

## **Kurzzusammenfassung:**

### **Systematische Untersuchung des Brandverhaltens und des Feuerwiderstandes von PV-Modulen einschließlich der Emissionen im Brandfall und Entwicklung eines Prüfverfahrens zum Einfluss von PV-Modulen auf die harte Bedachung**

Projektleiterin: Dr. Simone Krüger

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.39/ II 3-F20-10-1-113

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Es wurden systematische Brandversuche an verschiedenen PV-Modulen durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Brandszenarien unterschiedlicher Beanspruchungsniveaus mit handelsüblichen Modulen realisiert und das Brandverhalten sowie deren Brandprodukte analysiert.

Bei der Beurteilung des Brandverhaltens und der Feuerwiderstandsfähigkeit beziehen wir uns nur auf untersuchte Module. Da es einen sehr umfangreichen Markt gibt, haben wir eine Auswahl von Vertretern aus verfügbaren Kategorien ausgewählt. Zu den im Brandfall untersuchten Modulen gehörten Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Folie sowie Dünnschicht-Module der Bauweise Glas/Glas (a-Si, CdTe, CIGS) sowie der Bauweise Glas/Folie und Folie/Folie. Für weiterreichende Verallgemeinerungen müssten umfangreichere Versuchsreihen durchgeführt werden.

Zunächst wurden die PV-Module dem niedrigsten Brandbeanspruchsniveau ausgesetzt, einer Prüfung zur Normalentflammbarkeit von Baustoffen [B2] nach EN 13501-1 oder der DIN 4102-1. Problematisch war dabei die Herstellung der geforderten kleinen Probengröße. Beim Zuschneiden kann es zum Glasbruch kommen und es kann Temperatureinflüsse bei ungehärteten Gläsern geben. Es konnten gute Erfahrungen beim Zuschneiden mit dem Wasserstrahlverfahren gemacht werden. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass ein Prüfen des gesamten Moduls unter den entsprechenden Normbedingungen (Flammenlänge, Abstand zum Modul, etc.) die gleichen Ergebnisse liefert, wie eine nach Norm zugeschnittene Modulprobe. Vorteil beim Testen eines realen Moduls ist der originale Materialaufbau, der ein reales Gesamtverhalten widerspiegelt und die einfachere Handhabung.

Im weiteren Vorgehen wurden die PV-Module mit dem Drahtkorbtest nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 getestet. Keines der untersuchten Module zeigte in Anlehnung an die Norm brennendes Abtropfen, Herabfallen von Teilen, Öffnungen oder Flammendurchgänge. Die Schadensflächen waren gering. In zusätzlichen Versuchen wurde die Konfiguration des mit Holzwohle gefüllten Drahtkorbs modifiziert, in dem der Brandsatz sowohl an der unteren Kante der Module als auch unter das aufgeständerte Modul gestellt wurde. Die Kantenbeflammung bewirkt dabei keine weiteren Schäden. Im Fall der unteren Beflammung konnte nur bei einem Modul (a-Si-Dünnschicht-Modul) ein Flammendurchgang mit Glasbruch nach 4 min

verzeichnet werden. Nach Versuchsende war die elektrische Leistung bei allen untersuchten Modulen noch zwischen 12-95% vorhanden.

Im Brandbeanspruchsniveau weiter steigend wurden die PV-Module mit dem Burning Brand Test in Anlehnung an IEC 61730/UL 790 getestet. Alle untersuchten Module bestehen die Minimalanforderungen der Klasse C nach Beanspruchung mit der kleinsten Holzkrippe (10 g). Dabei wiesen alle untersuchten Module keine Schäden sowie 100% elektrische Leistungsfähigkeit nach den Versuchen auf. Bei Beanspruchung mit der nächst größeren Holzkrippe (500 g) der Klassifikation B zeigten alle untersuchten PV-Module der Bauweise Glas/Folie eine starke Rauchentwicklung, brennendes Abtropfen nach wenigen Minuten und einen Flammendurchgang nach 2-8 min. Die untersuchten Module der Bauweise Glas/Glas hingegen zeigten kein brennendes Abtropfen und es kam zu keinem Flammendurchbrand. Die elektrische Leistung war nach den Versuchen unter 10%. Hingegen zeigten alle untersuchten Module nach den Brandversuchen mit der größten Holzkrippe (2 kg, Klasse A) umfangreiche Schadensflächen und eine elektrische Leistung von 0%. Der Flammendurchbruch fand nach etwa 2 min statt, verbunden mit dem Abfallen von Teilen und brennendem Abtropfen. Das Feuer verlöschte nach 8-10 min.

Entsprechende Brandversuche mit Dachpappe als Untergrund bewirkten keine Veränderungen. Nach dem brennenden Abtropfen der PV-Module kam es zu keinem Weiterbrennen der Dachpappe und das Feuer verlöschte von alleine.

Ein Vergleich durchgeführter Brandversuche mit sehr „preiswerten“ und „teuren“ chinesischen Modulen zeigte keine wesentlichen Veränderungen im Brandverhalten in Abhängigkeit des Preises, da der prinzipielle Aufbau anscheinend gleich ist. Die untersuchten chinesischen Module wiesen hingegen im Vergleich zu anderen untersuchten vergleichbaren Modulen eine längere Widerstandsfähigkeit gegen Feuer von außen auf.

Um das Brandverhalten von vertikal montierten PV-Modulen beurteilen zu können, wurden SBI-Brandversuche nach DIN EN 13823 mit unterschiedlichen Brandbeanspruchungen durchgeführt. Nach normkonformer Brandbeanspruchung von 30 kW kommt es zwar zum Glasbruch und Abfallen kleinerer Teile, aber die vertikale Konstruktion an der Wand bleibt bei einer Testzeit von 30 min stabil. Im Gegensatz dazu fällt das Modul nach einer Brandbeanspruchung von 130 kW bereits nach 6 min aus der Halterung von der Wand und brennt noch weitere 7 Minuten. Nach den Brandversuchen konnte an den untersuchten PV-Modulen noch Strom gemessen werden.

Des Weiteren wurde ein Testverfahren entwickelt, um das Brandverhalten der PV-Module in einer einzigen Versuchsanlage unter variablen Brandbedingungen beurteilen zu können. Zu den veränderbaren Bedingungen gehören die Brennerleistung, die das jeweilige Brandszenario nachstellt sowie die Konfiguration des Brenners zur Simulation eines Feuers von innen oder außen. Vorteile dieses Testverfahrens sind die variablen Brandbedingungen, die an die Anforderungen angepasst werden können und die einfache Handhabbarkeit. Es müssen keine Brandsätze hergestellt werden, das Beanspruchungsniveau kann durch die Brennerleistung einfach angepasst werden und es kann Feuer von innen und außen in einem Versuchsaufbau getestet werden.

Es wurden Brandversuche mit Brennerleistungen von 16, 30 und 46 kW durchgeführt, die in etwa den Beanspruchungsniveaus der Brandklassen des

Burning Brand Tests in Anlehnung an IEC 61730/UL 790 und dem Drahtkorbttest in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 entsprechen. Je nach Beanspruchungsniveau kam es zu kleineren bis sehr großen Schäden.

Bei einer Gasbrennerleistung von 16 kW, kam es bei keinem der untersuchten PV-Module zu einem Flammendurchgang innerhalb der Versuchsdauer von 15 min. Allerdings zeigten die Module der Bauweise Glas/Folie nach etwa 2 Minuten bereits eine starke Rauchentwicklung und es kam zum brennenden Abtropfen. Im Gegensatz dazu zeigten die Module der Bauweise Glas/Glas dieses Verhalten nicht, aber es kam dennoch zum Glasbruch der oberen Glasschicht. Die elektrische Leistung der untersuchten PV-Module nach allen 16 kW-Brandtests lag zwischen 17-26%.

Bei einer Brennerleistung von 30 kW waren größere Schäden an den untersuchten PV-Modulen zu verzeichnen, eine starke Rauchentwicklung und ein Flammendurchgang nach 6-8 min. Die Dünnschicht-Module (Glas/Glas) unterschieden sich von den Dickschicht-Modulen mit einem Glasbruch, der nach ca. 1 min bei allen Gasbrenner-Versuchen unabhängig von der Brennerleistung stattfand. Die Dünnschicht-Module der Bauweise Glas/Glas zeigten kein brennendes Abtropfen nach Beanspruchung von 30 kW. Die Dickschicht-Module (Glas/Folie) wiesen hingegen ein starkes Abbrennen der Kunststoffrückseitenfolie mit brennendem Abtropfen und Abfallen von brennenden Teilen auf. Nach den Gasbrenner-Versuchen liegt die elektrische Leistung noch bei ca. 10%. Weitere Tests zeigten, dass Dachpappe als Dachunterlagen keinen Brand weiterleitet, trotz starken brennenden Abtropfens der PV-Module, es kam zu keiner Entzündung der Dachpappe.

Gasbrennerversuche mit einer Brennerleistung von 46 kW zeigten ein ähnliches Brandverhalten, wie bei den Versuchen mit 30 kW, nur waren teilweise die Schadensflächen nach den Versuchen etwas größer.

Weiterhin wurde mit dem neuen Testverfahren ein Brand von innen simuliert, wobei der Brenner unter dem Modul konfiguriert war. Bei einer Brennerleistung von 30 kW, welche als Standard für dieses Testverfahren festgelegt wurde, zeigten sich deutlich größere Schäden im Vergleich zur Brandbeanspruchung von außen, sowohl bei den untersuchten Dickschicht-Modulen als auch bei den Dünnschicht-Modulen. Die Module der Bauweise Glas/Folie wiesen eine sehr starke Rauch- und Flammenentwicklung bereits nach 25 Sekunden auf und am Ende des Tests war das gesamte Modul stark beschädigt, obwohl es zu keinem Flammendurchgang kam. Im Gegensatz dazu zeigten die Dünnschicht-Module der Bauweise Glas/Glas einen Durchbrand bereits nach 2 min sowie relativ kleine Schadensflächen und 0% elektrische Leistung nach den Brandversuchen. Im Gegensatz dazu konnte nach den Gasbrenner-Versuchen an allen anderen verbrannten Modulen noch eine restliche elektrische Leistung von bis zu 26% gemessen werden.

Die durchgeführten Standardtestverfahren und die Brandversuche mit dem neuentwickelten Testverfahren dienen hauptsächlich der Beurteilung des Brandverhaltens von PV-Modulen und damit der Beurteilung mechanischer, elektrischer und energetischer Gefahren, die von PV-Modulen ausgehen können. Des Weiteren wurde auch die Rauchentwicklung zur Einschätzung von Sichtweiten während der Brandversuche beurteilt. Die Beurteilung stofflicher Gefahren, d.h. die Toxizität der Brandprodukte erfolgte schwerpunktmäßig in Laborbrandversuchen in der Rauchkammer nach ISO 5659-2 (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme), im Cone Calorimeter nach ISO 5660 (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunke, Absaugung 24 L/min) und in der SBI-Apparatur nach DIN EN 13823 (30, 130 kW). Dabei wurden zum einen die

Rauchgaszusammensetzung zur Beurteilung der Rauchgastoxizität und zum anderen der Brandrückstand in Hinblick auf toxische Brandprodukte, wie Schwermetalle, chemisch-analytisch untersucht.

Die Rauchentwicklung ist während der Brandversuche im Vergleich zu z.B. Kunststoffen relativ gering. In der geschlossenen Rauchkammer sinkt die Transmission von den CdTe-, CIGS- und a-Si-Dünnschicht-Modulen während einer Versuchszeit von 20 min in der Rauchkammer von ca. 95% auf 40% innerhalb von zwei Minuten nach Entzündung der Proben. Die Entzündung der Proben erfolgte 4-6 min nach Beginn des Tests. In einem offenen gut ventilerten System, wie dem Cone Calorimeter, ist die Rauchentwicklung etwas geringer. Dabei schneiden die Dünnschicht-Module der Bauweise Glas/Glas am besten ab, es werden Transmissionswerte der Rauchgase zwischen 70-80% erreicht. Die gesamte Rauchfreisetzung ist ca. 200 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> und ist untereinander sehr ähnlich. Die Entzündung der Proben erfolgte nach etwa 2 min und die Rauchentwicklung war nach ca. 4 min beendet. Im Gegensatz dazu zeigten die Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Folie eine frühzeitigere Entzündung nach ca. 1 min und eine stärkere Rauchentwicklung mit einer gesamten Rauchfreisetzung von ca. 380 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> während der Brandversuche im Cone Calorimeter.

Die Rauchgaszusammensetzung wurde durch Kopplung eines FTIR-Spektrometers an das Cone Calorimeter und an die Rauchkammer kontinuierlich während der Laborbrandversuche gemessen. Durch eine Kalibrierung des Spektrometers war eine quantitative Beurteilung der toxischen Rauchgaskonzentrationen möglich. Zusätzlich wurde für Essigsäure eine neue Kalibrieremethode entwickelt, als sich herausstellte, dass Essigsäure als Zersetzungsprodukt der Folie entstand.

Neben den Hauptprodukten CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O entstand weiterhin CO, als Produkt der unvollständigen Verbrennung der Laminatfolie. Weiterhin konnte Essigsäure als Zersetzungsprodukt der EVA-Folie in größeren Mengen während der Laborbrandtests nachgewiesen werden. Weitere Gase, wie Methan, Formaldehyd und Ethen konnten in geringen Mengen detektiert werden, während andere untersuchte Gaskomponenten, wie SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl, HCN, HBr, Benzen und Phenol nicht eindeutig nachgewiesen werden konnten. Die Rauchgaszusammensetzung ist bei allen untersuchten PV-Modulen sehr ähnlich und unterscheidet sich nur in der Quantität der Gaskomponenten. Die Module der Bauweise Glas/Folie wiesen durch das zusätzliche Brennen der Rückseitenfolie wesentlich höhere Konzentrationswerte für CO und CO<sub>2</sub> auf als die Module des Glas/Glas-Aufbaus. Untersuchte CIGS-Module zeigten während der Laborbrandversuche insgesamt höhere Konzentrationswerte als die CdTe- und a-Si-Dünnschicht-Module.

Zur Beurteilung der stofflichen Gefahren wurde die maximale Konzentration der Gaskomponenten, die während der Laborbrandtests gemessen wurden, mit toxikologisch begründeten Grenzwerten (siehe Kapitel 4) verglichen. Da die verfügbaren toxikologischen Daten untereinander nicht einheitlich und eine Funktion der Exposition sind, können die Daten miteinander nicht direkt verglichen werden. Es handelt sich hierbei nur um einen Trend. Während der Brandversuche von Si-Dickschicht-Modulen im Cone Calorimeter entstanden hohe CO-Konzentrationen (ca. 800 ppm). Weiterhin kam es bei den Laborbrandversuchen der untersuchten PV-Module zur erhöhten Freisetzung von Essigsäure (zwischen 50-120 ppm im Cone Calorimeter und 220-290 ppm in der Rauchkammer). Weiterhin entstanden erhöhte Konzentrationswerte von Formaldehyd während der Brandversuche von CIGS-

Modulen in der Rauchkammer (ca. 24 ppm). Bei der Übertragbarkeit von bench-scale zu large scale sollte man berücksichtigen, dass PV-Module im Normalfall auf dem Dach und unter freiem Himmel angebracht sind und mit zunehmendem Abstand die Konzentrationen der Gaskomponenten abnehmen [5].

Zur weiteren Beurteilung der Toxizität der Brandprodukte wurden die Brandrückstände chemisch-analytisch untersucht, um festzustellen, ob in Dünnschicht-Modulen enthaltene Schwermetalle im Brandfall in die Umwelt emittiert werden können. Mit Hilfe von atomspektroskopischen Methoden (ICP-OES optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma und AAS Atomabsorptionsspektrometrie) konnte der Schwermetallgehalt in den unbeanspruchten und in den verbrannten PV-Modulen bestimmt werden. Die Differenz aus beiden gibt Informationen über die Freisetzung der Elemente Cadmium, Tellur, Gallium, Selen, Kupfer und Indium. Die Brandrückstandsproben von CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulen wurden sowohl aus Laborbrandversuchen (in der Rauchkammer, 50 kW/m<sup>2</sup>, mit Pilotflamme) als auch aus Dachttest-Versuchen (Burning Brand Test, mit Wind) zunächst mechanisch gemahlen und dann chemisch aufgearbeitet. Die so gewonnenen Extrakte wurden mittels Atomspektrometrie auf ihre chemische Zusammensetzung hin untersucht und die Konzentration der Schwermetalle bestimmt.

Für alle untersuchten CdTe-Module blieb im Mittelwert der größte Teil der ursprünglichen Schwermetalle auch nach dem Brand im Rückstand. Der Elementanteil in den Rückständen war für Cadmium zwischen 94-100% und für Tellur bis zu 96%. Es ist zu vermuten, dass diese Elemente im geschmolzenen Glas eingekapselt werden und somit nicht freigesetzt werden. Ähnliche Ergebnisse wurden in [47] publiziert.

Die untersuchten CIGS-Module zeigten nach dem Brandtest einen Elementverlust von 12 bis 18% (Kupfer -18%, Gallium -12%, Indium -17%, Selen -14% und Cadmium -13%). Ein Teil der Elemente könnte also in Form von Rauch emittiert worden sein. Allerdings weisen die Messungen sowohl bei den unbeanspruchten (Standardabweichung 5%) als auch bei den verbrannten Proben (Standardabweichung zwischen 10-13%) große Streuungen der ermittelten Elementkonzentrationen auf, so dass auch hier keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können. Die Streuungen können zum einen an der inhomogenen Verteilung der Elemente im Modul, aber auch an systematischen Fehlern im Laufe der chemischen Aufarbeitung der Brandrückstandsproben liegen. Zusätzlich ist die Reproduzierbarkeit des Brandszenarios systematischen Fehlern unterlegen. Deshalb ist die Standardabweichung der Elementkonzentrationen im Brandrückstand etwas größer als in den unbeanspruchten Proben. Die analytischen Methoden selber weisen dagegen nur einen Fehler von +/- 1% auf.