

# Berechnung von Immissionen beim Brand einer Photovoltaik-Anlage aus Cadmiumtellurid-Modulen



Abb. 1: Typischer Brandschaden einer Photovoltaikanlage<sup>1</sup>

## 1 Einleitung und Zielsetzung

In der öffentlichen Diskussion und in Fachkreisen werden bei Dünnschichtmodulen aus Cadmiumtellurid (CdTe-Module) häufig die umweltrelevanten Auswirkungen dieser Module diskutiert. Dabei geht es um

- die Auswirkungen eines Brandes auf die Nachbarschaft und die Allgemeinheit,
- einen möglichen Eintrag von Schadstoffen in den Boden und das Grundwasser (z. B. durch Löschwasser oder bei Zerstörung der Module durch Hagelschlag) und
- die Entsorgung der Photovoltaik-Module (PV-Module).

---

<sup>1</sup> hier keine CdTe-Module

In diesem Infoblatt werden – auf Grundlage der VDI-Richtlinie 3783 – ausschließlich die Auswirkungen für die Nachbarschaft und Allgemeinheit von CdTe-Modulen im Brandfall betrachtet. Dafür wurden die zu erwartenden Immissionskonzentrationen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Brandort berechnet und die Ergebnisse mit den Beurteilungswerten für die entsprechenden Luftschadstoffe verglichen.

In der VDI-Richtlinie 3783, Blatt 1 ist eine Berechnungsmethode zur Abschätzung der Ausbreitung bei „störfallbedingten“ Freisetzungen beschrieben, die auf den Gaußschen Ausbreitungsformeln basiert. Mit dem Berechnungsmodell können die mittlere und ungünstigste Ausbreitungssituation erfasst und Immissionskonzentrationen im Entfernungsbereich zwischen 100 m und 10.000 m vom Quellort ermittelt werden.

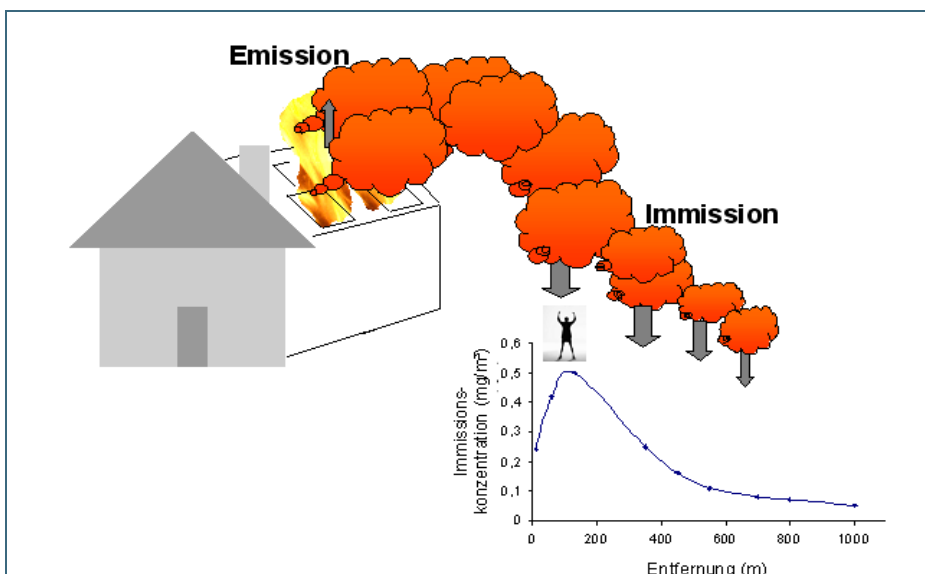


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Brandes von Photovoltaikmodulen mit Brandgasemissionen und typischer Immissionskonzentrationsverlauf in Abhängigkeit von der Entfernung zum Brandort.

## 2 Allgemein

Eine Photovoltaikanlage setzt sich aus mehreren Solarmodulen zusammen. Dabei unterscheidet man z. B. anhand der verwendeten Materialien:

- Siliziumbasierte Module (z. B. monokristallin, polykristallin, amorph)
- Module auf Basis von Halbleiterelementen (z. B. Cadmiumtellurid (CdTe), Kupfer-Indium-Diselenid (CIS), Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS))
- Neue Technologien (z. B. organische Solarzellen, Farbstoffsolarzellen)

Während z. B. die kristallinen Siliziumzellen auch als sogenannte „Dickschichttechnologie“ der 1. Generation bezeichnet werden, ordnet man Halbleiterzellen, amorphe Siliziumzellen sowie einige der neuen Technologien den sogenannten „Dünnschichtzellen“ der 2. und 3. Generation zu.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Branchenorientierte Dialoge zur Entwicklung von Leitmärkten der Ressourceneffizienz auf der Basis von integrierten Technologie Roadmaps, Abschlussbericht zur Arbeitspaket 9, hier Roadmap AP 9.5: Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+, Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU/UBA, [http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRes AP9\\_5\\_AbschlussBer.pdf](http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRes AP9_5_AbschlussBer.pdf), S. 84

Weltweit dominieren siliziumbasierte PV-Module den Markt. Der Anteil der Dünnschichtmodule auf Halbleiterbasis steigt allerdings an. Der Anteil der CdTe-Module innerhalb der Dünnschicht-Technologie betrug 2009 ca. 60 %.<sup>3</sup>

### 3 Cadmiumhaltige PV-Module

Je nach Dünnschichttechnologie können Cadmiumverbindungen in zwei verschiedenen Formen vorliegen,

- als Cadmiumtellurid (CdTe) und/oder
- als Cadmiumsulfid (CdS).

CdTe-Module enthalten Verbindungen aus CdTe und CdS, während CIS und CIGS-Module herstellerabhängig ggf. ausschließlich CdS-Verbindungen enthalten.<sup>4</sup>

Zu beachten ist dabei, dass Cadmium in PV-Modulen nicht als metallisches Element vorliegt, sondern als Cadmiumverbindung in den genannten Formen.

#### 3.1 CdTe

Lt. einer vom Umweltbundesamt geförderten Studie<sup>5</sup> enthielten CdTe-Module zwischen 6,55 g Cadmium/m<sup>2</sup> und 66,4 g Cadmium/m<sup>2</sup>, bei einem Durchschnittswert von ca. 14 g Cadmium/m<sup>2</sup>. Die Cadmium-Konzentration in der Halbleiterschicht beträgt ca. 50 %. Module des weltweit führenden Herstellers enthielten damals 20 g CdTe/m<sup>2</sup> und 1,7 g CdS/m<sup>2</sup>, entsprechend etwa 10 g Cadmium/m<sup>2</sup>.

Nach einer vom BMU geförderten neueren Studie enthält ein typisches CdTe-Modul (120 cm x 60 cm) 18 g CdTe/m<sup>2</sup> und 0,483 g CdS/m<sup>2</sup> und damit weniger als 7 g Cadmium pro Modul. Die Dicke der CdTe-Schicht typischer Module beträgt ca. 7 µm.<sup>6</sup>

#### 3.2 CdS

Der CdS-Anteil in CdTe/CdS-Modulen ist damit erheblich geringer als der CdTe-Anteil. Die CdS-Schicht ist mit < 0,1 µm auch wesentlich dünner als die CdTe-Schicht.

CIS-Module können Cadmiumsulfid enthalten. Der Gehalt liegt zwischen 0,2 und 0,45 g/m<sup>2</sup>, entsprechend 0,002 Gew.-% CdS.<sup>7</sup> Auch CIGS-Module können herstellerabhängig zwischen 0,2 und 0,24 g/m<sup>2</sup> CdS enthalten.<sup>8</sup>

#### 3.3 Aufbau von CdTe-Modulen

Während kristalline Si-Module nur über eine Frontglasscheibe verfügen, sind die Halbleiterschichten bei Dünnschichtmodulen rahmenlos zwischen zwei Glasplatten (Front- und Trägerglas) eingeschlossen. Der relative Glasanteil ist bei Dünnschichtmodulen deshalb generell höher als bei kristallinen Modulen.

<sup>3</sup> [http://www.energie-und-technik.de/erneuerbare-energien/news/article/27654/0/Photovoltaik-Markt\\_waechst\\_2010\\_staecker\\_als\\_erwartet/?cp=0&action=taf\\_form](http://www.energie-und-technik.de/erneuerbare-energien/news/article/27654/0/Photovoltaik-Markt_waechst_2010_staecker_als_erwartet/?cp=0&action=taf_form)

<sup>4</sup> Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaikprodukte und deren Entsorgung, Ökopol, Endbericht 15.01.2004, S. 25, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2789.pdf>

<sup>5</sup> Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaikprodukte und deren Entsorgung, Ökopol, Endbericht 15.01.2004, S. 72, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2789.pdf>

<sup>6</sup> Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystems für Photovoltaische Produkte, Ökopol, et al, November 2007, S. 46, [http://www.pvcycle.de/fileadmin/pvcycle\\_docs/documents/publications/Studie\\_PVCycle\\_Download\\_17\\_de\\_270808.pdf](http://www.pvcycle.de/fileadmin/pvcycle_docs/documents/publications/Studie_PVCycle_Download_17_de_270808.pdf)

<sup>7</sup> Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaikprodukte und deren Entsorgung, Ökopol-Endbericht, 15.01.2004, S. 24

<sup>8</sup> Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystems für Photovoltaische Produkte, Ökopol, November 2007, S. 42

### 3.4 Eigenschaften und Einstufung von CdTe

CdTe ist unter Normalbedingungen ein schwarzes, geruchloses, kristallines Pulver. Es ist ein nicht brennbarer Feststoff und praktisch unlöslich in Wasser. Der Schmelzpunkt der Verbindung liegt bei 1.041°C.<sup>9</sup>

CdTe wird nach der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008<sup>10</sup> über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen als H302 (gesundheitsschädlich bei Verschlucken), H312 (gesundheitsschädlich bei Hautkontakt), H332 (gesundheitsschädlich bei Einatmen) sowie mit H400 (sehr giftig für Wasserorganismen) und H410 (sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung) eingestuft.

## 4 Ausbreitungsberechnung für Schadstoffe aus CdTe-Modulen

### 4.1 Allgemein

Mit Hilfe der nachfolgenden Ausbreitungsberechnung sollen die brandbedingten Auswirkungen für die Nachbarschaft und Allgemeinheit untersucht werden, die sich über den Luftpfad ergeben können. Grundsätzlich hängen Art und Menge der entstehenden Brandgase von den jeweiligen Stoffeigenschaften und den vorhandenen Brandbedingungen ab.

Neben den für einen Gebäudebrand typischen Brandgasen (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.) können beim Brand von CdTe-haltigen Photovoltaik-Modulen unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. hohe Verbrennungstemperatur und Zerstörung der Glasplatten mit entsprechender Freisetzung der cadmiumhaltigen Verbindungen) zusätzlich auch folgende cadmium- bzw. tellurhaltige Brandgase freigesetzt werden:

- Cadmiumdämpfe
- Metalloxiddämpfe (CdO, TeO<sub>2</sub>)

Die Bewertung der Auswirkungen eines derartigen Brandes wird durch einen Vergleich der jeweils ermittelten Immissionskonzentrationen mit relevanten Beurteilungswerten der einzelnen Brandgase vorgenommen.

### 4.2 Randparameter

Die Ausbreitungsberechnung für CdTe-Module erfolgte nach VDI 3783, Blatt 1 und wurde mit dem Computerprogramm STOER V2.23 (R. Röckle, TÜV Umwelt GmbH, Freiburg, 1994) durchgeführt. Für eine „worst-case“-Betrachtung wurden für die Berechnungen folgende Annahmen getroffen:

- Die CdTe-Schicht liegt vollständig frei vor und es werden Temperaturen erreicht, bei denen Cadmium freigesetzt wird.
- Die Emissionszeit beträgt 15 Minuten.
- Die Quellhöhe<sup>11</sup> befindet sich in einer Höhe von 8 m.
- Die Aufpunkthöhe<sup>12</sup> beträgt 1 m.

---

<sup>9</sup> GSBL – Datenbank (Gemeinsamer Stoffdatenpool Bund Länder); [www.gsbl.de](http://www.gsbl.de)

<sup>10</sup> Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:353:0001:1355:de:PDF>

<sup>11</sup> Die Quellhöhe ist die Dachhöhe des Gebäudes, auf der sich die Module befinden.

- Die Berechnungen werden für Quelldimensionen (Fläche der abbrennenden CdTe-Module) von 50 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> und 1.000 m<sup>2</sup> bei verschiedenen Wärmeemissionen durchgeführt.
- Die Konzentrationsangaben in Abhängigkeit von den Entfernung zum Quellort werden für die ungünstigste Ausbreitungssituation angegeben (Windgeschwindigkeit 1 m/s).
- Der Cadmium-Gehalt der Module beträgt zwischen 6,55 und 66,4 g Cd/m<sup>2</sup>. Der Durchschnittswert beträgt 14 g Cd/m<sup>2</sup> PV-Modul.
- Bei den ermittelten Immissionskonzentrationen wird eine 100 %ige Umsetzung angenommen.

Weitere Eingabeparameter für das Programm STOER V2.23 nach VDI 3783:

- Leichtes Gas mit Auftrieb
- Rauigkeitsklasse: 3

Für die Berechnung wird eine kontinuierliche Emissionsquelle unterstellt.

Die Ausbreitungsrechnung nach VDI 3783, Blatt 1 berücksichtigt den thermischen Auftrieb der heißen Verbrennungsgase erst ab Feuerungswärmeleistungen größer 6 MW, so dass der berechnete 6 MW-Brand (ohne thermischen Auftrieb) im kritischen Nahbereich zu hohen Schadstoff-Immissionskonzentrationen führt.

Bei einem unteren Heizwert von Holz mit  $H_U = 17,28$  MJ/kg ergibt sich bei einem 6 MW-Brand eine Abbrandrate von 0,35 kg/s. Wenn 1 kg Holz/s als Brandlast unter den PV-Modulen brennt, dann resultiert daraus ein Brand mit einer Feuerungswärmeleistung von 17,3 MW. Mit steigender Fläche an PV-Modulen und je nach Branddauer sind somit höhere Feuerungswärmeleistungen zu erwarten. Somit wurde bei größeren Flächen auf die Berechnung von geringeren Feuerungswärmeleistungen verzichtet.

Die gewählten Wärmeemissionen leiten sich von der in der Literatur<sup>13</sup> angegebenen spezifischen Abbrandgeschwindigkeit von Holz ab (193 – 288 kW/m<sup>2</sup>).

Die Ausbreitungsrechnungen wurden für folgende Cadmium-Gehalte in den Modulen durchgeführt:

**Fall 1:** 14,0 g Cd/m<sup>2</sup> (durchschnittlicher Cadmium-Gehalt in CdTe-Modulen)

**Fall 2:** 66,4 g Cd/m<sup>2</sup> (Maximalwert)

Es wurden jeweils drei unterschiedlich große Brandflächen betrachtet (50 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> und 1.000 m<sup>2</sup>).

---

<sup>12</sup> Die Aufpunkthöhe ist die Höhe des jeweiligen Immissionsortes (Berechnungspunkt) über Geländehöhe.

<sup>13</sup> Baulicher Brandschutz im Industriebau, Beuth-Kommentare, Kommentar zu DIN 18230 und Industriebaurichtlinie, Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., AGB Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit, Schneider/Max, Bruchsal, Beuth Verlag GmbH, 3. aktualisierte und überarbeitete Auflage 2003, S. 169.

## 5 Berechnungsergebnisse

### 5.1 Fall 1: Cadmium-Gehalt 14 g/m<sup>2</sup>, Brandfläche 50 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> bzw. 1.000 m<sup>2</sup>

Tab. 1/2: (Fall 1) Cadmium-Gehalt: 14,0 g/m<sup>2</sup>, Brandfläche: 50 m<sup>2</sup> PV-Module

Feuerungswärmeleistung 6 MW		Feuerungswärmeleistung 10 MW	
Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]	Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]
100	0,05	100	0,03
200	0,02	200	0,02
500	0,01	500	0,01
1000	0,01	1000	0,004

Tab. 3/4: (Fall 1) Cadmium-Gehalt: 14,0 g/m<sup>2</sup>, Brandfläche: 500 m<sup>2</sup> PV-Module

Feuerungswärmeleistung 60 MW		Feuerungswärmeleistung 100 MW	
Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]	Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]
100	0,09	100	0,05
200	0,05	200	0,03
500	0,02	500	0,01
1000	0,01	1000	0,01

Tab. 5/6: (Fall 1) Cadmium-Gehalt: 14,0 g/m<sup>2</sup>, Brandfläche: 1.000 m<sup>2</sup> PV-Module

Feuerungswärmeleistung 60 MW		Feuerungswärmeleistung 200 MW	
Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]	Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]
100	0,15	100	0,04
200	0,10	200	0,03
500	0,04	500	0,02
1000	0,01	1000	0,01

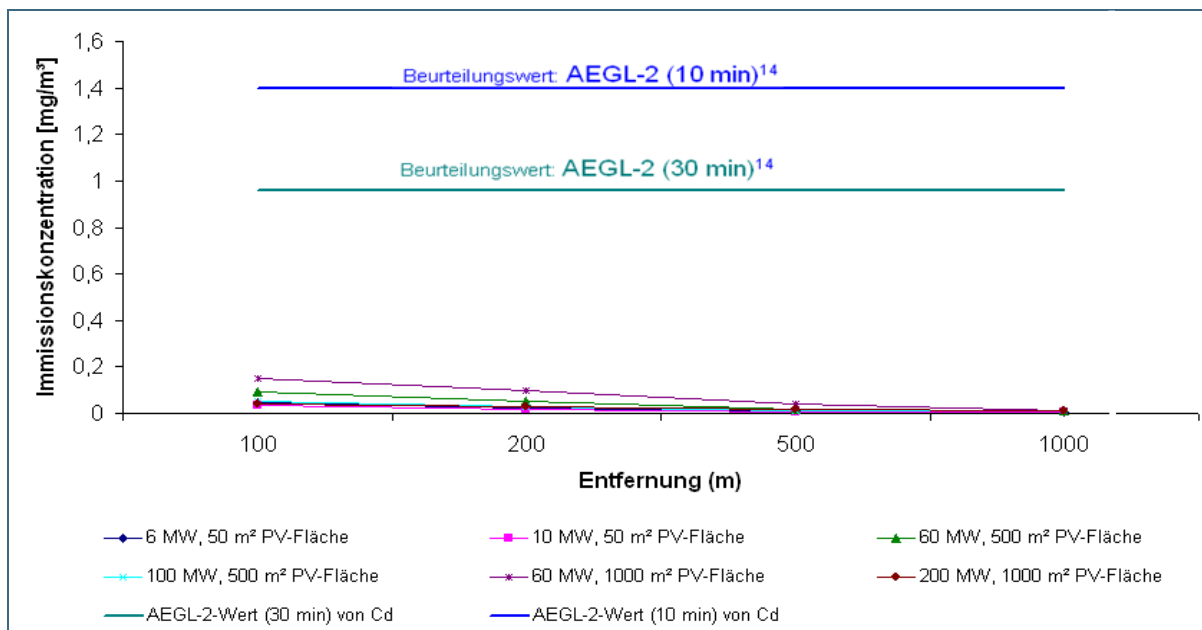


Abb. 3: Darstellung der Cadmium-Immissionskonzentrationen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Brandort bei einem mittleren Cadmium-Gehalt von 14,0 g/m<sup>2</sup> (Fall 1).

<sup>14</sup> AEGL-2 Beurteilungswerte, siehe Erläuterung bei 6.1

## 5.2 Fall 2: Cadmium-Gehalt 66,4 g/m<sup>2</sup>, Brandfläche 50 m<sup>2</sup>, 500 m<sup>2</sup> und 1.000 m<sup>2</sup>

Tab. 7/8: (Fall 2) Cadmium-Gehalt: 66,4 g/m<sup>2</sup>, Brandfläche: 50 m<sup>2</sup> PV-Module

Feuerungswärmeleistung 6 MW		Feuerungswärmeleistung 10 MW	
Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]	Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]
100	0,21	100	0,16
200	0,10	200	0,08
500	0,04	500	0,03
1000	0,01	1000	0,02

Tab. 9/10: (Fall 2) Cadmium-Gehalt: 66,4 g/m<sup>2</sup>, Brandfläche: 500 m<sup>2</sup> PV-Module

Feuerungswärmeleistung 60 MW		Feuerungswärmeleistung 100 MW	
Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]	Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]
100	0,41	100	0,23
200	0,25	200	0,15
500	0,09	500	0,06
1000	0,03	1000	0,03

Tab. 11/12: (Fall 2) Cadmium-Gehalt: 66,4 g/m<sup>2</sup>, Brandfläche: 1.000 m<sup>2</sup> PV-Module

Feuerungswärmeleistung 60 MW		Feuerungswärmeleistung 200 MW	
Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]	Entfernung [m]	Cd-Konz. [mg/m <sup>3</sup> ]
100	0,66	100	0,16
200	0,42	200	0,16
500	0,16	500	0,08
1000	0,07	1000	0,04

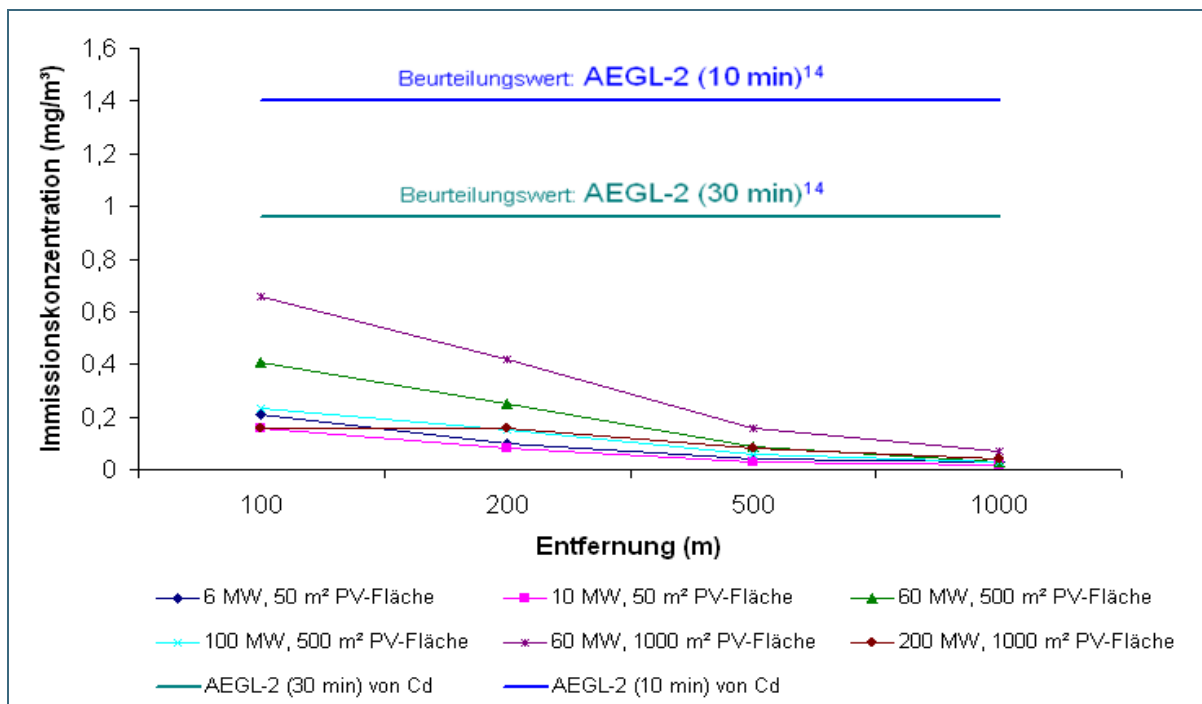


Abb. 4: Darstellung der Cadmium-Immissionskonzentrationen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Brandort bei einem maximalen Cadmium-Gehalt von 66,4 g/m<sup>2</sup> (Fall 2).

## 6 Bewertung

### 6.1 Beurteilungswerte

Als Beurteilungswerte für Luftschadstoffe werden – sofern vorhanden – i. d. R. die AEGL- oder ERPG-Werte herangezogen.<sup>15</sup> Diese Werte sind toxikologisch begründete Spitzenkonzentrationswerte und werden für jeweils drei verschiedene Effekt-Schweregrade angegeben.

AEGL-1/ERPG-1	Schwelle zum spürbaren Unwohlsein
AEGL-2/ERPG-2	Schwelle zu irreversiblen oder anderen schwerwiegenden, lang andauernden Gesundheitseffekten oder fluchtbehindernden Wirkungen
AEGL-3/ERPG-3	Schwelle zur lebensbedrohlichen oder tödlichen Wirkung

AEGL-Werte werden für verschiedene Expositionszeiträume angegeben (10 min, 30 min, 1 Stunde, 4 Stunden, 8 Stunden), während ERPG-Werte nur für einen Expositionszeitraum von einer Stunde ausgelegt sind.

Sind keine AEGL- oder ERPG-Werte veröffentlicht, so kann in diesem Fall auf die jeweiligen PAC-2-Werte zurückgegriffen werden.<sup>16</sup> PAC-Werte basieren auf AEGL-, ERPG- oder TEEL<sup>17</sup>-Werte.

Zur Beurteilung, ob eine ernste Gefahr für die Nachbarschaft oder Allgemeinheit besteht, wird i. d. R. der AEGL-2- bzw. ERPG-2-Wert herangezogen.

#### 6.1.1 Beurteilungswerte für Cadmium

Für Cadmium sind folgende AEGL-2-Werte veröffentlicht:

Expositionszeitraum 10 min	1,4 mg/m <sup>3</sup>
Expositionszeitraum 30 min	0,96 mg/m <sup>3</sup>

Da sich die berechneten Immissionskonzentrationen auf Cadmium beziehen, können diese direkt (ohne Umrechnung) mit dem entsprechenden AEGL-Wert verglichen werden.

#### 6.1.2 Beurteilungswerte für CdO und TeO<sub>2</sub>

Für CdO und TeO<sub>2</sub> sind keine AEGL- oder ERPG-Werte veröffentlicht. Der PAC-2-Wert von CdO beträgt 4 mg/m<sup>3</sup>, der von TeO<sub>2</sub> beträgt 31,3 mg/m<sup>3</sup>.

Zur Beurteilung der CdO-Immissionskonzentration müssen die ermittelten Cadmium-Immissionskonzentrationen in den Tabellen 1 - 12 mit dem Faktor 1,14 (Emissionsfaktor: 1,14 g CdO/g Cadmium) multipliziert werden, um die CdO-Konzentrationen zu erhalten. Danach kann dieser Wert mit dem PAC-2-Wert von CdO verglichen werden.

Bei Annahme nahezu gleicher Mengenverhältnisse von Cadmium und Tellur in einem PV-Modul kann aufgrund gleicher Quellstärke beider Stoffe die gleiche, oben dargestellte Immissionsberechnung herangezogen werden. Um

<sup>15</sup> AEGL: Acute Exposure Guideline Levels; <http://www.epa.gov/oppt/aegl/index.htm>

ERPG: Emergency Response Planning Guidelines; <http://www.aiha.org/insideaiha/GuidelineDevelopment/ERPG/Pages/default.aspx>

<sup>16</sup> PAC: Protective Action Criteria; <http://www.atlant.com/DOE/teels/teel.html>

<sup>17</sup> TEEL: Temporary Emergency Exposure Limits



die Immissionskonzentration von  $\text{TeO}_2$  zu erhalten, sind die ermittelten Konzentrationen in den Tabellen 1 - 12 mit dem Faktor 1,25 (Emissionsfaktor: 1,25 g  $\text{TeO}_2$ /g Te) zu multiplizieren.

## 6.2 Ergebnisdiskussion

Der Vergleich der berechneten Immissionskonzentrationen mit den entsprechenden Beurteilungswerten AEGL-2/PAC-2 zeigt, dass die betrachteten Beurteilungswerte für alle aufgeführten Fälle unterschritten werden (s. Abbildungen 3 und 4).

Im Detail zeigen die Berechnungsvarianten, dass z. B. bei einem Cadmium-Gehalt von 14,0 g/m<sup>2</sup>, einer Brandfläche von 50 m<sup>2</sup> und einer Feuerungswärmeleistung von 6 MW in einer Entfernung von 100 m zum Emissionsort das gesamte freigesetzte Cadmium zu einer Immissionskonzentration von 0,05 mg/m<sup>3</sup> an reinem Cadmiumdampf führen würde. Der Vergleich dieser berechneten Werte mit den Beurteilungswerten (hier AEGL-2 (10 min) von Cadmium = 1,4 mg/m<sup>3</sup>) zeigt, dass dieser Beurteilungswert deutlich unterschritten ist.

Der höchste ermittelte Werte liegt erwartungsgemäß bei einem Brand der größten Fläche (1.000 m<sup>2</sup>) mit dem maximalen Cadmium-Modulgehalt (66,4 g/m<sup>2</sup>) und in kürzester berechenbarer Entfernung (100 m) vom Emissionsort vor. Die berechnete Immissionskonzentration von Cadmium (0,66 mg/m<sup>3</sup>) liegt dennoch deutlich unter dem entsprechenden Beurteilungswert von Cadmium.

Zusätzlich ist zu beachten, dass bei den Berechnungen unterstellt wird, dass sämtliches im Modul enthaltene Cadmium aus der CdTe-Verbindung vollständig als Cadmium-Dampf freigesetzt wird. Eine Reaktion zu CdO oder eine mögliche Diffusion des Cadmiums in die Glasschmelze wurden bei der Ermittlung der Cadmium-Immissionskonzentrationen nicht berücksichtigt. So ergab eine Studie zu Brandprüfungen von handelsüblichen CdTe-Modulen, die in Laborversuchen auf für Wohnungs- und Betriebsgebäudebrände typische Temperaturen von 760°C bis 1.100 °C erhitzt wurden, dass über 99 % des Cadmiums in der geschmolzenen Glasmatrix verbleiben.<sup>18</sup>

Aufgrund der thermischen Umsetzungsvorgänge ist eher davon auszugehen, dass sich nur ein geringer Anteil des Cadmiums in reines Cadmium umsetzt, während weitere Anteile sich zu CdO umsetzen oder als CdTe bzw. CdS nicht umgesetzt werden. In diesem Fall wären die entsprechenden Beurteilungswerte weiter deutlich unterschritten.

Da die entsprechenden Beurteilungswerte von CdO und  $\text{TeO}_2$  größer sind als der Beurteilungswert von Cadmium, werden diese in einer Entfernung von 100 m zum Quellort deutlich unterschritten.

Auch die nachfolgend aufgeführten Aspekte zeigen, dass die durchgeführten Berechnungen auf äußerst konservativen Annahmen basieren:

- Das Berechnungsverfahren VDI 3783, Blatt1 führt im Vergleich zu anderen Berechnungsverfahren<sup>19</sup> zu höheren Immissionen und kann als äußerst konservatives Modell bezeichnet werden.

<sup>18</sup> Fthenakis, V. et al (2005): Emissions and Encapsulation of Cadmium in CdTe- PV Modules During Fires. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.624/pdf>

<sup>19</sup> z. B. LASAT (Lagrange-Simulation von Aerosol-Transport)

- Die Annahme einer längeren Emissionsdauer hätte eine geringere Quellstärke und damit geringere Immissionskonzentrationen zur Folge.
- Der zugrunde gelegte maximale CdTe-Gehalt (66,4 g/m<sup>2</sup>) ist nur von einem Hersteller bekannt und liegt bei anderen Herstellern sowie bei neueren CdTe-Modulen deutlich niedriger.
- In der Realität müssen bei einem Brand nicht immer alle PV-Module zerstört werden.
- In der Realität müssen bei einem Brand nicht sämtliche CdTe-Schichten vollständig freiliegen.

Selbst bei diesen äußerst konservativen und sogar nahezu unrealistischen Annahmen werden die entsprechenden Beurteilungswerte für reine Cadmiumimmissionen sowie für die Metalloxidverbindungen CdO und TeO<sub>2</sub> bei den berechneten Entfernungen ab 100 m vom Quellort deutlich unterschritten.

### 6.3 Fazit

Die durchgeführten Ausbreitungsberechnungen zeigen, dass bei einem Brand von CdTe-haltigen Modulen aus fachlicher Sicht eine ernste Gefahr für die umliegende Nachbarschaft und Allgemeinheit sicher ausgeschlossen werden kann.

## 7 Weiterführende Informationen

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2011): Schadstoffe bei Brandereignissen,

[http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw\\_15\\_brandereignisse.pdf](http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_15_brandereignisse.pdf). UmweltWissen, 12 Seiten

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (1995): Beurteilung von Kunststoffbränden,

<http://www.lfu.bayern.de/luft/doc/kunststoffbraende.pdf>. 54 Seiten

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010): Entsorgung von PV-Anlagen,

[http://www.izu.bayern.de/faq/detail\\_faq.php?pid=0501020100299](http://www.izu.bayern.de/faq/detail_faq.php?pid=0501020100299). Infozentrum UmweltWirtschaft (IZU),

---

#### Impressum:

##### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

##### Bearbeitung:

Ref. 31 / Jürgen Beckmann  
Ref. 22 / Dr. Anke Mennenga

Telefon: 0821 9071-0

Telefax: 0821 9071-5556

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

##### Bildnachweis:

Abbildung 1: Hr. Putz, Landratsamt  
Unterallgäu

##### Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
86177 Augsburg

##### Stand:

August 2011



---

Diese Veröffentlichung finden Sie im Internet unter <http://www.lfu.bayern.de/luft/doc/pvbraende.pdf>

Die Veröffentlichung wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.