.*, "A critical review of the application of polymer of low concern and regulatory criteria to fluoropolymers," *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 14, no. 3. pp. 316–334, May-2018.
  - 5 "Electronics Product Catalog | Dow Inc."; "Properties of Silicones." [Online]; A. M. Bueche, "The curing of silicone rubber with benzoyl peroxide," *J. Polym. Sci.*, vol. 15, no. 79, pp. 105–120, Jan. 1955.
  - 6 M. H. Alaaeddin, S. M. Sapuan, M. Y. . Zuhri, E. . Zainudin, and F. M. AL-Oqla, "Polyvinyl fluoride (PVF); Its Properties, Applications, and Manufacturing Prospects," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 538, p. 012010, Jun. 2019.
  - 7 R. M. Janousek, S. Lebertz, and T. P. Knepper, "Previously unidentified sources of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances from building materials and industrial fabrics," *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 21, no. 11, pp. 1936–1945, Nov. 2019.
  - 8 "Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) | US EPA." [Online].; B. J. Henry *et al.*, "A critical review of the application of polymer of low concern and regulatory criteria to fluoropolymers"



LfL, Institut Agrarökologie, Lange Point 12, 85354 Freising

c/o Frank Bohne,  
Director, Kronos Solar Projects GmbH  
Petersplatz 10  
D-80331 München

To whom it may concern

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

**Institut für Ökologischen Landbau,  
Bodenkultur und Ressourcenschutz**

**Lange Point 12  
85354 Freising**

<http://www.LfL.bayern.de/>

Telefon: 08161714469  
Telefax: 08161714006  
E-Mail: [titus.ebert@LfL.bayern.de](mailto:titus.ebert@LfL.bayern.de)

Ihr Zeichen: E-Mail vom 10.01.2014  
Unser Zeichen: 7308/246

Datum: 13.01.2014

## **pollutants in photovoltaic power plants**

Dear Sir or Madam,

the solar park developer Kronos Solar Projects GmbH has requested for an assessment of potential pollution run-off from crystalline solar PV panels in large-scale solar parks.

In 2011 the `Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft` (Bavarian State Research Center for Agriculture), a public institute of the state of Bavaria has made a literature study about potential pollution caused by solar farms on agricultural land (<http://www.bodenschutzdigital.de/ZBOS.03.2011.069>).

This study concluded that the potential of a pollution run-off from intact crystalline solar PV panels is considered very low. Due to the encapsulated design of the panels, the stationary panels will not cause any pollution-run-off.

Only in instances in which panels have been damaged by extraordinary forces, such as fire, hail or vandalism, a potential run-off of small amounts of silver, tin or lead particles may be possible and therefore it is suggested to replace the panels as a preventative measure for soil protection. This is however also in the interest of the solar park operator, as damaged panels do not produce energy.

...

It is important to note that solar panels are designed to resist usual natural forces, such as sun, thunderstorms, and hail.

In regards to other components of solar parks, such as ground-mounted systems, inverters and transformers, and electrical components, its potential of a pollution run-off is considered very low.

I want to emphasize that we are not aware, or have seen any past cases in which crystalline intact solar panels have caused pollution run-off.

Best Regards,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Titus Ebert". The signature is stylized and cursive.

M. Sc. Titus Ebert,

Freising, Germany, January 14th 2014

# Sind Schadstoffe in Photovoltaik-Freiflächenanlagen eine Gefahr für den Boden?

T. Ebert, C. Müller

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Lange Point 12, 85354 Freising

E-Mail: [Titus.Ebert@Lfl.bayern.de](mailto:Titus.Ebert@Lfl.bayern.de)

**Abstract:** *Since 2004 many photovoltaic power plants were built on arable land, supported and financed by government aid. Usually only 30 – 40 % of the plant area is covered with solar-modules. The grass, that grows between the rows of modules will be mowed or grazed. It had to be proved by a literature research, whether the soil will be contaminated by heavy metals (esp. cadmium and lead) on such plants.*

**Zusammenfassung:** *Viele Photovoltaik(PV)-Freiflächenanlagen sind seit 2004 aufgrund der staatlichen Förderung entstanden. Da die Flächen nur zu 30 – 40 % mit Photovoltaik-Modulen bedeckt sind, kann sich zwischen den Reihen eine Grasnarbe ausbilden, die gemäht oder beweidet wird. Eine Literaturstudie sollte herausfinden, ob bei solchen Anlagen Schwermetallbelastungen (v. a. Cadmium und Blei) des Boden zu erwarten sind.*

Keywords: photovoltaic power plant, lead, cadmium, cadmiumtelluride, silicon solar modules, thin-film solar modules, soil protection;

Schlagworte: Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Blei, Cadmium, Cadmiumtellurid, Silizium-Solarmodule, Dünnschichtmodule, Bodenschutz;

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Aufgrund der staatlichen Förderung seit 2004 sind sehr viele Photovoltaik(PV)-Freiflächenanlagen auf landwirtschaftlichen Flächen entstanden. Ende 2010 schätzte die Bundesnetzagentur, dass auf ca. 2500 ha ehemals landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern (ca. 0,1 % der Ackerfläche Bayerns) Strom durch Photovoltaik erzeugt wird (BAYERISCHER AGRARBERICHT 2012, neuere Zahlen liegen uns nicht vor).

Seit 1. Juli 2010 haben aber nur noch Freiflächen-Solarparks auf bereits versiegelten Flächen, auf Konversionsflächen (z. B. ehemaliges Militärgelände, Deponieflächen) und innerhalb eines 110 m Streifens längs von Autobahnen oder Schienenwegen Anspruch auf Einspeisevergütung nach EEG.

Da bei Photovoltaik(PV)-Freiflächenanlagen die Anlagenfläche in der Regel nur zu 30 bis 40 % mit PV-Modulen bedeckt ist, kann sich zwischen den Reihen eine Grasnarbe ausbilden, die gemäht oder von Schafen beweidet werden kann. Auch eine Freilandtierhaltung mit Geflügel, Rindern oder Pferden ist bei entsprechender technischer Anpassung der Höhe der PV-Module und der Robustheit der Aufständungen möglich. Im Zusammenhang mit der Nutzung solcher Flächen wurde die Frage aufgeworfen, ob aus den in Modulen und Lötstellen enthaltenen Schwermetallen (v. a. Cadmium und Blei) Belastungen des Bodens resultieren.

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Literaturstudie mit Literaturliste findet sich in EBERT & MÜLLER (2011).

## 2 Arten von Solarmodulen

Am meisten verbreitet sind **kristalline Silizium-Module** (Marktanteil 2011 ca. 88 %), gefolgt von **Dünnschicht-Modulen**. Als Halbleiter dient mono- oder (poly)multikristallines Silizium. Je nach Kristallaufbau weisen die Silizium-Einzelzellen (Wafer) Schichtdicken von 100 oder mehr µm auf.

Bei Dünnschicht-Modulen wird im Gegensatz zu kristallinen Silizium-Modulen der Halbleiter als rund 2 – 10 µm dünne Schicht flächig auf ein geeignetes Trägermaterial (Glas, Metall oder Kunststoff) aufgebracht. Als Halbleiter sind amorphes und mikrokristallines Silizium oder Nicht-Silizium-Verbindungen im Einsatz.

Bei **Nicht-Silizium-Halbleiter-Modulen** besteht die Halbleiterschicht aus unterschiedlichsten Materialien z. B. Cadmiumtellurid (CdTe), Cadmiumsulfid (CdS) oder Kupfer-Indium-(Gallium)-Schwefel-Selenverbindungen (CIS/CIGS). Am weitesten verbreitet sind die CdTe-Module (Marktanteil 2011 ca. 5,5 %).

### 3 Schadstoffe in Solarmodulen

Bei Solarmodulen auf Siliziumbasis ist der Halbleiter nur mit wenigen (Größenordnung  $10^{-5}$ ) Fremdatomen wie Bor, Indium, Aluminium, Gallium, Phosphor, Arsen oder Antimon dotiert. Nicht-Silizium-Halbleiter-Module enthalten v. a. Cadmiumtellurid und geringe Mengen Cadmiumsulfid als Halbleiter.

Für die elektrische Funktionsfähigkeit und die Verbindung der Einzelzellen zu einem Modul ist bei allen Typen von Solarzellen eine Vorder- und Rückseitenkontaktierung erforderlich. Bei kristallinen Silizium-Modulen werden hierzu Metallisierungspasten aufgebracht, die Silber, Aluminium und Bleioxid (in der Glasfritte) enthalten. Für die Verlotung der Einzelzellen zum Gesamtmodul werden Zinn-Blei-Lote eingesetzt. Bei Dünnschichtmodulen erfolgt die Kontaktierung meist mittels Zinn- oder Zinkoxiden, Aluminium, Silber oder Molybdän.

Von den in Solarmodulen enthaltenen Stoffen sind besonders Cadmium und Blei umweltrelevant.

Die Schichtdicke derzeit erhältlicher **CdTe-Solarmodule** liegt bei 2 – 4 µm CdTe und 0,1 – 0,2 µm CdS. Unter Abzug nicht beschichteter Randflächen (nur ca. 80 % der Modulfläche ist mit Halbleiter beschichtet) errechnen sich ca. 12 – 17 g CdTe und 0,4 – 0,6 g CdS je m<sup>2</sup> Modulfläche. Damit ergeben sich für eine Freiflächen-PV-Anlage mit CdTe-Modulen ca. 6 – 9 g Cd je m<sup>2</sup> Modulfläche.

Bei einer durchschnittlichen Modulfläche von 3000 m<sup>2</sup>/ha stehen also rund 18 – 27 kg Cd auf einem ha.

Die Schichtdicken der CdS- und CdTe-Schichten haben sich in den letzten Jahren stark vermindert, an effektiveren noch dünneren Halbleiterschichten wird geforscht.

Bei **kristallinen Silizium-Solarmodulen** wird in 30 – 50 % der Fälle auf die Zellrückseite eine bleihaltige Metallisierung aufgebracht. Je nach Art der Rückseitenmetallisierung ergeben sich 1 – 2 kg Pb/ha (Zellvorder- und -rückseite Silber basiert) bzw. 4 – 6 kg Pb/ha (Zellvorderseite Silber basiert, -rückseite Al basiert) (siehe EBERT & Müller, 2011).

Weiter ist Blei in den Blei-Zinn-Loten zum Verlöten der Silizium-Einzelzellen zum Gesamtmodul enthalten (10 g Blei je Modul, 100 x 160 cm).

Je nach eingesetztem Kontaktierungsmittel ergeben sich damit bei einer durchschnittlichen Modulfläche von 3000 m<sup>2</sup> 19 – 25 kg Pb/ha.

Aus Umweltschutzgründen kommen in letzter Zeit vermehrt bleifreie Kontaktierungen und Lote zum Einsatz.

### 4 Gefährdungspotenzial intakter Solarmodule

Im Hinblick auf die Abschätzung des Gefährdungspotentials, das von intakten Solarmodulen für den Boden ausgeht, sind v. a. Bindungsform und Wasserlöslichkeit der enthaltenen Schwermetalle sowie der Aufbau der Module (Schutz vor Witterungseinflüssen) entscheidend. Das in **CdTe-Modulen** enthaltene Cadmium liegt nicht elementar, sondern als CdTe bzw. CdS

gebunden vor. Diese Verbindungen sind äußerst stabil und sehr gering wasserlöslich. Da die Halbleiterschicht, samt Kontakten und Verbindern, von einer Glasverbundfolie sowie einer Front- und Rückglasscheibe umgeben ist, ist sie nicht unmittelbar der Witterung ausgesetzt. Daher ist ein Cadmiumeintrag von intakten Modulen in den Boden nach derzeitigem Kenntnisstand bauartbedingt nicht zu erwarten.

**Kristalline Silizium-Module** werden ebenfalls laminiert und außerdem zusätzlich von einer Frontglasscheibe abgedeckt, besitzen meist aber keine zusätzliche Rückglasabdeckung. Bei kristallinen Silizium-Modulen ist das in den Metallisierungspasten und Lötstellen enthaltene Blei also nicht unmittelbar der Witterung ausgesetzt. Ein direkter Bleieintrag von intakten Modulen in den Boden ist daher ebenfalls nicht zu erwarten.

## 5 Gefährdungspotenzial von beschädigten/zerstörten Solarmodulen

Oft wird die Frage gestellt, ob bei einer Beschädigung/Zerstörung der Solarmodule z. B. durch Hagel oder Brand Cadmium oder Blei freigesetzt werden und damit in den Boden oder die Pflanzen gelangen kann. Hierzu finden sich in der Literatur v. a. Elutionsversuche, die im Zusammenhang mit Deponierung oder Recycling von Solarmodulen durchgeführt wurden.

### 5.1 Verfügbarkeit von Cadmium und Blei – Ergebnisse von Elutionsversuchen

Vom geotechnischen Institut, Norwegen (NGI) wurden 2010 Auslaugungsversuche mit Bruchstücken von CdTe-Modulen und multikristallinen Siliziummodulen (mc-Si) durchgeführt. Die auf < 4 mm zerkleinerten CdTe-Module wiesen einen Gesamtgehalt von 383 mg Cd/kg CdTe-Modulmaterial, die ebenfalls auf < 4 mm zerkleinerten Siliziummodule einen Gesamtgehalt von 576 mg Pb/kg mc-Si-Modulmaterial auf. Mittels deionisiertem Wasser durchgeführte Schüttel- und Säulenversuche ergaben geringe Cadmium- bzw. Bleigehalte. Demgegenüber wies der zur Bestimmung des maximalen Auslaugungspotentials durchgeführte Elutionsversuch erheblich höhere Cadmium- bzw. Bleiwerte auf mit einem deutlichen Anstieg bei abnehmendem pH-Wert (siehe EBERT & Müller, 2011).

Aufgrund der Versuchsanstellung stellen die mit < 4 mm Bruchstücken am NGI durchgeführten Untersuchungen jedoch einen Extremfall möglicher Schadstoffauslaugung dar.

### 5.2 Gefahr durch Hagelbruch oder Brand

Im Fall einer Beschädigung des Moduls durch ein **Hagelereignis** ist für die Frage der Freisetzung von Cadmium und/oder Blei entscheidend, ob die Halbleiterschicht bzw. die Kontakte und Lötstellen der Witterung ausgesetzt sind. In der Praxis dürften feine Risse in der Glasoberfläche entstehen, durch die Wasser eindringen kann. Auf PV-Freiflächenanlagen ist wohl kaum von einer Zerstörung der Module in so kleine Modulfragmente auszugehen, wie sie für die Elutionsversuche erzeugt wurden. Für Solarmodule werden in der Regel hagelgeprüfte Frontglasscheiben verwendet. Zusätzlich schützt die Folienlaminiierung auch bei Glasbruch vor einer Schadstoff-Freisetzung. Auch ist zu beachten, dass es bei Schüttelversuchen zu einem mechanisch bedingten Abrieb kommen kann (und damit zu höheren Schwermetallgehalten im Wasser), was bei in Freiflächenanlagen auftretenden Modulbrüchen nicht zu erwarten ist.

Im Falle eines **Brandes** (Blitzeinschlag) ist bei CdTe-Modulen lediglich von einer sehr geringen Schadstoff-Freisetzung auszugehen (sehr hoher Schmelzpunkt von CdTe; Einschluss der Schadstoffe in der Glasschmelze). Zur möglichen Freisetzung von Blei aus Silizium-Modulen im Brandfall liegen uns keine Angaben vor.

Je nach Grad der Beschädigung durch Hagel/Brand und Verweildauer auf der Anlagenfläche kann eine Auslaugung von Blei oder Cadmium aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Defekte Module sollten im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes daher nicht länger auf der

Anlagenfläche verbleiben. Die Industrie bietet hierfür ein geordnetes Recyclingsystem an (PV Cycle Association).

## **6 Fazit und Ausblick**

Die Gefahr einer Bodenkontamination durch PV-Anlagen mit Blei oder Cadmium wird nach derzeitigem Kenntnisstand bei intakten Solarmodulen bauartbedingt als sehr gering eingestuft. Sind Halbleiterschicht, Kontakte oder Verlötlungen aufgrund von Beschädigungen der Module durch Hagel oder Brand der Witterung ausgesetzt, sollten diese aus Gründen des vorsorgenden Bodenschutzes nicht längere Zeit auf der Anlagenfläche verbleiben. Eine Auslaugung von Blei oder Cadmium kann dann nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

## **7 Literatur**

EBERT, T. & MÜLLER, C. (2011): Schadstoffe in Photovoltaik-Freiflächenanlagen - Zeitschrift Bodenschutz Jhg. 16, 03 – 11: pp. 69 – 74.

SOLARSERVER (2012): [www.solarserver.de](http://www.solarserver.de).

BAYERISCHER AGRARBERICHT 2012: [www.agrarbericht-2012.bayern.de](http://www.agrarbericht-2012.bayern.de), Rubrik: "Landwirtschaft, Ländliche Entwicklung – Produktion und Vermarktung im pflanzlichen Bereich – Landnutzung".

# Kronos Solar Projects

---

## **Samenvatting Schadstoffe in Photovoltaik - Freiflächenanlagen**

Om een uitspraak te kunnen doen over de kans op uitlozing van zonnepanelen te kunnen inschatten, is onderzoek naar de technische en chemische eigenschappen van individuele zonnepanelen noodzakelijk. Hieronder wordt een samenvatting gegeven van een onderzoek dat naar aanleiding van het gebruik van zonnepanelen op argiculturele gronden de kans op uitlozing van zonnepanelen in de bodem bestudeert.<sup>1</sup>

De meest gebruikte zonnepanelen zijn geproduceerd op basis van silicium (ca. 90%). De halfgeleider in het paneel is slechts met zeer geringe onzuiverheden gedotterd. Andere elementen van een zonnepaneel, zoals de elektrische contacten en soldeer bevatten vaak silver, tin en grotere hoeveelheden lood (=20-25kg/ha voor een gemiddeld module oppervlakte van 3000m<sup>2</sup> per hectare).

Zonnepanelen op basis van kristalijn silicium bestaan uit monokristalijn of multi- respectievelijk polykristalijn silicium. De efficiëntie van kristalijn silicium ligt rond de 14% tot 23%.

Dunne film zonnepanelen maken gebruik van cadmium telluride (CdTe) en cadmium sulfide (CdS) als halfgeleiders. Dunnefilm zonnepanelen bevatten 18-26kg cadmium per hectare.

Hoewel deze meestgebruikte vormen van zonnepanelen dus schadelijke stoffen als silver, lood en cadmium bevatten, is de uiteindelijke uitlozing hiervan onwaarschijnlijk. Ten eerste omdat de schadelijke stoffen in verbinding met andere chemische stoffen gebruikt worden – zo word cadmium gebruikt in een CdTe of CdT verbinding, die zeer slecht oplosbaar zijn. Daarnaast is het ook zo, dat deze Cadmiumverbinding tussen vele andere lagen middenin het zonnepaneel aangebracht is, afgesloten van een glaslaag aan de voor- en achterkant van het paneel. Wanneer bij polykristallijne silicium panelen o.a. lood of loodoxide als geleider gebruikt wordt, is deze eveneens ingebouwd tussen verschillende andere glas- en/of metaallagen. Hierdoor is direct contact met de omgeving en resulterende verwerking van het materiaal niet te verwachten. De kans op eventuele uitloging als gevolg daarvan is daardoor miniem.

Toch blijft de vraag bestaan hoe groot de kans op uitloging is als er beschadigingen op de panelen, (b.v. door hagel of brand) is. Om dat te onderzoeken zijn verschillende experimenten doorgevoerd, waarbij zeer kleine fragmenten van zonne-panelen met schadelijke stoffen direct en voor langere tijd aan verweringsfactoren blootgesteld werden. Het aandeel Cadmium wat bij dit experiment uiteindelijk in de bodem terecht kwam had zich na een jaar met 0,24mg/kg verhoogd. Ook andere experimenten wijzen uit, dat wanneer zeer kleine fragmenten van het schadelijk materiaal in het paneel direct aan verweringsfactoren zoals (zuur)water kleine spraak van uitloging is. Bij beschadiging van de panelen is echter rekening te houden met het feit dat de zeer kleine paneelfragmenten die bij de experimenten gebruikt zijn, enkel door toedoen van het bewust breken van de panelen veroorzaakt worden. Fragmenten van dergelijk kleine schaal zijn onmogelijk door hagel of brand te creëren, o.a. door aanbrengen van hagel en brandbeveiliging van de glaslagen op de panelen. Hierdoor zullen kleine barsten in de panelen ontstaan

---

<sup>1</sup> Ebert, T en C. Müller, Schadstoffe in Photovoltaik-Freiflächenanlagen – eine Gefahr für den Boden?, in Bodenschutz 3 – Erneuerbare energien (maart 2011)

# Kronos Solar Projects

---

en als gevolg daarvan kleine delen van de schadelijke lood of cadmiumlagen blootgesteld kunnen worden aan verwerking, maar is de directe invloed ervan veel kleiner als bij de hierboven beschreven experimenten. Daarnaast zal de kans op verwerking niet voor een jaar plaats kunnen vinden, bij beschadiging van de

panelen van een zonnepark worden deze zo snel mogelijk vervangen omdat ook de energieproductie direct negatief gevolg hiervan ondervindt. Als laatste valt te bemerken dat de onderconstructie van grondgebonden zonneparken zijn zeer beperkt in het oppervlakte wat in direct contact met de bodem staat. Het risico op een negatieve impact op de bodem veroorzaakt door materiaaldegradatie wordt daarom eveneens als zeer laag ingeschat.

Het valt te verwachten dat in de toekomst het gebruik van lood en cadmium voor zonnepanelen helemaal uitgesloten wordt. Tot die tijd volstaan bovenstaande studieresultaten om te kunnen vaststellen dat zonnepanelen een zeer gering risico op uitloging meedragen.

# Schadstoffe in Photovoltaik – Freiflächenanlagen

## Eine Gefahr für den Boden?

Titus Ebert und Christa Müller



### Titus Ebert

Dipl.-Umweltwissenschaftler; Studium der Umweltsicherung an der Hochschule Weihenstephan und der Umweltwissenschaften an der Universität Koblenz; seit 2001 Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Bodenschadstoffe“ der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.



### Christa Müller;

Dipl.-Geographin; Studium der Physischen Geographie an der LMU München mit Schwerpunkt Bodenkunde; seit 1985 an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft tätig; seit 1997 Leiterin der Arbeitsgruppe „Bodenschadstoffe“.

### Zusammenfassung

Bei den am meisten verbreiteten Solarmodulen auf Siliziumbasis (ca. 90 %) ist der Halbleiter nur mit wenigen Fremdatomen dotiert. Kontakte und Lötstellen enthalten jedoch meist Silber, Zinn und größere Mengen Blei (bei einer durchschnittlichen Modulfläche von 3000 m<sup>2</sup> pro ha sind 20–25 kg/ha anzusetzen). Bei Dünnschicht-Solarmodulen wird v. a. schwer lösliches Cadmiumtellurid (CdTe) und geringe Mengen Cadmiumsulfid (CdS) als Halbleiter verwendet; trotz der nur wenige µm dünnen Halbleiterschicht ergeben sich pro ha 18–26 kg Cadmium.

Halbleiterschicht, Kontakte und Verbindungsbänder sind bei handelsüblichen Solarmodulen folienlaminiert und von einer Frontglasscheibe sowie bei den CdTe-Modulen üblicherweise zusätzlich von einer Rückglasscheibe umgeben. Von intakten Modulen ist nach derzeitigem Kenntnisstand daher bauartbedingt kein Cadmium- und Bleieintrag in den Boden zu erwarten. Nur im Falle einer sehr starken Beschädigung des Moduls durch Hagel oder Brand ist eine Cadmium- oder Bleifreisetzung nicht gänzlich auszuschließen. Defekte Module sollten deshalb im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes nicht für längere Zeit auf der Anlagenfläche verbleiben.

- ◆ Schlagwörter: Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Blei, Cadmium, Cadmiumtellurid, Silizium-Solarmodule, Dünnschichtmodule, Bodenschutz

### Summary

The most common solar modules are based on silicon (approx. 90 %); the semiconductor is spiked only with few crystal impurities. Electrical contacts and solders often contain silver, tin and larger quantities of lead (= 20–25 kg/ha on an average area of solar modules of 3000 m<sup>2</sup> per hectare). Thin-film solar modules are built with particularly low soluble cadmiumtelluride (CdTe) and a low amount of cadmiumsulfide (CdS) as semiconductors. However, the thin film of the semiconductor (thickness of only a few µm) contains 18–26 kg cadmium per hectare.

In common solar modules, the semiconductor, the electrical contacts and the copper busbars are foil-laminated and enclosed by a face glass panel. Usually CdTe-modules have an additional back glass panel. When the module is intact, according to the state of knowledge no soil contamination by cadmium or lead has to be expected.

Only in case of strong damages by hail or fire it cannot be fully excluded, that cadmium or lead will be leached. In terms of precautionary soil protection damaged modules should not be left on the site for a longer period of time.

- ◆ Keywords: photovoltaic power plants, lead, cadmium, cadmiumtelluride, silicon solar modules, thin-film solar modules, soil protection

## 1. Einleitung

Photovoltaik (PV)-Freiflächenanlagen sind in den letzten Jahren mancherorts wie Pilze aus dem Boden geschossen. Da die Freiflächenanlagen in der Regel nur mit 30 bis 40 % ihrer Fläche mit PV-Modulen bedeckt sind, kann sich zwischen den Reihen eine Grasnarbe ausbilden, die gemäht oder mit Schafen abgeweidet werden kann. Auch eine Freilandtierhaltung mit Geflügel, Rindern oder Pferden ist bei entsprechender technischer Anpassung, der Höhe der PV-Module und der Robustheit der Aufständungen möglich.



Abbildung 1  
Solarpark Pocking mit Schafbeweidung [1]

Im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Nutzung der Flächen von PV-Anlagen wurde die Frage aufgeworfen, ob aus den in Modulen, Lötstellen oder Aufständungen enthaltenen Schwermetallen (v. a. Cadmium und Blei) Belastungen des Bodens resultieren können.

## 2. Arten von Solarmodulen

Grundsätzlich kann man unterscheiden zwischen kristallinen Silizium-Modulen, Dünnschicht-Modulen und sonstigen Photovoltaikzellen (z. B. organische Solarzellen).

### 2.1 Kristalline Silizium-Module

Kristalline Silizium-Module bestehen aus monokristallinem (c-Si) oder multi- bzw. polykristallinem Silizium (mc-Si bzw. pc-Si). Je nach Kristallaufbau weisen die Sili-



Abbildung 2  
kristalline Silizium-Module

zium-Einzelzellen (Wafer) Schichtdicken von 100 oder mehr  $\mu\text{m}$  auf ( $1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$ ). Der elektrische Wirkungsgrad kristalliner Silizium-Solarmodule erreicht 14 [2] bis knapp 23 % [3].

### 2.2 Dünnschicht-Module

Bei Dünnschicht-Modulen wird im Gegensatz zu kristallinen Silizium-Modulen der Halbleiter als rund 2–10  $\mu\text{m}$  dünne Schicht flächig auf ein geeignetes Trägermaterial (Glas, Metall oder Kunststoff) aufgebracht. Als Halbleiter sind *amorphes* oder *mikrokristallines Silizium* und *Nicht-Silizium-Verbindungen*, z. B. *Cadmiumtellurid* im Einsatz [2] [4].



Abbildung 3  
CdTe-Dünnschichtmodule

- Der Halbleiter **amorphes Silizium (a-Si)** ist eine nicht-kristalline Form des Siliziums, **mikrokristallines Silizium ( $\mu\text{-Si}$ )** eine Mischphase aus sehr kleinen Siliziumkristallen und amorphem Silizium. Auf Grund

Tabelle 1  
Preisindex für Solarmodule in €/Wp\* (Großhandelspreise laut Handelsplattform pvXchange) [10]

Modultyp, Herkunft	Juni 2009	März 2010	Dez. 2010
Kristallin, Europa	2,45	1,93	1,75
Kristallin, China	2,03	1,50	1,55
Kristallin, Japan	2,42	1,90	1,71
Dünnschicht CdS/CdTe	1,64	1,57	1,38
Dünnschicht a-Si/ $\mu\text{-Si}$	1,89	1,36	1,22

\* Die Leistung eines Solarmoduls oder einer Solarzelle wird in Watt-Peak (Wp) oder Kilowatt-Peak (1 kWp = 1000 Wp) angegeben. Es handelt sich um die maximale Nennleistung einer(s) Solarzelle/-moduls unter standardisierten (nicht idealisierten) Testbedingungen (Sonneneinstrahlung 1.000 W/qm bei senkrechtem Lichteinfall, Zell-/Modultemperatur 25°C, Windgeschwindigkeit 1 m/s, Luftmasse 1,5). Unter realen Bedingungen (z. B. bewölkter Himmel oder Erwärmung des Moduls) ist die Zell- bzw. Modulleistung geringer als die durch Peakleistung angegebene.

der ungeordneten Kristallstruktur, verbunden mit einem hohen Absorptionsvermögen, genügen bereits geringe Halbleiterschichtdicken (etwa um den Faktor 100 dünner als bei kristallinem Silizium). Neben der Materialersparnis sind diese Formen des Siliziums auch in der Herstellung günstiger als kristallines Silizium. Kombinierte Dünnschicht-Module aus amorphem und mikrokristallinem Silizium erreichen elektrische Wirkungsgrade von nur 5 bis 12 % [3].

- Bei **Nicht-Silizium-Halbleiter-Modulen** besteht die Halbleiterschicht aus unterschiedlichsten Materialien z. B. *Cadmiumtellurid (CdTe)*, *Cadmiumsulfid (CdS)* oder *Kupfer-Indium-(Gallium)-Schwefel-Selenverbindungen*. Zu letzteren gehören CIS-Module (Kupfer-Indium-Disulfid) und CIGS-Module (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid) [2] [5]. CdTe-Module weisen zwar einen geringeren elektrischen Wirkungsgrad (bis 11 %) auf als kristalline Silizium-Module, bei diffusen Lichtbedingungen und hohen Temperaturen ist ihr Leistungsabfall jedoch geringer. CIGS-Module erreichen Modul-Wirkungsgrade von 10–12 %, CIS-Module 10–17 % [2] [6] [7] [3].

### 2.3 Sonstige Photovoltaikzellen (z. B. organische Solarzellen)

Organische Solarzellen bestehen aus halbleitenden Kunststoffen. Der Zell-Wirkungsgrad liegt bei 6–8 % [2] [4] [8]. Aufgrund des schlechteren Wirkungsgrades spielen sie noch kaum eine Rolle. Organische Solarzellen sind jedoch günstig herzustellen und vielseitig einsetzbar.

### 3. Marktanteile der verschiedenen Solarmodule

Etwa 85 % aller jährlich (2010) hergestellten Solarmodule (insgesamt: 27.293 MWp<sup>1</sup>) sind **kristalline Silizium-Module** (davon ca. 40 % aus monokristallinem und 60 % aus poly- bzw. multikristallinem Silizium) [9].

Bei **Dünnschicht-Modulen** sind CdTe-Module sowie die mit amorphem oder mikrokristallinem Silizium am weitesten verbreitet. Der Marktanteil der CdTe-Module ist aufgrund des geringeren Preises (siehe Tabelle 1) und der oben erwähnten Vorteile steigend. 2010 hatte die Produktion von CdTe-Dünnschichtmodulen einen Anteil von 5,3 % am globalen PV-Markt [9] (2009 sogar 9,0 %). Dagegen lag sie 2004 erst bei 1,1 % [9].

2010 lag der Anteil der **amorphen und mikrokristallinen Silizium-Dünnschichtmodule** am Weltmarkt bei 5 % [9].

**CIGS-Module** hatten 2010 nur einen Marktanteil von 1,6 % [9].

Unser monatlicher *E-Mail-Newsletter* hält Sie auf Wunsch und natürlich kostenlos über unser aktuelles Angebot in Ihrem Fachbereich auf dem Laufenden.

Einfach Ihre E-Mail-Adresse unter

[www.ESV.info/newsletter.html](http://www.ESV.info/newsletter.html)

eingeben – und Sie sind dabei.



ERICH SCHMIDT VERLAG  
Auf Wissen vertrauen

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG  
Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin  
Fax 030/25 00 85 - 275  
[www.ESV.info](http://www.ESV.info) · [ESV@ESVmedien.de](mailto:ESV@ESVmedien.de)

#### 4. Welche Schadstoffe sind bei PV-Freiflächenanlagen zu erwarten?

Bei Solarmodulen auf Siliziumbasis (kristalline Silizium-Module und Dünnschicht-Module aus amorphem oder mikrokristallinem Silizium) ist der Halbleiter nur mit wenigen (Größenordnung  $10^{-5}$ ) Fremdatomen wie Bor (B), Indium (In), Aluminium (Al), Gallium (Ga), Phosphor (P), Arsen (As) oder Antimon (Sb) dotiert [2].

**Nicht-Silizium-Halbleiter-Module** enthalten v.a. Cadmiumtellurid und geringe Mengen Cadmiumsulfid als Halbleiter.

Um die elektrische Funktionsfähigkeit zu gewährleisten und die Einzelzellen miteinander zu einem Modul verbinden zu können, ist bei allen Typen von Solarzellen eine Vorder- und Rückseitenkontaktschicht erforderlich. Die Zellen sind oft mit verzinnnten Kupferbändern verbunden [11] [12].

Bei kristallinen Silizium-Modulen sind zur Vorder- und Rückseitenkontaktierung Metallisierungspasten aufgebracht, die Silber, Aluminium und Bleioxid (in der Glasfritte) enthalten. Für die Verlötlung der Einzelzellen zum Gesamtmodul werden Zinn-Blei-Lote eingesetzt. Bei Dünnschichtmodulen erfolgt die Kontaktierung meist mittels Zinn- oder Zinkoxiden, Aluminium, Silber oder Molybdän.

Tabelle 2 zeigt die Mengen der bei der Entsorgung (Recycling) von ausgedienten Solarmodulen anfallenden Rest- und Schadstoffe.

Im Folgenden soll auf die besonders umweltrelevanten Metalle Cadmium und Blei näher eingegangen werden.

4.1 Wieviel Cadmium steht als CdTe bzw. CdS bei Nicht-Silizium-Halbleiter-Modulen auf 1 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche (LF)? Ende der 90er Jahre werden von Steinberger [14] für **CdTe-Module** 7–66 g Cd (Summe Cd aus CdTe und CdS) und 7–33 g Te/m<sup>2</sup> Modulfläche angegeben, basierend auf einer Schichtdicke des Halbleiters von 2,5–12,5 µm (CdTe) bzw. 0,3–12,8 µm (CdS).

Aufgrund von Optimierungsbestrebungen der Hersteller solcher Module hat sich die Schichtdicke seitdem stark verringert auf derzeit 2,5–3,5 µm CdTe und 0,11–0,15 µm CdS [15]. Unter Abzug der nicht beschichteten Randflächen (nur ca. 80 % der Modulfläche ist mit dem Halbleiter beschichtet) errechnen sich damit je m<sup>2</sup> Modulfläche 12,4–17,4 g CdTe und 0,41–0,56 g CdS.

Bei Berücksichtigung der stöchiometrischen Zusammensetzung ergeben sich für eine Freiflächen-PV-Anlage mit CdTe-Modulen somit rechnerisch je m<sup>2</sup> Modulfläche 6,1–8,6 g Cd und 6,6–9,2 g Te.

In unseren Breitengraden sind je nach Topographie etwa 9–10 m<sup>2</sup> Modulfläche pro kWp notwendig [16]. Bei

einer Aufständigung im Winkel von 30° und unter Berücksichtigung der nichtgenutzten Zwischenflächen zwischen den Reihen liegt die durchschnittliche Modulfläche in etwa bei 3000 m<sup>2</sup>/ha [17].

Damit stehen also rd. 18–26 kg Cd und 20–28 kg Te auf einem ha LF.

Auch CIS- und CIGS-Solar-Module enthalten geringe Mengen an Cadmiumsulfid (Durchschnittswerte nach Schindler [4]: 0,2–0,4 g Cd/m<sup>2</sup> Modulfläche), was etwa 1 kg Cd/ha LF entspricht.

4.2 Wieviel Blei steht bei kristallinen Silizium-Modulen auf 1 ha LF? Bei kristallinen Silizium-Solarmodulen ist aufgrund der verwendeten Front- und Rückseitenmetallisierung mit den in Tabelle 3 genannten Bleigehalten zu rechnen. Bei Verwendung bleihaltiger Kontaktierungsmittel ergeben sich somit je nach Rückseitenmetallisierung zwischen 1,2–1,8 kg Pb/ha (Zellvorder- und -rückseite Silber basiert) und 4,6–5,9 kg Pb/ha (Zellvorderseite Silber basiert, -rückseite Al basiert). Wie Tabelle 3 (Anwendungshäufigkeit) zeigt, wird nur in 30–50 % der Fälle auf die Zellrückseite eine Pb-haltige Metallisierung aufgebracht.

Blei ist insbesondere aber in den Blei-Zinn-Loten zum Verlöten der Silizium-Einzelzellen zum Gesamtmodul enthalten. Nach Wirth [19] ist hierfür rd. 10 g Blei je Modul (230 Wp, 100 x 160 cm) anzusetzen. Bei 3000 m<sup>2</sup> Modulfläche je ha entspricht dies ca. 19 kg Pb/ha.

#### 5. Cadmium und Blei in Solarmodulen – eine Gefahr für landwirtschaftliche Böden und Pflanzen?

5.1. Aufbau der Solarmodule und Bindungsformen der Schadstoffe **Cadmium** liegt bei Nicht-Siliziumhalbleiter-Modulen nicht elementar, sondern als CdTe bzw. CdS gebunden vor. Diese Verbindungen erweisen sich als sehr stabil

Tabelle 2  
**Zusammensetzung von Alt-Photovoltaik-Modulen in Masse% (nach [13] verändert)**

	kristalline Silizium-Module	amorphe Silizium-Module	CdTe-Module	CIS-Module
Glas	63	86	95,4	80
Al	19	12	< 0,01	12
Si/Te/In/Ga/Se	4 (Si)	< 0,1 (Si)	0,07 (Te)	0,02 (In) 0,01 (Ga) 0,03 (Se)
Cd	–	–	0,07	geringe Mengen
Organik	11	2	3,5	6
Cu (Kabel)	0,6	–	0,9	0,85
Ag	< 0,01	–	< 0,01	–
Sn	< 0,1	< 0,1	< 0,01	0,12
Pb	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1

	Gesamtmenge der verwendeten Metallisierungspasten [kg/MWp]	Blei-Konzentration in den Pasten [%]	Blei-Gehalt [kg/MWp]	Blei-Menge* [kg/ha] †	Anwendungshäufigkeit (2010) [%]
Zellvorderseite Silber basiert	40–60	bis 4	1,6–2,4	0,6–0,9	95–99
Zellrückseite Silber basiert	40–60	bis 4	1,6–2,4	0,6–0,9	20–30
Zellrückseite Aluminium basiert	280–350	bis 4	11,2–14	4–5	10–20

\* Berechnungsgrundlage: Modul von 2 m<sup>2</sup> mit einer Leistung von ca. 240 Wp und einem Flächennutzungsgrad von 3000 m<sup>2</sup> Modulfläche pro ha (= 0,36 MWp/ha);  
Quelle: Angaben aus DuPont Firmenpräsentation [18]

Tabelle 3  
**Menge und Anwendungshäufigkeit bleihaltiger Kontaktierungsmittel bei kristallinen Silizium-Solarmodulen**

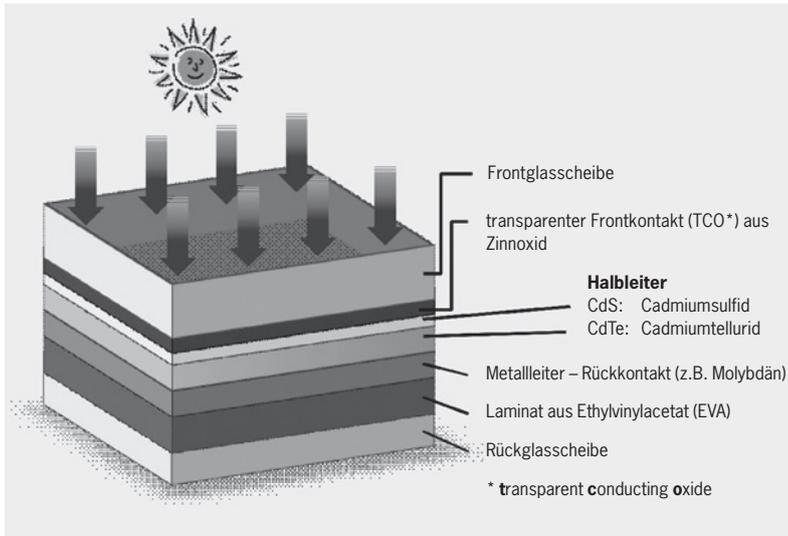
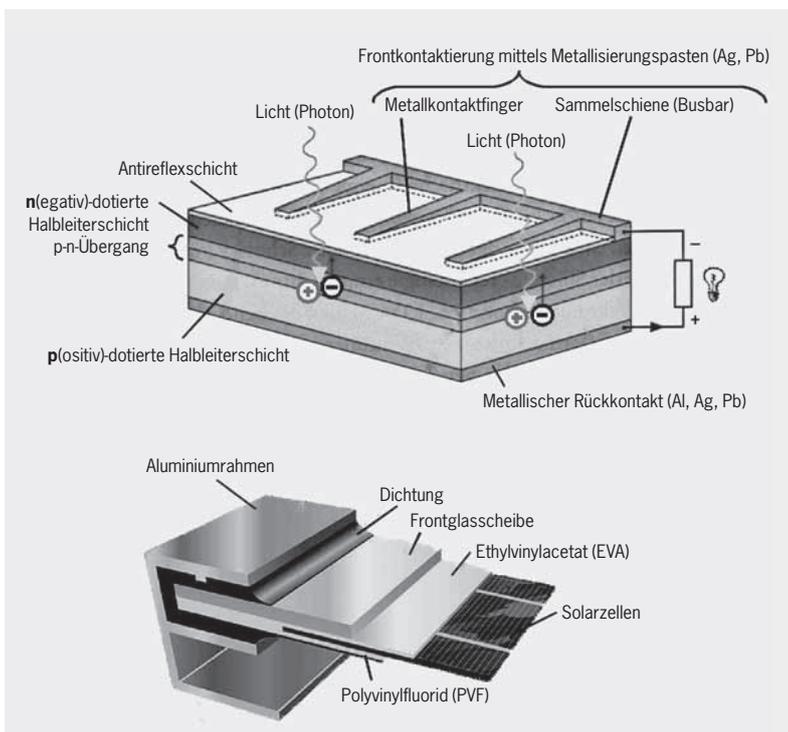


Abbildung 4  
Beispiel für den Aufbau eines CdTe-/CdS-Dünnschicht-Solarmoduls

und äußerst gering wasserlöslich [20] [21]. Da die Halbleiterschicht, samt Kontakten und Verbindern, von einer Glasverbundfolie sowie einer Front- und Rückglasscheibe umgeben ist, ist sie nicht unmittelbar der Witterung ausgesetzt (siehe Abbildung 4). Ein direkter Cadmiumeintrag von intakten Modulen in den Boden ist daher nach derzeitigem Kenntnisstand bauartbedingt nicht zu erwarten [21].

Kristalline Silizium-Module werden ebenfalls laminiert, z. B. mit Ethylvinylacetat (EVA) und Polyvinylfluorid (PVF) und sind zusätzlich von einer Frontglasscheibe umgeben (siehe Abbildung 5). Die meisten Modelle sind aber nicht mit einer zusätzlichen Rückglasabdeckung ausgestattet. Auch bei kristallinen Silizium-Modulen ist somit das Blei/Bleioxid aus den Metallisierungspasten und den Lötstellen nicht unmittelbar der Witterung ausgesetzt. Ein direkter Bleieintrag von intakten Modulen in den

Abbildung 5  
Beispiel für den Aufbau einer kristallinen Silizium Solarzelle (oben) und eines Silizium Moduls (unten) [25] [26]



Boden ist nach derzeitigem Kenntnisstand bauartbedingt ebenfalls nicht zu erwarten.

In letzter Zeit kommen vermehrt bleifreie Kontaktierungen und Lote zum Einsatz. [22] [23] [18] [24].

Häufig wird die Frage gestellt, ob bei einer eventuellen Beschädigung/Zerstörung der Solarmodule durch Hagel oder Brand Cadmium und/oder Blei freigesetzt wird und damit in den Boden oder die Pflanzen gelangen kann. Hierzu finden sich in der Literatur v.a. Elutionsversuche, die im Zusammenhang mit Deponierung oder Recycling von Solarmodulen durchgeführt wurden.

#### 5.2. Verfügbarkeit von Cadmium und Blei – Ergebnisse von Elutionsversuchen

Steinberger (1998) hat in einem Worst-Case-Szenario stark zerkleinerte CdTe-Moduleile (10 mm Bruchstücke) der Witterung ausgesetzt, um mögliche Auswaschungen zu untersuchen [14]. Die Fragmente stammten von einem CdTe-Solarmodul mit 8 g Cd/m<sup>2</sup> Modulfläche, was einer Schichtdicke von 3,1 µm CdTe und 0,4 µm CdS entspricht. Im Vergleich zu heute üblichen Schichtdicken liegen sie damit bei CdTe im oberen Bereich, bei CdS etwa um Faktor 3 höher (s. Kap. 4.1.). Er beließ die Modulfragmente für ein Jahr auf dem Boden und stellte fest, dass sich der Gehalt an Cadmium im Oberboden um 0,24 mg/kg erhöhte. Das entspricht bei einer Oberbodenmächtigkeit von 30 cm und einer angenommenen Dichte des Bodens von 1,4 t/m<sup>3</sup> einem Eintrag von rd. 1 kg Cd/ha.

Im Vergleich dazu beträgt der Hintergrundwert für Cadmium in bayerischen Oberböden unter landwirtschaftlicher Nutzung (Acker und Grünland) bei typischen Lehmböden rd. 0,4 mg/kg Boden [27] und der durchschnittliche jährliche Cadmiumeintrag aus der Luft in ländlichen Gebieten Bayerns 0,4 g Cd/ha (2001) [28].

Vom norwegischen, geotechnischen Institut (NGI) wurden 2010 Auslaugungsversuche mit CdTe-Modulbruchstücken (Schichtdicke CdTe 2 µm, CdS 0,05 µm) durchgeführt [29] [30]. Die auf <4 mm zerkleinerten CdTe-Module wiesen einen Gesamtgehalt von 383 mg Cd/kg CdTe-Modulmaterial auf. Mittels deionisiertem Wasser durchgeführte Schüttel- und Säulenversuche ergaben geringe Cadmiumgehalte (Schüttelversuch: 0,73 mg/kg CdTe-Modulmaterial bei pH 9,6, Säulenversuch: <0,002 mg/l (Wasser/CdTe-PV-Modul-Feststoffverhältnis = 0,1) bei pH 10,3).

Demgegenüber wies der zur Bestimmung des maximalen Auslaugungspotentials durchgeführte Elutionsversuch erheblich höhere Cadmiumwerte auf mit einem deutlichen Anstieg bei abnehmendem pH-Wert:

- ◆ bei destilliertem Wasser:  
26,4 mg/kg CdTe-Modulmaterial (pH 7,7)
- ◆ nach Zugabe von Salpetersäure:  
109,7 mg (pH 6,8) sowie 154,3 mg (pH 3,2) je kg CdTe-Modulmaterial.

Die Versuche belegen die bekannte, starke Zunahme der Cadmium-Verfügbarkeit bei pH-Werten < 7.

Die 2010 an den Sierra Analytical Labs, Kalifornien mit CdTe-Modulbruchstücken (<2 mm) durchgeführten Elutionsversuche erbrachten vergleichbare Ergebnisse [29] [31].

Auch für **multikristalline Siliziummodule** (mc-Si) wurden vom NGI Auslaugungsversuche durchgeführt [32].

Die mc-Si-Modulbruchstücke (< 4 mm) wiesen einen Gesamtgehalt von 576 mg Pb/kg mc-Si-Modulmaterial auf. Mittels deionisiertem Wasser durchgeführte Schüttel- und Säulenversuche ergaben relativ geringe Blei-Gehalte (Schüttelversuch: 1,4 mg/kg mc-Si-Modulmaterial bei pH 9,0, Säulenversuch: 0,008 mg/l (W/F = 0,1) bei pH 9,8).

Demgegenüber wies der zur Bestimmung des maximalen Auslaugungspotentials durchgeführte Elutionsversuch erheblich höhere Bleiwerte auf, ebenfalls mit einem deutlichen Anstieg bei abnehmendem pH-Wert:

- ◆ bei destilliertem Wasser:  
Bleigehalt < Quantifizierungsgrenze (pH 8,5)
- ◆ nach Zugabe von Salpetersäure:  
74 mg (pH 5,9) sowie 520 mg (pH 3,8) je kg mc-Si-Modulmaterial.

Auch dieser Versuch belegt den deutlichen Anstieg der Verfügbarkeit von Pb bei pH Werten < 4.

Die am NGI und den Sierra Analytical Labs durchgeführten Untersuchungen stellen einen Extremfall der möglichen Schadstoffauslaugung dar, wie er für die Abfalleinstufung im Falle der Deponierung simuliert wird.

### 5.3. Was passiert bei Hagel? Was passiert bei Brand?

Im Fall einer Beschädigung des Moduls durch Hagel ist für die Frage der Freisetzung von Cadmium und/oder Blei entscheidend, ob die Halbleiterschicht bzw. die Kontakte und Lötstellen der Witterung ausgesetzt sind. In der Praxis dürften feine Risse in der Glasoberfläche entstehen, durch die eventuell Wasser eindringen kann. Auf PV-Freiflächenanlagen ist wohl kaum von einer Zerstörung der Module in so kleine Modulfragmente auszugehen, wie sie für die Elutionsversuche erzeugt wurden. In Solarmodulen werden in der Regel hagelgeprüfte Frontglasscheiben eingebaut. Zusätzlich schützt die Folienlaminierung auch bei Glasbruch vor einer Schadstoff-Freisetzung. Auch ist zu beachten, dass es bei den Schüttelversuchen zu einem mechanisch bedingten Abrieb der CdTe-Beschichtung kommen kann, was ebenfalls bei in Freiflächenanlagen auftretenden Modulbrüchen nicht zu erwarten ist.

Für den seltenen Fall eines Brandes (z. B. infolge eines Blitzeinschlages) ist aufgrund des sehr hohen Schmelzpunktes von CdTe (1041 °C [20]) bei einer angenommenen Feuertemperatur von 800–1000 °C<sup>2</sup>, lediglich von einer sehr geringen Cd-Freisetzung auszugehen [33]. CdS kann jedoch bereits bei Temperaturen über 444°C zersetzt werden. Da der Halbleiter zwischen Glasplatten gekapselt ist, werden CdTe/CdS in der Glasschmelze weitgehend eingeschlossen [34].

Zum Verhalten von kristallinen Silizium-Modulen im Brandfall liegen uns keine Untersuchungsergebnisse vor.

Je nach Grad der Beschädigung durch Hagel oder Brand und Verweildauer auf der Anlagenfläche kann eine Auslaugung von Blei und/oder Cadmium nicht gänzlich ausgeschlossen werden. [14]. Defekte Module sollten deshalb im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes nicht länger auf der Anlagenfläche verbleiben. Die Industrie bietet hierfür ein geordnetes Recyclingsystem an (z. B. PV Cycle Association). Ein Austausch defekter Module liegt auch im Eigeninteresse des Betreibers, um Leistungseinbußen und eine geringere Rendite der PV-Anlage zu verhindern.

## 6. Stecken in Aufständerungen und Installationen von PV

### Anlagen weitere Schadstoffe?

Für Aufständerungen und Geländeumzäunungen von PV-Freiflächenanlagen werden unterschiedliche Materialien eingesetzt (Holz, Beton, Aluminium, feuerverzinktes Eisen, Kunststoffe). Ausschlaggebend für die Materialwahl sind Rückbaubarkeit, Haltbarkeit und Kosten. Die Konstruktionen sind flächenmäßig eng begrenzt. Die Gefahr einer stofflichen Beeinträchtigung des Bodens wird daher als sehr gering eingeschätzt [35].

Dies gilt auch für die Elektroinstallationen (Trafohäuschen, unter- und oberirdische Kabelzuleitungen, Wechselrichter o. ä.). Die Kupferkabel sind ummantelt, Trafos und Wechselrichter gekapselt. Die Ansprüche, die an Kabel für PV-Anlagen gestellt werden, sind deutlich höher als bei sonstigen Installationen für Wechselstrom-Geräte. Vorgeschrieben sind doppelt isolierte Kabel. Die Kabel müssen extremen Witterungsbedingungen (Schutz gegen Feuchtigkeit, UV-Beständigkeit) standhalten können [36].

## 7. Fazit und Ausblick

Die Gefahr einer Bodenkontamination durch PV-Anlagen mit Blei oder Cadmium wird bei intakten Solarmodulen bauartbedingt nach derzeitigem Kenntnisstand als sehr gering eingestuft. Sind Halbleiterschicht, Kontakte oder Verlötlungen der Witterung ausgesetzt, z. B. bei durch Hagel oder Brand beschädigten Modulen, sollten diese aus Gründen des vorsorgenden Bodenschutzes nicht längere Zeit auf der Anlagenfläche verbleiben. Eine Auslaugung von Blei oder Cadmium kann in diesen Fällen nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Es bleibt abzuwarten, welche Halbleitertechnologien sich auf dem Markt künftig behaupten werden. Bei der Diskussion um die Aufnahme der Photovoltaik in die RoHS-Richtlinie („Restriction of the use of certain Hazardous Substances“) [37] im Sommer 2010 gab es deutliche Stimmen für den Einsatz schadstofffreier Produkte bei PV-Anlagen. Die in letzter Zeit vermehrt zum Einsatz kommenden, bleifreien Kontaktierungen und Lote sind ein Schritt in diese Richtung.

### Literatur

- [1] Bucher, M. (2006): Solarpark Pocking, Martin Bucher Projektentwicklungen, <http://www.martin-bucher.de>, 16. 5. 2011.
- [2] <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle> (15. 3. 2011).
- [3] BINE-Themeninfo III/05: Photovoltaik – Innovationen bei Solarzellen und Modulen (2005), BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe GmbH, [www.bine.info](http://www.bine.info).
- [4] Sander, K., Zangl, S., Reichmuth, M., Schröder, G. (2003): Requirements regarding material properties and disposal of photovoltaic products, UBA-Fachberichte.
- [5] <http://de.wikipedia.org/wiki/CIGS-Solarzelle> (21. 2. 2011).
- [6] mündliche Auskunft von Herrn Willi Kirchensteiner (2010), Bildungszentrum für Solartechnik der Landeshauptstadt München.
- [7] Tiwari, A. N., Haug, F.-J., Zogg, H. (2000): Neue Möglichkeiten durch Dünnschicht-Solarzellen, Bulletin SEV/VSE, 10/00.
- [8] <http://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik> (16. 3. 2011).
- [9] [www.photon.de](http://www.photon.de) (2011): Das Jahr des Tigers (2010 wurden mehr Solarzellen produziert als in den vier vorherigen Jahren zusammen), Photon, April 2011.
- [10] Preisindex für Solarmodule (2011), <http://www.solarserver.de/service-tools/photovoltaik-preisindex.html>.
- [11] Rentzing, S. (2010): Solar-Konzerne kämpfen um ihr grünes Image, Artikel in der Zeitschrift Spiegel vom 25. 4. 2010, <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/0,1518,688779,00.html>.
- [12] De Wild-Scholten, M. (2004): Towards cleaner Solar PV, Refocus Sept./Okt. 2004, Elsevier, S. 46–49.
- [13] Sander, K. et al. (2007): Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystems für Photovoltaische Produkte, Ökopool, November 2007, [http://www.pvcycle.org/fileadmin/pvcycle\\_docs/](http://www.pvcycle.org/fileadmin/pvcycle_docs/)

- documents/publications/Studie\_PVCycle\_Download\_17\_de\_270808.pdf.
- [14] Steinberger, H. (1998): Health, safety and environmental risks from the operation of CdTe and CIS thin-film modules, Progress in Photovoltaics, Vol. 6, Issue 2, S. 99–103.
- [15] Auskunft von Herrn Andreas Wade (2011), Director Sustainable Development, First Solar GmbH.
- [16] <http://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik-solaranlagen/glossar/kWp.htm> (16. 5. 2011).
- [17] Gemeinsame Landesplanungsabteilung Berlin-Brandenburg GL 3: Photovoltaik-Freiflächenanlagen – Stand der Planung (Januar 2010), [http://gl.berlin-brandenburg.de/imperia/md/content/bb-gl/energie/presentationen\\_gesamt.pdf](http://gl.berlin-brandenburg.de/imperia/md/content/bb-gl/energie/presentationen_gesamt.pdf).
- [18] Weigand, P. (2010): Status of lead free solar cell metalizations for the PV industry, EPIA Sustainability Working Group Meeting, Brüssel, 18. 11. 2010.
- [19] Wirth, H. (2011): E-Mail-Auskunft von Dr. Harry Wirth, Division Director Photovoltaic Modules, Systems and Reliability, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg.
- [20] GESTIS-Stoffdatenbank (Gefahrstoffinformationssystem der gewerblichen Berufsgenossenschaften) (16. 5. 2011): <http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/stoffdb/index.jsp>.
- [21] Jäger-Waldau, A. (2009): Peer Review of Major Studies on the Environmental Profile of Cadmium Telluride (CdTe) Photovoltaic (PV) Systems, European Commission, DG JRC, Institut of Environment and Sustainability, Renewable Energies Unit, Ispra (Italien).
- [22] Diermann, R. (2011): Blei bleibt beliebt, Photovoltaik Magazin, <http://www.photovoltaik.eu, 04/2011>.
- [23] <http://www.materialsgate.de/mnews/4818/Verbesserte+Metallisierung+von+Wafern+f%C3%BCr+kristalline+Solarzellen.html> (16. 5. 2011): Verbesserte Metallisierung von Wafern für kristalline Solarzellen, MaterialNews vom 18. 9. 2009.
- [24] [http://www.isfh.de/institut\\_solarforschung/leitfaehige-kleber.php](http://www.isfh.de/institut_solarforschung/leitfaehige-kleber.php) (2009): Modulherstellung mit leitfähig geklebten Zellverbindern.
- [25] <http://www.brunnmeier.de/Photovoltaik/VergleichDaten/Zellaufbau.JPG> (16. 5. 2011).
- [26] <http://www.sunbeam-berlin.de> (2011).
- [27] Bayerisches Landesamt für Umwelt (1998): Hintergrundwerte anorganischer Schadstoffe in Böden Bayerns.
- [28] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2003): Immissionsökologischer Bericht 2000–2001, Augsburg.
- [29] Saurat, M., Ritthoff, M. (2010): Appraisal of laboratory analyses conducted on CdTe photovoltaic modules, Wuppertal Institute, [http://www.ntsaeu/resources/Wuppertal+Institute+CdTe+lab+test+s+appraisal\\$2C+Aug+2010+final.pdf](http://www.ntsaeu/resources/Wuppertal+Institute+CdTe+lab+test+s+appraisal$2C+Aug+2010+final.pdf).
- [30] Okkenhaug, G. et al. (2010): Environmental risks regarding the use and end-of-life disposal of CdTe PV modules, Report des Norwegian Geotechnical Institutes (NGI) vom 16. 4. 2010.
- [31] Forsyth, R. K. (2010): Ergebnisse aus der Untersuchung von CdTe-Solarmodulen an den Sierra Analytical Labs, Inc. in Laguna Hills, Kalifornien im Auftrag der Non-Toxic Solar Alliance e. V. (NTSA), Berlin vom 22. Juli 2010, <http://www.ntsaeu/resources/1-NTSA-Test-Background-Narrative.pdf>.
- [32] Arp, H. P. et al. (2010): Leaching from mc-Si PV module material – results from batch, column and availability tests. Comparison with thin film CdTe PV modules, Report des Norwegian Geotechnical Institutes (NGI) vom 25. 11. 2010.
- [33] Fthenakis, V. M. (2004): Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 8 (2004) S. 303-334, Elsevier Verlag.
- [34] Fthenakis, V. M., Fuhrmann, M., Heiser, J., Lanzirrotti, A., Fitts, J., Wang, W. (2005): Emissions and Encapsulation of Cadmium in CdTe PV Modules during Fires, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Wiley InterScience, Heft 13, S. 1–11.
- [35] <http://www.iwoe.de/KorrpdfUVPHTMLAufsatzNeu8-11-06.html> (16. 5. 2011).
- [36] <http://www.solarstromerzeugung.de/kabel-photovoltaik.html> (16. 5. 2011).
- [37] Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.

#### Anschriften der Autoren

##### Dipl.-Umweltwissenschaftler Titus Ebert

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft  
Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau  
und Bodenschutz – Arbeitsgruppe Bodenschadstoffe  
Lange Point 12, 85354 Freising  
Tel. (0 81 61) 71-44 69, Fax (0 81 61) 71-40 06  
E-Mail: titus.ebert@lfl.bayern.de

##### Dipl.-Geographin Christa Müller

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft  
Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau  
und Bodenschutz – Arbeitsgruppe Bodenschadstoffe  
Lange Point 12, 85354 Freising  
Tel. (0 81 61) 71-44 74, Fax. +49 (0)8161/71-4006  
E-Mail: christa.mueller@lfl.bayern.de

<sup>1</sup> MWp (Megawatt-Peak) = 1.000 kWp (Kilowatt-Peak) = 1.000.000 Wp (Watt-Peak); zur Erklärung des Begriffs Watt-Peak siehe Fußnote unter Tabelle 1

<sup>2</sup> Feuerraumtemperatur eines durchschnittlichen Hausbrandes

## Nutzen Sie schon [www.BODENSCHUTZdigital.de](http://www.BODENSCHUTZdigital.de)?



Mehr zum eJournal unter:

 [www.BODENSCHUTZdigital.de](http://www.BODENSCHUTZdigital.de)

*Für Abonnenten der Printausgabe kostenfrei:  
Das eJournal von Bodenschutz*

Lesen Sie auf [www.BODENSCHUTZdigital.de](http://www.BODENSCHUTZdigital.de) das aktuelle Gesamtheft oder Einzelbeiträge, die Sie besonders interessieren. Natürlich sind auch Downloads möglich.

**Besonderes Plus – das Archiv**

Hier finden Sie alle Ausgaben seit dem Jahr 2004 und können Einzelbeiträge beziehen. Abonnenten recherchieren hier kostenlos!

**ESV**

**ERICH SCHMIDT VERLAG**  
*Auf Wissen vertrauen*

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG · Genthiner Str. 30 · 10785 Berlin  
Fax: (030) 25 00 85 - 275 · [www.ESV.info](http://www.ESV.info) · [ESV@ESVmedien.de](mailto:ESV@ESVmedien.de)



# Das neue BNatSchG – vollständig kommentiert



Mit dem BNatSchG 2010 gelten erstmals deutschlandweit einheitliche, unmittelbare Vorschriften. Die Bundesländer dürfen jedoch vom BNatSchG 2010 in gewissen Grenzen abweichen bzw. es mittels sog. Öffnungsklauseln ergänzen. Hier unterstützt der neue Berliner Kommentar BNatSchG den Praktiker:

- ▶ **Ein erfahrenes Autorenteam** aus Anwälten, Verbandsjuristen, Ministerialbeamten, Hochschullehrern und Richtern sorgt für eine ausgewogene, praxisgerechte Kommentierung.
- ▶ **Den Blick aufs Ganze** gewährleistet die Einbeziehung der landesrechtlichen Regelungen sowie der europarechtlichen und umweltpolitischen Hintergründe.
- ▶ **Besonders praxisrelevante Materien** wie Eingriffsregelung und FFH-Verträglichkeitsprüfung sind vor dem Hintergrund aktueller Rechtsprechung ausführlich dargestellt.

## BNatSchG

### Bundesnaturschutzgesetz

Herausgegeben von Prof. Dr. jur. Walter Frenz  
und Prof. Dr. jur. Hans-Jürgen Muggenborg

2011, LVIII, 1.281 Seiten, fester Einband, €(D) 138,-

ISBN 978-3-503-12665-1

Berliner Kommentare

### Weitere Informationen:

 [www.ESV.info/978-3-503-12665-1](http://www.ESV.info/978-3-503-12665-1)



ERICH SCHMIDT VERLAG  
*Auf Wissen vertrauen*