Samenvatting Schadstoffe in Photovoltaik - Freinflächenanlagen

Om een uitspraak te kunnen doen over de kans op uitlooging 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 uitlooging van zonnepanelen in de bodem bestudeert.[1]

De meest gebruiktezonnepanelen 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 electrische contacten en soldeer bevatten vaak silver, tin en grotere hoeveelheden lood (=20-25kg/ha voor een gemiddeld module oppervlakte van 3000m2 per hectare).

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

Dunne film zonnepanelen maken gebruiken 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 zilver, lood en cadmium bevatten, is de uiteindelijke uitlooging 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 aangepracht 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 verwering 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 creeëren, o.a. door aanbrengen van hagel en brandbeveiliging van de glaslagen op de panelen. Hierdoor zullen kleine barsten in de panelen ontstaan

[1] Ebert, T en C. Müller, Schadstoffe in Photovoltaik-Freiflächenanlagen – eine Gefahr Bodenschutz 3 – Erneuerbare energien (maart 2011)

Behoort bij besluit van Burgemeester en Wethouders van de gemeente Hilvarenbeek van
20-11-2020
Namens dezen,
Afdelingshoofd Ruimte
20190325
OMG

en als gevolg daarvan kleine delen van de schadelijke lood of cadmiumlagen blootgesteld kunnen worden aan verwering, maar is de directe invloed ervan veel kleiner als bij de hierboven beschreven experimenten. Daarnaast zal de kans op verwering 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 zonne-panelen een zeer gering risico op uitloging meedragen.

Lizenziert für Herr Laurens van Ochten.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

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 m² 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 m² 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 Aufständerungen 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 Aufständerungen 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

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2018 - (Einzeldokumentenverkauf http://www.BODENSCHUTZdigital.de) - 20.02.2018 - 10:26 - (ds)

Lizenziert für Herr Laurens van Ochten.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

zium-Einzelzellen (Wafer) Schichtdicken von 100 oder mehr µm auf (1 µm = 1/1000 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 µm 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 nichtkristalline Form des Siliziums, **mikrokristallines Silizium** (µ-Si) eine Mischphase aus sehr kleinen Siliziumkristallen und amorphem Silizium. Auf Grund 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 (**K**upfer-**I**ndium-**S**ulfid) und CIGS-Module (**K**upfer-**I**ndium-**G**allium-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.

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/µ-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.

3. Marktanteile der verschiedenen Solarmodule

Etwa 85 % aller jährlich (2010) hergestellten Solarmodule (insgesamt: 27.293 MWp[1])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].

CI(G)S-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

eingeben – und Sie sind dabei.

ESV
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 · ESV@ESVmedien.de

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2018 - (Einzeldokumenteverkauf http://www.BODENSCHUTZdigital.de) - 20.02.2018 - 10:26 - (ds)

Lizenziert für Herr Laurens van Ochten.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

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 verzinnten 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 Verlötung 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/m² 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 m² 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 m² Modulfläche 6,1–8,6 g Cd und 6,6–9,2 g Te.

In unseren Breitengraden sind je nach Topographie etwa 9–10 m² Modulfläche pro kWp notwendig [16]. Bei einer Aufständerung im Winkel von 30° und unter Berücksichtigung der nichtgenutzten Zwischenflächen zwischen den Reihen liegt die durchschnittliche Modulfläche in etwa bei 3000 m²/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/m² 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 m² 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 m² mit einer Leistung von ca. 240 Wp und einem Flächennutzungsgrad von 3000 m² Modulfläche pro ha (= 0,36 MWp/ha); Quelle: Angaben aus DuPont Firmenpräsentation [18]

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

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2018 - (Einzeldokumentenverkauf http://www.BODENSCHUTZdigital.de) - 20.02.2018 - 10:26 - (ds)

Lizenziert für Herr Laurens van Ochten.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

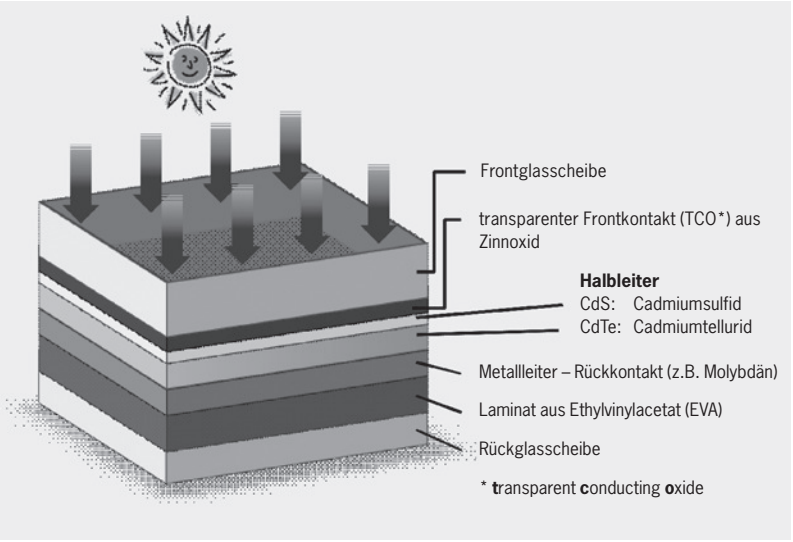

Abbildung 4
Beispiel für den Aufbau eines CdTe-/CdS-Dünnschicht-Solarmoduls

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 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.

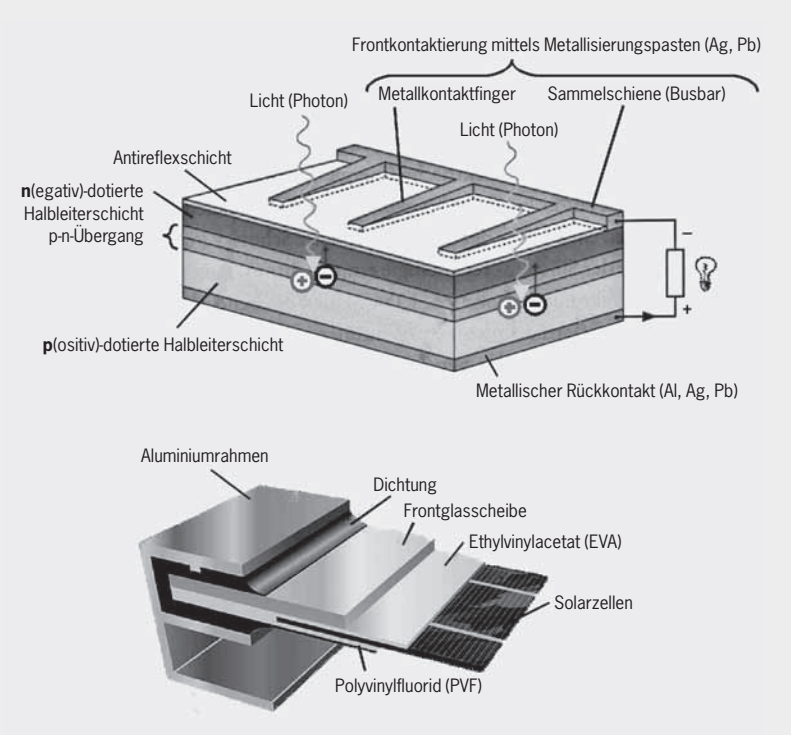

Abbildung 5
Beispiel für den Aufbau einer kristallinen Silizium Solarzelle (oben) und eines Silizium Moduls (unten) [25] [26]

5.2. Verfügbarkeit von Cadmium und Blei – Ergebnisse von Elutionsversuchen

Steinberger (1998) hat in einem Worst-Case-Szenario stark zerkleinerte **CdTe-Modulteile** (10 mm Bruchstücke) der Witterung ausgesetzt, um mögliche Auswaschungen zu untersuchen [14]. Die Fragmente stammten von einem CdTe-Solarmodul mit 8 g Cd/m² 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/m³ 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].

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2018 - (Einzeldokumenteverkauf http://www.BODENSCHUTZdigital.de) - 20.02.2018 - 10:26 - (ds)

Lizenziert für Herr Laurens van Ochten.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

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[2], 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 Verlötungen 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.
[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 (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, Ökopol, November 2007, http://www.pvcycle.org/fileadmin/pvcycle_docs/

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2018 - (Einzeldokumentenverkauf http://www.BODENSCHUTZdigital.de) - 20.02.2018 - 10:26 - (ds)

Lizenziert für Herr Laurens van Ochten.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

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/praesentationen_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/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 (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.ntsa.eu/resources/Wuppertal+Institute+CdTe+lab+tests+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.ntsa.eu/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., Lanzirotti, 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

[1] 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
[2] Feuerraumtemperatur eines durchschnittlichen Hausbrandes

Nutzen Sie schon www.BODENSCHUTZdigital.de?

Für Abonnenten der Printausgabe kostenfrei:
Das eJournal von Bodenschutz

Lesen Sie auf **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!

Mehr zum eJournal unter:
www.BODENSCHUTZdigital.de

ESV
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 · ESV@ESVmedien.de

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2018 - (Einzeldokumenteverkauf http://www.BODENSCHUTZdigital.de) - 20.02.2018 - 10:26 - (ds)

Lizenziert für Herr Laurens van Ochten.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

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 Müggenborg**

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

ESV
ERICH SCHMIDT VERLAG
Auf Wissen vertrauen

Bestellungen bitte an den Buchhandel oder: **Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG · Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin**
Fax 030/25 00 85-275 · Tel. 030/25 00 85-265 · ESV@ESVmedien.de · www.ESV.info

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2018 - (Einzeldokumenteverkauf http://www.BODENSCHUTZdigital.de) - 20.02.2018 - 10:26 - (ds)