

F 2897

Simone Krüger, Bernd Teichmann, Marie Despinasse, Benjamin Klaffke

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



Fraunhofer IRB Verlag

#### F 2897

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9248-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

# Solarmodule im Brandfall

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



## Endbericht

22.01.2014

Dr. Simone Krüger



Dipl.-Ing. Bernd Teichmann

Dipl.-Chem. Marie Despinasse

Benjamin Klaffke

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.

## Inhaltsverzeichnis

1	AUF	GABEN	ISTELLUNG UND ZIEL	7	
	1.1	Motiv	ation	7	
	1.2	Absch	nätzung der Häufigkeit von Bränden an PV-Anlagen	8	
2	STA	ND DEF	R TECHNOLOGIE BEI PV-MODULEN	10	
	2.1	Markt	anteile	12	
	2.2	Modu	Ikosten und Wirkungsgrade	13	
		2.2.1	Einfluss des Neigungswinkels und der Ausrichtung	14	
		2.2.2	Freiflächenanteile und Anlagengrößen	15	
	2.3	Modu	I-Aufbau und Montagesysteme von PV-Modulen	16	
		2.3.1	Aufbau	16	
		2.3.2	Montagesysteme	17	
	2.4	Solar	glas	20	
	2.5	Regio	nale Verteilung in Deutschland	20	
	2.6	Anteil	der PV an der regenerativen Stromerzeugung	21	
3	BRA	NDPRÜ	JFUNGEN VON PV-MODULEN	24	
	3.1	Branc	lverhalten von Baustoffen	25	
	3.2	Branc	lverhalten von Bedachungen	26	
	3.3	3 Amerikanisches Prüfverfahren für Bedachungen nach UL 790			
	3.4	Branc 61730	Itechnologische Anforderungen von PV-Modulen nach IEC )-2	28	
4	GEF	ÄHRDU	ING DURCH TOXISCHE BRANDPRODUKTE	29	
5	DUR	CHFÜF	IRUNG DER BRANDVERSUCHE	37	
	5.1	Mater	ialen	37	
	5.2	Labor	brandversuche mit PV-Modulen	38	
		5.2.1	Normalentflammbarkeit im Brennkasten nach DIN 4102-1 (bzw. ISO 11925- 2)	38	
		5.2.2	Brandversuche in der Rauchkammer nach ISO 5659-2	40	
		5.2.3	Brandversuche im Cone Calorimeter nach ISO 5660	41	
		5.2.4	Brandversuche in der SBI-Apparatur nach DIN EN 13823	45	
	5.3	Branc	lversuche von PV-Modulen auf einem Testdach	47	
		5.3.1	Brandversuche mit dem Drahtkorb nach CEN TS 1187/1	47	
		5.3.2	Burning Brand Test nach IEC 61730-2	65	

6	ENTV	VICKL	UNG EINES NEUEN TESTVERFAHRENS	77				
	6.1	Versuchsaufbau						
	6.2	Kalibr	ierung des Gasbrenners	80				
	6.3	Wärmestrahlungsstromdichten						
	6.4 Brandbeanspruchung der PV-Module durch Feuer von auß		beanspruchung der PV-Module durch Feuer von außen	83				
		6.4.1	Einfluss der Wärmestrahlung auf Si-Dünnschicht-Module	83				
		6.4.2	Einfluss der Wärmestrahlung auf Si-Dickschicht-Module	88				
		6.4.3	Vergleich der PV-Module nach Brandbeanspruchung von außen mit 30 kW	98				
		6.4.4	Brandversuche von PV-Modulen mit Dachpappe als Dachuntergrund	100				
	6.5	Bean	spruchung der PV-Module durch Feuer von innen	102				
		6.5.1	Einfluss der Wärmestrahlung auf Si-Dünnschicht-Module	102				
		6.5.2	Einfluss der Wärmestrahlung auf Si-Dickschicht-Module	104				
		6.5.3	Vergleich der PV-Module nach Brandbeanspruchung von innen mit 30 kW	107				
	6.6	Zusar	mmenfassung Gasbrenner-Tests	108				
7	BEUF	RTEILL	JNG DER RAUCHGASEMISSION IM BRANDFALL	110				
	7.1	Rauc	hentwicklung	110				
	7.2	Rauc	hgaszusammensetzung	115				
		7.2.1	Rauchgaszusammensetzung in der Rauchkammer nach ISO 5659-2	115				
		7.2.2	Rauchgaszusammensetzung im Cone Calorimeter nach ISO 5660	119				
	7.3	Erstellen einer Kalibrierung zum qualitativen und quantitativen Nachweis von Essigsäure 1						
	7.4	Beurt	eilung der Rauchgastoxizität	132				
8	BRAI	NDRÜC	CKSTANDSANALYTIK DER PV-MODULE	136				
	8.1	Erzeu	igung von Brandrückstandsproben	137				
		8.1.1	Brandrückstandsproben aus der Rauchkammer nach ISO 5659-2	137				
		8.1.2	Brandrückstandsproben aus dem Cone Calorimeter nach ISO 5660	138				
		8.1.3	Brandrückstandsproben nach Burning Brand Test nach IEC 61730-2	139				
	8.2	Brand	drückstandsproben-Aufarbeitung	141				
		8.2.1	Mechanische Aufarbeitung	141				
		8.2.2	Chemische Aufschlussverfahren	142				
	8.3	Metho	oden zur quantitativen Erfassung von Schwermetallen	144				
		8.3.1	Voruntersuchungen	145				
		8.3.2	Ausgewählte Methode	145				
	8.4	Beurt	eilung der Schwermetallkonzentration in PV-Modulen	146				
		8.4.1	Ergebnisse der Rückstandsanalytik von CdTe-Dünnschicht-Modulen	147				
		8.4.2	Ergebnisse der Rückstandsanalytik von CIGS-Dünnschicht-Modulen	149				

9	ZUSAMMENFASSUNG	151
10	AUSBLICK	155
11	LITERATUR	157

## 1 Aufgabenstellung und Ziel

## 1.1 Motivation

In Deutschland sind z.Zt. über 1 Million Photovoltaik (PV)-Anlagen am Netz [1]. Immer häufiger kommen dabei Dünnschicht-Module mit toxikologisch bedenklichen Inhaltsstoffen zum Einsatz wie z.B. Cadmium, Indium oder Selen. Aber selbst die klassischen Silizium-Dickschichtmodule enthalten als Kontaktmaterial signifikante Mengen an Blei.



Abb. 1.1: Brand an einer Photovoltaik (PV)-Anlage [4] und daraus resultierende Gefährdungen

Besonders aus Sicht des Brandschutzes werfen sich vor diesem Hintergrund mehrere Fragen auf (Abb. 1.1): Wie groß ist die stoffliche Gefährdung durch PV-Module im Brandfall und wie verhalten sich die Module bei einem Brand? Um hier Transparenz zu schaffen, sollen in diesem Forschungsvorhaben systematische Branduntersuchungen an verschiedenartigen PV-Modulen durchgeführt werden ( Abb. 1.2). Als Ergebnis sollen Aussagen getroffen werden zu den Aspekten:

- Brandverhalten,
- Feuerwiderstand der Module einschließlich der tragenden Konstruktion,
- mechanische Integrität,
- Einflüsse auf die harte Bedachung sowie
- Emissionen im Brandfall.

Daraus werden Grundlagen erarbeitet für die Festlegung von Anforderungen an den Brandschutz von PV-Modulen in Hinblick auf die Beurteilung von energetischen, stofflichen und mechanischen Gefährdungen für den Menschen. Zunächst wurden Laborbrandversuche durchgeführt, um durch chemische Analyse entstehende Brandprodukte, d.h. stoffliche Gefahren beurteilen zu können. Brandtechnologische Aspekte, wie Brandverhalten, Feuerwiderstand der Module einschließlich der tragenden Konstruktion, mechanische Integrität und Einflüsse auf die harte Bedachung wurden durch Brandversuche mit realen PV-Modulen auf Testdächern durchgeführt, um so energetische und mechanische Gefährdungen benennen zu können. Weitreichendes Ziel ist die Risikoreduzierung und die Erhöhung der Brandsicherheit.



Abb. 1.2: Übersicht über die durchgeführten Brandversuche und deren Analyse

#### 1.2 Abschätzung der Häufigkeit von Bränden an PV-Anlagen

Im Folgenden soll grob abgeschätzt werden, auf welchem Flächenanteil der Dächer in Deutschland eine PV-Anlage installiert ist, um eine Aussage über die Brandhäufigkeit an PV-Dachanlagen machen zu können. Entsprechende Statistiken sind für Deutschland als Ganzes nicht verfügbar [3]. Für die Abschätzung wird ein Flächenvergleich zwischen installierter PV-Anlagenfläche und der gesamten Dachfläche in Deutschland herangezogen. Installierte Fläche:

Betrachtet man die installierte PV Leistung im Jahr 2011 in Höhe von ca. 24 GW [4] abzüglich 15% davon für Freiland-PV-Flächen<sup>1</sup>, so ergibt sich, mit einem geschätzten mittleren System-Wirkungsgrad von 14% und einer maximalen Globalstrahlung [5] von ca. 1 kW/m<sup>2</sup>, eine auf Dächern installierte PV-Fläche in Höhe von ca. 146 km<sup>2</sup>.

#### Gesamte Dachfläche:

Die für PV-Anlagen geeignete Dachfläche wird nach einer Studie der Ecofys GmbH [4] auf 1.760 km<sup>2</sup> geschätzt. Um die gesamte Dachfläche zu ermitteln, wird geschätzt, dass ca. 85% der Dachflächen für PV-Anlagen ungeeignet sind (verschattet, N-O-W-Orientierung, Denkmalschutz).

Damit lässt sich die gesamte Dachfläche auf 11.700 km<sup>2</sup> schätzen. Dachflächenanteil von PV-Anlagen: 146 km<sup>2</sup> / 11.700 km<sup>2</sup> = ca. 1,2%.

Auf etwa jedem 80. Gebäude ist eine PV-Anlage installiert. Dies bietet eine sehr grobe Anhaltsgröße für die Abschätzung von Brandereignissen an PV-Anlagen.

Die Häufigkeit von Bränden an Dächern in Deutschland wird mit Hilfe von statistischen Zahlen der Berliner Feuerwehr [8] hochgerechnet (deutschlandweite Daten werden nicht erfasst). Es ergaben sich für Berlin 8.316 Brände im Jahr 2011. Hochgerechnet auf Deutschland sind das ca. 197.000 Brände. Es wird angenommen, dass nur 10% davon an Dächern erfolgen [8]. Gewichtet man diese Häufigkeit mit der Häufigkeit der PV-Anlagen (1,2%), so ergibt sich ein grober Schätzwert in Höhe von 236 Brandereignissen/a an Dach-PV-Anlagen.

Dem gegenüber steht die gesamte Anzahl der PV-Anlagen in Deutschland [5] in Höhe von 1.090.000. So lässt sich folgende Schlussfolgerung ziehen:

Brände an PV-Anlagen sind extrem selten, treten aber dennoch mit geringer Wahrscheinlichkeit auf.

In Abb. 1.3 sind drei Beispiele von Bränden an PV-Anlagen gezeigt: in Bremen 2008, die Ursache des Feuers war ein Schaden des Wechselrichters [9], in Hochstadt 2010, die Ursache war ein Feuer in einer Lagerhalle [10] und in Goch 2012, ein Defekt der PV-Anlage verursacht einen Brand [11]. Diese drei typischen Brandfälle machen deutlich, dass Informationen über Brandverhalten, Feuerwiderstand von PV-Modulen zur Bestimmung des Gefährdungspotentials erforderlich sind.



Abb. 1.3: Typische Brände an PV-Anlagen, links in Bremen 2008 [9], mittig in Hochstadt 2010 [10] und rechts in Goch 2012 [11]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> vgl. Abschnitt Freiflächenanteile

In [3] wurden die Auswirkungen von PV-Bränden ausgewertet. Demnach sind im Zeitraum 09/2011 bis 01/2013 etwa 180 Brandfälle von PV-Anlagen und ca. 220 Fälle von einem "Mit"-Brand von PV-Anlagen bei einem Gebäudebrand erwähnt. Von den 180 Fällen von PV-Anlage-Bränden sind ca. 51% in Aufdach-Aufstellung, 22% bei Freiland-Aufstellung, 11% in Indach- bzw. 15% in Flachdachmontage und nur 1% an Fassaden aufgetreten. Hauptursachen sind dabei Fehler der Wechselrichter und der Anschlussdose sowie Fehler der AC-Seite, das Modul selbst und die DC-Seite. Schadensursachen sind am häufigsten Installationsfehler und Produktfehler. Die meisten Fehler treten bei Anlagen unter einem Jahr auf. Die Ergebnisse passen in etwa mit den theoretischen Abschätzungen, nähere Details zu den Auswirkungen sind unter [3] zusammengefasst.

## 2 Stand der Technologie bei PV-Modulen

Um einen Überblick über die Thematik zu erlangen, werden vorab die relevanten Rahmenbedingungen aufgezeigt. Dazu gehören die verschiedenen Technologien von PV-Modulen sowie die externen Rahmenbedingungen, wie u.a. die Häufigkeit der PV-Anlagen im Gebäudebestand oder die Montagetechniken.

Eine typische PV-Anlage besteht aus den Komponenten Modul, Verkabelung/Halterung, Wechselrichter und Einspeisezähler (Abb. 2.1).



Abb. 2.1: Komponenten einer PV-Anlage [12]

Die Module werden zu sogenannten "Strings" in Reihe geschaltet, um die Spannung zu erhöhen und die elektrische Energie effizient im Wechselrichter für das Stromnetz umzuwandeln. Übliche String-Spannungen liegen im Bereich von ca. 600 V.

In den Modulen sind einzelne Solarzellen verschaltet, um passende Modulparameter von Strom und Spannung zu erreichen. Die Zellen unterscheiden sich bei der Umwandlung von Solarenergie in elektrischen Strom durch die verwendeten Halbleiter. Grundlegend bestehen die Zellen aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten, an deren Grenze durch Licht eine Ladungstrennung erfolgt. Diese Ladungen werden an den Oberflächen der Schichten durch geeignete Elektroden gesammelt und stehen als Ausgangsstrom zur Verfügung. Der prinzipielle Aufbau einer Solarzelle mit dem Halbleiter Silizium ist in Abb. 2.2 dargestellt.



Abb. 2.2: Funktionsprinzip einer Si-Solarzelle [13]

Als Halbleiter für die gebräuchlichsten kommerziellen PV-Module kommen folgende Materialien [14] zum Einsatz:



bandgezogen

Dickschicht-Si-Zellen werden aus einer Si-Schmelze durch aufwändige Verfahren hergestellt (Kristallziehen oder Zonenschmelzverfahren – Sägen – Polieren – Dotieren – Kontaktieren – Beschichten – Einbinden).

Im Gegensatz dazu werden bei der Dünnschicht-Technologie die photoaktiven Halbleiter kostengünstiger und mit wesentlich geringerem Materialaufwand auf entsprechende Trägersubstrate (Folien oder Glas) aufgedampft. Die einzelnen Zellen lassen sich mit Hilfe von Lasern auch einfach verschalten.

Der Aufbau einer CIGS-Dünnschichtzelle ist in Abb. 2.3 dargestellt<sup>3</sup>. Auf das Glas wird zuerst der Rückseitenkontakt aus Molybdän aufgetragen, anschließend die CIGS-Schicht aufgedampft, mit einer CdS-Schicht als Puffer. Die sonnenseitige

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Kupfer-Indium-Schwefel(CIS) oder Kupfer-Indium-Gallium-Dieselenid (CIGS) Verbindungen mit CdS-Pufferschicht

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Verfahrensablauf nach Koyo Thermo Systems (Hersteller von Produktionsanlagen für CIGS-Zellen)

Elektrode bei Dünnschichtzellen besteht im Gegensatz zu den Dickschicht-Si-Zellen nicht aus aufgedampftem Metall, sondern aus einer durchsichtigen, leitfähigen Schicht, z.B. Zinkoxid (ZnO).

Die Abdeckung gegen Umwelteinflüsse bildet meist eine Laminierschicht aus Ethylenvinylacetat (EVA) und Solarglas, bei flexiblen Modulen nur der Kunststoff EVA (Ethylenvinylacetat).



Abb. 2.3: Aufbau einer CIGS-Zelle [15]

## 2.1 Marktanteile

Für die geplanten Brandversuche ist es wichtig, die am Markt gebräuchlichsten Modularten zu identifizieren. Die Entwicklung der verschiedenen Zelltechnologien seit 1999 ist in Abb. 2.4 wiedergegeben [14]. Dabei nehmen die klassischen Silizium-Dickschicht-Zellen den größten Anteil ein (mono-, polykristallines und bandgezogenes Silizium zusammen über 86%), gefolgt vom wachsenden Anteil der CdTe-Dünnschicht-Module und den Zellen mit amorphem Silizium. CIS-Zellen haben aufgrund der hohen Indium-Kosten und der begrenzten Verfügbarkeit dieses Rohstoffes einen nur geringen Anteil.

In den Bereich "Sonstige" fallen Technologien, wie organische Farbstoffzellen, Gallium-Arsenid-Zellen für den Weltraumeinsatz und innovative CZTS-Zellen (Kupfer-Zink-Zinnsulfid) aus der Forschung.

Für die Brandversuche wurden die vier am häufigsten produzierten Zellensorten untersucht:

- Kristalline Silizium-Module (Dickschicht mit 300 µm Si)
- Cadmiumtellurid-Module (Dünnschicht mit ca. 3 µm CdTe/CdS)
- Module mit amorphem Silizium (Dünnschicht mit ca. 3 µm Si)
- CIS/CIGS-Module (Dünnschicht ca. 3 µm)



Abb. 2.4: Marktentwicklung der Zelltechnologien in Prozent [14]

## 2.2 Modulkosten und Wirkungsgrade

Die Marktanteile der verschiedenen Zelltechnologien liegen v. a. an den jeweiligen Herstellungskosten und am Wirkungsgrad. Da der Markt für die Herstellung der Zellen stark wächst, sinken die Herstellungskosten und damit die Solarstromkosten im Laufe der Jahre. Dies hat zur Folge, dass in weniger als 10 Jahren [16] die Stromkosten aus PV-Anlagen genau so hoch sein werden, wie die Stromkosten aus konventioneller Stromproduktion. Dies bezeichnet man als Netzparität (engl. Grid Parity).

Die Modulpreise sind in den letzten Jahren stark gesunken, getrieben durch Skaleneffekte, technologische Entwicklungen, Normalisierung des Solarsiliziumpreises und durch den Aufbau von Überkapazitäten sowie Konkurrenzdruck bei den Herstellern (Tab. 2.1).

Modultyp	€/Wp	Wirkungsgrad
Monokristallin (D)	1,02	14-20%
Polykristallin (D)	1,02	12-16%
Kristallin China	0,74	12-20%
Dünnschicht CdS/CdTe	0,61	9-13%
Dünnschicht a-Si	0,57	6-10%
Dünnschicht CIGS	0,96	11-14%

Tab. 2.1: Aktuelle Marktpreise (brutto) von PV- Modulen (Stand 2013) und Modulwirkungsgrade [17-19]

Die niedrigen Preise für Dünnschichtanlagen relativieren sich teilweise für die fertige Anlage durch den aufgrund des geringeren Wirkungsgrades höheren Installationsaufwand für Anlagen gleicher Leistung. Die Kosten für die anderen Komponenten einer PV-Anlage liegen in der gleichen Größenordnung, wie die reinen Modulkosten.

#### 2.2.1 Einfluss des Neigungswinkels und der Ausrichtung

Die Module sind in der Regel mit einem optimalen Neigungswinkel von ca. 28° zur Horizontalen in Südrichtung aufgeständert bzw. am Schrägdach befestigt. Dies gewährleistet den höchsten Stromertrag. Bei Fassadenmontage und bei geklebter Folie auf dem Flachdach weicht die Ausrichtung vom Optimum ab. Dadurch werden auf diesen Flächen geringere Solarerträge erreicht. Mit Hilfe der Abb. 2.5 kann der Einfluss des Neigungswinkels und der Ausrichtung quantifiziert werden [20].

Bei Folien-PV-Anlagen auf einem Flachdach (Neigungswinkel 0°) sinkt der Ertrag nur auf ca. 95% im Vergleich zu schräger Montage. Dafür muss zwischen den Modulen kein Platz gelassen werden zum Schutz vor gegenseitiger Verschattung bei flach stehender Sonne. Dies erhöht bei geklebten Folien-Anlagen die effektiv nutzbare Dachfläche. Außerdem ist kein Ständerwerk nötig. Dies spart Zeit und Kosten.

Bei Fassadenmontage auf der Südseite (Neigungswinkel 90°) sinkt der Ertrag auf ca. 70%. Dafür wird keine Grundfläche benötigt und Kosten für eine vorgehängte Fassade können gegengerechnet werden.

Es existieren auch aktiv nachgeführte Systeme, bei denen die Module immer in Richtung Sonne gedreht und gekippt werden. Dies ist allerdings sehr teuer, anfällig und rechtfertigt in Deutschland nicht den Strom-Mehrertrag.



Abb. 2.5: Ertragsreduzierung bei Fassaden und Flachdach-Folien-PV [20]

#### 2.2.2 Freiflächenanteile und Anlagengrößen

Einen Überblick über die Flächenanteile von Freiland-PV-Anlagen bis zum Jahr 2010 sind in Abb. 2.6 wiedergegeben [16]. Es zeigt sich, ein über die Jahre wachsender Anteil im PV-Zubau von Freiflächenanlagen im Größenbereich um 15%. Dieser Trend liegt u.a. an spezifisch geringeren Anlagenkosten bei größeren Flächen. Der Anteil der Fassadenanlagen wird mit 0,057% der Gesamtfläche angegeben. Dies liegt u.a. am Wegfall des sogenannten Fassadenbonus im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und am geringeren Ertrag an Fassaden. Aus diesem Grund werden Fassadenanlagen für die geplanten Brandversuche nur in geringem Anteil berücksichtigt.



Abb. 2.6: Anteil der Freiflächenanlagen am PV-Zubau [16]

Bei Freiflächenanlagen ist die verfügbare Grundfläche für die Installation von PV-Modulen signifikant größer als bei Dachanlagen. Daraus resultiert eine entsprechend größere elektrische Leistung der Freiflächenanlagen. Im Hinblick auf den wachsenden Anteil der Freiflächenanlagen erklärt sich der Trend zu steigenden Anteilen der größeren Leistungsklassen (Abb. 2.7) [16].



Abb. 2.7: Entwicklung der installierten PV-Anlagengrößen [16]

Es zeigt sich, dass zu Beginn 2000 überwiegend Anlagen im Bereich unter 10 kW Leistung installiert wurden. Dies entspricht dem Marktsegment der typischen Einfamilienhäuser. Im Laufe der Jahre lässt sich ein Trend zu größeren Anlagen beobachten. Die Gründe dafür liegen u.a. an folgenden Faktoren:

- Sockelkosten von PV-Anlagen (z.B. Einspeisezähler), diese fallen gleichermaßen für große und kleine Anlagen an
- degressive spezifische Kosten der Komponenten (z.B. bei hoher Stückzahl sinkende Modul- und Ständerpreise)
- anteilig geringere Planungskosten
- einfachere Installation von Freiflächen-Großanlagen

Bremsend auf diese Entwicklung sind lediglich die geringeren Einspeisevergütungen bei steigender Anlagengröße im EEG.

## 2.3 Modul-Aufbau und Montagesysteme von PV-Modulen

#### 2.3.1 Aufbau

Die Einbettung der Zellen im Modul kann durch mehrere Arten erfolgen. Als Frontglas wird Weissglas mit einer Laminatschicht (EVA, Ethylenvinylacetat)

verwendet. Anschließend folgen die eigentliche Solarzelle sowie die hintere Verschlussplatte des Moduls. Diese Rückseite wird bei Si-Modulen meist in Kunststoff(folie) ausgeführt, bei Dünnschicht-Modulen verwendet man hier üblicherweise Glas zur Erhöhung der mechanischen Stabilität.

Insgesamt macht Glas den größten Massenanteil am Gesamtmodul aus. Die Glasdicke beträgt üblicherweise ca. 3-4 mm. Die Gesamtdicke eines Moduls liegt im Bereich von ca. 7-10 mm. Die elektrischen Anschlüsse werden in einer Anschlussdose an der Modulrückseite herausgeführt. Um das Modul gegen Witterungseinflüsse zu schützen und die Kanten zu stabilisieren, besitzen die Module teilweise einen Rahmen aus Aluminium, Kunststoff oder Edelstahl. Um Herstellungsenergie (vor allem bei Aluminium) und Kosten zu sparen, werden jedoch immer mehr Dünnschicht-Module mit interner Klebedichtung rahmenlos gefertigt. Als Kantenschutz dient dann, bei Transport und Montage, lediglich ein Rahmen aus Karton.

Ein typischer Modulaufbau am Beispiel eines polykristallinen Si-Moduls mit Aluminiumrahmen ist in Abb. 2.8 gezeigt [21].



Abb. 2.8: Typischer Schichtaufbau eines PV-Moduls (Si-Zellen) [21]

Abweichend von diesem klassischen Aufbau mit Glas sind auf dem Markt flexible Dünnschicht-Module erhältlich. Sie können auf dem Dach ausgerollt und direkt aufgeklebt werden. Dies verringert die Kosten der Installation. Dort kommt als Vorder- und Rückseite jeweils eine Kunststofffolie zum Einsatz. Zwischen diesen Folien sind die Zellen laminiert.

#### 2.3.2 Montagesysteme

Grundsätzlich können PV-Module auf alle Dacharten montiert werden. Die Halterungen für die Module unterscheiden sich dabei zwischen Flachdächern und Schrägdächern sowie -in Einzelfällen- in Fassadenmontagen. Darüber hinaus sind in der Dünnschicht-Technologie auch PV-Folien<sup>4</sup> erhältlich, welche direkt auf Flachdächer geklebt werden.

Folgende Bilder verdeutlichen die verschiedenen üblichen Montagearten (Abb. 2.9):

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> z.B. CIGS-Dünnschicht-Folien von GlobalSolar



Schrägdachmontage mit Dachhaken, Querstreben und Klemmhalterung



Flachdachmontage mit Ständerwerk und Steingewichten





Montage von Folienmodulen und fertiges Folien-PV-Dach (Global Solar)





Indachmontage von Conergy (links mit Trapezblech, rechts ohne wasserdichte Unterschicht)



Fassadenmontage (Universität Potsdam)



Freilandmontage (Einfachständer von Conergy) mit ökologischer Doppelnutzung





Dünnschicht-PV auf Kunststoff (Konarka) PV-Dachschindeln (Sesol)

Abb. 2.9: Verschiedene Montagearten bei PV-Anlagen [22]

Im Hinblick auf die geplanten Brandversuche kommen die Montagetechniken, die am Markt überwiegend vorherrschen in die engere Auswahl:

- Flachdachmontage (Folie und starre Module),
- Schrägdachmontage sowie
- Indach-Variante ohne Trapezblech-Unterschicht.

Die Sonderformen (Fassadenmontage, Dachschindeln, Kunststoff) werden aufgrund des sehr geringen Marktanteils<sup>5</sup> nicht schwerpunktmäßig untersucht. Nachfolgende Abbildung (Abb.2.10) gibt einen Überblick über die auf dem Markt erhältlichen PV-Module und deren Einteilung und Systematisierung.

Module Technologi	en	Modularten	
<ul> <li>Dickschicht:</li> <li>Dünnschicht:</li> </ul>	Silizium basiert (am häufigsten, ~ 85%) amorph-Si (~5%), CIGS, CdTe	>>	Si basierte Module (~90%) HL basierte Modules
	- Steife Dünnschicht-Filme - Flexible Dünnschicht-Filme	>	II-VI (Cate) ~ 5% I-UI-VI (Clos) ~ 2% Andere Technologien (~1%)
Befestigung der PV	-Module Stehende Module		Organicsche Solarzellen Farbstoffzellen,
<ul> <li>aufgeständerte M</li> </ul>	odule auf Flachdächern	SI	ruktur der Module
<ul> <li>Vertikale Montage an Fassaden</li> <li>PV-Module als Dachhaut</li> <li>PV-Module in dachparalleler Anordnung</li> </ul>			Glas-Glas Module Glas-Film Module Metall-Film Module Film-Film Module

Abb. 2.10. Einteilung und Systematisierung von verfügbaren PV-Modulen

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Fassaden-PV-Fläche in Deutschland < 1% der Gesamtfläche, vgl. Abschnitt "Freiflächenanteile und Anlagengrößen" weiter unten

## 2.4 Solarglas

Den Haupteinfluss auf die Feuerbeständigkeit wird das Glas der Solarmodule als Hauptbestandteil ausüben. Insbesondere bei den Einscheiben-Modulen wird es große Unterschiede bei der thermischen Beanspruchung geben. Deshalb werden die bei PV-Modulen eingesetzten Glassorten näher betrachtet.

Grundsätzlich gibt es vier verschiedene Glassorten bzw. -qualitäten:

- normales Floatglas, ungehärtet
- gewalztes Floatglas mit Profil, ungehärtet
- teilgehärtetes Glas
- Einscheiben-Sicherheitsglas
- Borosilikatglas

Das ungehärtete Floatglas ist in der Herstellung am preisgünstigsten. Es wird durch ein Verfahren hergestellt, bei dem das flüssige Glas auf einer flüssigen Zinn-Schicht schwimmt (engl. floating). Dieses einfache Glas besitzt eine normale Bruchstabilität und findet Verwendung bei PV-Modulen als Rückseitenglas von Glas/Glas-Modulen sowie bei günstigeren Modulen, auch als Vorderseiten- oder Einscheibenglas.

Si-Dünnschicht-Module mit Rahmen haben üblicherweise eine Glasscheibe mit eingeprägter Oberflächenstruktur. Dies verringert die Reflexion des Sonnenlichts. Eine solche Struktur auf dem Glas wird durch einen Warmwalzprozess hergestellt. Die Versuche zeigten bei dieser Glassorte eine besondere Anfälligkeit gegenüber der Feuerbeanspruchung.

Durch teilweises Anschmelzen und schnelles Abkühlen kann Glas gehärtet werden. Dadurch verringert sich die Bruchgefahr bei der Modulproduktion, Transport und Montage. Dies kann mit geringem Aufwand als Teilhärtung erfolgen. Mit teureren Verfahren lässt sich auch das sogenannte Einscheiben-Sicherheitsglas produzieren. Dies wird vor allem bei Si-Dickschicht-Modulen mit Rückseitenfolie eingesetzt. Dadurch können die teuren Zellen effektiv gegen mechanische und thermische Beanspruchungen geschützt werden. Darüber hinaus verringert sich durch die hohe Glasqualität die Glasdicke und somit das Gewicht des Moduls.

Für die Herstellung von CIGS-Modulen wird höher schmelzendes Borosilikatglas eingesetzt. Die fotoaktiven Bestandteile werden bei so hohen Temperaturen aufgedampft, bei denen normales Glas schmelzen würde. Somit unterscheiden sich die PV-Module je nach Art auch in der Glassorte, die wiederum einen Einfluss auf die Feuerwiderstandsfähigkeit hat.

## 2.5 Regionale Verteilung in Deutschland

Vergleicht man das regional unterschiedlich hohe solare Strahlungsangebot mit der regionalen Verteilung der installierten PV-Anlagen, so zeigt sich eine starke Kohärenz. Beim grafischen Vergleich (Abb. 2.11) wird deutlich, dass in Süddeutschland die höchste Dichte von PV-Leistung pro km<sup>2</sup> vorherrscht:



Abb. 2.11: Installierte PV-Leistung/Fläche [14] nach Region (links) im Vergleich zum solaren Strahlungsangebot [23] in Deutschland (rechts)

Für die Installationsdichte der PV-Anlagen spielen u.a. folgende Faktoren eine Rolle:

- regional verfügbare Dachfläche / Einwohnerdichte
- Investitionsbereitschaft
- Eigentumsverhältnisse

#### 2.6 Anteil der PV an der regenerativen Stromerzeugung

Der Anteil der Photovoltaik an der deutschen Stromproduktion lag 2011 bei ca. 3% (Abb. 2.12).



Abb. 2.12: Anteile an der Stromproduktion [24] in Deutschland 2011

Der Anteil der erneuerbaren Energien hängt neben der Anlagenleistung auch vom natürlichen Angebot ab. Dies betrifft vor allem die Wind-, Wasser- und Solarenergie. Die Dynamik innerhalb der erneuerbaren Techniken wird in Abb. 2.13 deutlich.



Abb. 2.13: Entwicklungstrends [13] innerhalb der erneuerbaren Energien

Die Kapazität der Wasserkraft ist bereits ausgeschöpft; die über die Jahre leicht sinkende Strommenge erklärt sich durch die Niederschlagsmengen. Die Windkraft hat im Jahr 2004 die Wasserkraft von der Spitzenposition innerhalb der erneubaren Energien abgelöst. Durch den starken Zubau von Biogasanlagen und der Anrechnung von Biomasse in Müllkraftwerken ist der Anteil der Biomassefraktion dem der Windenergie nahezu ähnlich. Die höchste Dynamik zeigt im Moment der Bereich der Photovoltaik mit Wachstumsraten um die 100% pro Jahr (vgl. Abb. 2.13).

#### Strombedarf und Verfügbarkeit erneuerbarer Energien

Einen Überblick zur Angebots- und Nachfrage-Situation von den erneuerbaren Energien, wie Wind und Sonne im Vergleich zum Energieverbrauch einer Stadt<sup>6</sup> sind in Abb. 2.14 zusammengetragen. An den Diagrammen wird deutlich, dass die PV-Leistung, die sich nach dem solaren Strahlungsangebot richtet, im Sommer (jeweils in der Mitte der Diagramme) am größten ist. Dagegen ist die verfügbare Energie aus Windkraft über das Jahr gleichmäßiger verteilt und schwankt in kürzeren Abständen. Dies korreliert teilweise mit dem Strombedarf, der wöchentlichen Schwankungen unterworfen ist. Betrachtet man den Wärmebedarf (Heizung und Warmwasser), so zeigt sich eine Umkehrung zur Solarenergie ab. Die Wärmenachfrage ist im Sommer am geringsten, das Angebot jedoch am größten.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> eigene Werte (Stadt Würzburg), die Daten wurden für eine bessere Übersichtlichkeit skaliert.



Abb. 2.14: Vergleich Angebot erneuerbare Energien – Verbrauch im Jahresverlauf (x-Achse: relativer Bedarf, y-Achse: Jahresverlauf von Januar bis Dezember)

#### Einspeisevergütung für PV-Strom

Die Einspeisevergütung für Strom aus PV-Anlagen ist im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgelegt. Die Vergütung ist abhängig von Größe und Art der Anlage. Zusätzlich unterliegt sie einer jährlichen Degression. Der Gesetzgeber berücksichtigt damit stetig sinkende Herstellungskosten für PV-Anlagen (Abb. 2.15). Vergleicht man die Entwicklung der Förderung mit den jährlich steigenden Installationszahlen für PV, so wird deutlich, dass die Technik immer günstiger produziert wird.



Abb. 2.15: Einspeisevergütungen [6] für Strom aus PV-Anlagen (Durchschnitt)

## 3 Brandprüfungen von PV-Modulen

Bei der Verwendung von PV-Modulen als Bauprodukte sind die Anforderungen nach den Landesbauordnungen zu beachten. Hierzu gehören insbesondere das Brandverhalten (Brennbarkeit der Baustoffe) und ggf. die Widerstandsfähigkeit gegen Flugfeuer und strahlende Wärme bei der bei Verwendung in der Bedachung. Umfassende Hinweise worauf aus bauaufsichtlicher Sicht bei der für die Herstellung, Planung und Ausführung von Solaranlagen zu achten ist, sind vom DIBt veröffentlicht worden [39, 40]. Die Schutzziele sind, dass Bauteile so angeordnet sind, dass die Entwicklung und die Brandausbreitung verhindert und die Rettung von Menschen und die Brandbekämpfung möglich sind.

Das Brandverhalten kann entweder nach den nationalen Prüfverfahren DIN 4102-1 [35] oder harmonisierten europäischen Prüfverfahren beurteilt werden. PV-Module müssen mindestens aus Baustoffen bestehen, die normal entflammbar (B2) sind. Weiterhin müssen die Oberfläche von Außenwänden sowie Außenwand-Bekleidungen, an denen die PV-Module befestigt sind, schwer entflammbar (B1) sein und mehr als zwei Geschosse überbrückende Solaranlagen an den Außenwänden müssen schwerentflammbar sein.

Grundsätzlich müssen Dächer ausreichend widerstandsfähig gegen Feuer von außen und Wärmestrahlung sein. PV-Module sind Teil von Dächern und müssen diesen Anforderungen entsprechen. Es gibt verschiedene Prüfverfahren, die das Brandverhalten von Dächern auf externe und interne Feuer beurteilen können. Einen guten Überblick über verschiedene Testverfahren in Europa und Nordamerika sind unter [34] aufgelistet.

PV-Module, die Teil eines Daches sind (gebäudeintegriert), werden in Deutschland wie Bedachungen getestet. Bauarten zur Herstellung von Bedachungen, an die Anforderungen hinsichtlich Widerstandsfähigkeit gegen Flugfeuer und Wärme gestellt werden, werden nach Bauregelliste A Teil 3-Ausgabe 2012/1 mit den anerkannten Prüfverfahren DIN 4102-7 [36] oder CEN TS 1187 [37] geprüft. CEN TS 1187 ist ein Prüfverfahren in der Europäischen Union zur Beanspruchung durch Feuer von außen mit 4 verschiedenen Brandsätze für Bedachungen. Verschiedene Länder in der EU akzeptieren unterschiedliche Methoden. Es gibt keine auf ganz Europa abgestimmte Methode.

PV-Module, die dazu bestimmt sind außerhalb der Gebäudehülle auf Dächern aufgestellt zu werden (aufgeständerten Solaranlage), unterliegen als solche keinen besonderen Anforderungen des bauaufsichtlichen Brandschutzes im Hinblick auf die Widerstandsfähigkeit gegen Flugfeuer und Wärme. Dachkonstruktionen, die als widerstandsfähig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme klassifiziert sind, benötigen bei Anwendung einer aufgeständerten Solaranlage keine weiteren Verwendbarkeitsnachweise und gelten weiterhin als widerstandsfähig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme.

UL 790 ist ein weitverbreiteter Standard in Nordamerika, der neben vielen anderen Prüfungen auch Brandtest für Bedachungen [38] enthält.

PV-Module sind elektrische Betriebsmittel. Sie unterliegen den Regelungen der Niederspannungsrichtlinie [<sup>7</sup>] und sind mit dem CE- Kennzeichen in Verkehr zu bringen. Die Niederspannungsrichtlinie wird erfüllt, wenn die Anforderungen der Normen IEC 61730/DIN EN 61730 eingehalten werden. Die im Rahmen dieser Normen vorgegebenen Brandprüfungen sind nicht als Nachweis der bauordnungsrechtlichen Anforderungen geeignet.

Darüber hinaus gibt es Zertifizierungen von PV-Modulen nach IEC Standards, z. B. entsprechend der IEC 61730 [41], [42]. In IEC 61730 werden die PV-Module in drei Klassen eingeteilt: A, B oder C, wobei Klasse C, die Mindestanforderungen enthält. Je Klasse werden mindestens 4 PV-Module getestet. Dieser Standard beschreibt sowohl die Anforderungen für Materialien und Komponenten sowie das Moduldesign Sicherheitsprüfungen für auch die komplette PV-Module. Für als brandtechnologische Prüfung werden der sogenannte Spread of Flame Test sowie der Burning Brand Test, basierend auf der UL 790, durchgeführt. Es werden dachintegrierte als auch aufgeständerte PV-Module einer Brandbeaufschlagung von außen ausgesetzt.

Generell dürfen durch die Installation von PV-Anlagen keine gefährlichen DC-Spannungen im Brandfall auftreten, so dass Personenrettung und Brandbekämpfung möglich sind. Die Zugänglichkeit zur Brandbekämpfung muss sichergestellt sein, nähere Details sind in [43] veröffentlicht. Von Hochspannung ist laut VDE erst die Rede, wenn Spannungen über 1.000 Volt erreicht werden. Das ist auf der DC-Seite einer PV-Anlage nicht der Fall! Hochspannung kann nur auf der AC-Seite anstehen, diese lässt sich aber im Notfall, anders als die DC-Seite abschalten. Darüber hinaus hat der deutsche Feuerwehrverband im Jahr 2012 Empfehlungen für Photovoltaik-Anlagen in Bezug auf elektrische Gefahren und Vorgehensweisen, wenn PV-Module brennen, veröffentlicht [44].

Eine Zusammenfassung verfügbarer Brandtests von PV-Modulen sind in [34, 45] veröffentlicht. Im Folgenden werden die entsprechenden Normen aufgelistet, welche für Brandtests an PV-Modulen herangezogen werden können.

## 3.1 Brandverhalten von Baustoffen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das Brandverhalten nach folgenden Normen durchgeführt:

- 1. DIN 4102-1,
- 2. ISO 5659-2 (Abschnitt 5.2.2),
- 3. ISO 5660 (Abschnitt 5.2.3) und
- 4. DIN EN 13823 (Abschnitt 5.2.4)

<sup>7</sup> Richtlinie 2006/95/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen (Niederspannungsrichtlinie). In Deutschland umgesetzt durch das Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG) und die 1. Verordnung zum GPSG (Verordnung über das Inverkehrbringen elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen) Die Prüfungen nach DIN 4102-1 beschränkten sich auf Prüfungen im sogenannten Brennkasten-, die dem Nachweis der Baustoffklasse B2, das ist normalentflammbar, dienen. Das europäische Prüfverfahren nach EN ISO 11925-2 ist diesem Verfahren sehr ähnlich.

Die Prüfungen nach DIN EN 13823 dienen in Verbindung mit Prüfungen nach DIN EN ISO 1182 oder DIN EN ISO 1716 zum Nachweis der Nichtbrennbarkeit bzw. mit Prüfungen nach DIN EN ISO 11925-2 zum Nachweis der Schwerentflammbarkeit.

## 3.2 Brandverhalten von Bedachungen

Es gibt verschiedene Prüfverfahren zur Beanspruchung von Bedachungen, die nachfolgend aufgelistet werden.

DIN 4102 Teil 7: Test von Bedachungen Brandtest mit Drahtkorb und Holzwolle Größe Versuchsdach: 250 cm x 200 cm Anzahl der Versuche: 4 Parameter: Dachaufbauten Dachneigung Ergebnisse: Brandverhalten (Zeit, Ort, Ablauf) Schadensdimensionen

Prüfverfahren zur Beanspruchung von Bedachungen durch Feuer von außen (CEN TS 1187) und Klassifizierung mit den Ergebnissen aus Prüfungen von Bedachungen bei Beanspruchung durch Feuer von außen (DIN EN 13501-5)

In der CEN TS 1187 werden die vier verschiedenen Prüfverfahren detailliert beschrieben.

Prüfverfahren 1	Prüfverfahren 2	Prüfverfahren 3	Prüfverfahren 4
Brandsatz	Brandsatz	Brandsatz	Brandsatz
Drahtkorb	Holzkrippe	Holzfaserplatten	Stadtgasflamme
Holzwolle	& Wind	& Wind	& Wind
		& Wärmestrahlung	& Wärmestrahlung

DIN EN 13501-5 definiert aufbauend auf den Ergebnissen aus der CEN TS 1187 ein Klassifizierungsverfahren:

Die Prüfverfahren 1 bis 4 führen zu einer Klassifizierung XROOF (t1bis t4). Die Klassifizierungsbedingungen variieren je nach Prüfverfahren:

Prüfverfahren 1:

äußere und innere Feuerausbreitung nach oben < 0,700 m;

äußere und innere Feuerausbreitung nach unten < 0,600 m;

maximale verbrannte Länge außen und innen < 0,800 m;

kein Herabfallen brennenden Materials (Tropfen oder Teile) von der beanspruchten Seite;

kein Durchdringen brennender/glimmender Partikel durch die Dachkonstruktion;

keine einzelnen Löcher > 25 mm<sup>2</sup>; Summe aller Löcher < 4 500 mm<sup>2</sup>;

die seitliche Feuerausbreitung darf nicht die Ränder der Messzone erreichen; kein Glimmen im Innern;

maximaler Radius der Feuerausbreitung auf Flachdächern im Innern und auf der Oberfläche < 0,200 m

<u>Prüfverfahren 2</u>: mittlere Länge der Beschädigung von Dachhaut und Trägerplatte  $\leq 0,550$  m; maximale Länge der Beschädigung von Dachhaut und Trägerplatte  $\leq 0,800$  m.

<u>Prüfverfahren 3</u>: Zeit der außenseitigen Feuerausbreitung TE>30min; Zeit bis zum Feuerdurchtritt TP>30min.

Prüfverfahren 4:

Kein Feuerdurchtritt der Bedachung innerhalb von 1 h.

In der Vorprüfung brennen die Probekörper nach dem Wegziehen der Prüfflamme für < 5 min.

In der Vorprüfung: Flammenausbreitung < 0,38 m im Bereich der Brandstelle.

Darüber hinaus werden Klassifizierungen mit geringeren Anforderungen definiert: CROOF (tx) und DROOF (tx).

## 3.3 Amerikanisches Prüfverfahren für Bedachungen nach UL 790

Underwriters Laboratories Inc. (UL) Genormter Brandtest für Bedachungen Amerikanische Norm (2004)

Die UL790 nennt 3 Klassifikationen für Bedachungen:

A: hohe Anforderung

B: mittlere Anforderung und

C: geringe Anforderung an den Feuerwiderstand.

Es werden vier verschiedene Brandtests in der UL 790 beschrieben. Die Tests gelten jeweils als bestanden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- kein Auftreten von Flammen an der Unterseite
- kein Weiterbrennen oder Glühen
- kein Ablösen / Herunterfallen von Teilen des Testdaches

Spread of Flame Test:

Beflammung eines Prüfdaches mit Gasflamme von oben unter Wind

Klassifikation	Brennerleistung	Zeit
A/B	ca. 378 kW	10 min
С	ca. 325 kW	4 min

Burning Brand Test:

Brandsatz mit Holzkrippe auf einem Prüfdach unter Wind

Klassifikation	Brandsatz	Anzahl Brandsätze
A	12 Zoll Holzkrippe	1
В	6 Zoll Holzkrippe	2
С	1,5 Zoll Holzkrippe	20

Intermittent Flame Test:

Wiederholte Beflammung des Prüfdaches mit Gasflamme unter Wind

Klassifikation	Flamme an (min)	Flamme aus (min)	Wiederholungen
A	2	2	15
В	2	2	8
С	1	2	3

Der sogenannte <u>Flying Brand</u> Test betrifft nur Dächer mit Holzschindeln. Darüber hinaus sind in der UL 790 noch Tests zur Wasserdichtheit von Dächern mit genormter Beregnung enthalten.

## 3.4 Brandtechnologische Anforderungen von PV-Modulen nach IEC 61730-2

Diese Norm basiert auf Brandprüfungen, die aus der UL 790 übernommen wurden. Dabei handelt es sich um den Spread of Flame- und dem Burning Brand-Test.

Beim <u>Spread of Flame Test</u> wird die Flammenausbreitung auf der Oberseite getestet nach Beanspruchung einer Gasflamme und zusätzlichem Wind (5,3 m/s). Beflammungsdauer und Brennerleistung sind entsprechend den Anforderungen der Klassen A, B und C abgestuft. Für die Prüfung werden insgesamt drei Module benötigt.

Beim <u>Burning Brand Test</u> wird ein Feuer von außen durch einen Brandsatz (Holzkrippe) und zusätzlichem Wind (5,3 m/s) nachgestellt. Die Massen der Holzkrippen betragen zwischen 10 g und 2000 g in Abhängigkeit der zu prüfenden Klasse. Protokolliert werden die Auswirkungen auf das PV-Modul.

Kommt es zum Brennen, brennenden Abtropfen, Abfallen oder zum Durchbrennen der PV-Module sind die Tests nicht bestanden. Die Flammenausbreitung darf folgende Werte nicht überschreiten:

- Klasse A 1,82 m
- Klasse B 2,40 m
- Klasse C 3,90 m

## 4 Gefährdung durch toxische Brandprodukte

In diesem Kapitel wird die Gefährdung durch toxische Brandprodukte und deren Beurteilung durch gängige Verfahren diskutiert. Während eines Brandes können zum einen im Brandrauch toxische gasförmige Bestandteile entstehen, zum anderen können auch im Brandrückstand toxisch wirkende Bestandteile vorhanden sein, die bei einer Brandsanierung ebenfalls beachtet werden sollten. Eine Übersicht über mögliche Brandprodukte, die im Brandrauch entstehen können, ist in Abb. 4.1 wiedergegeben. Bei Temperaturen über 1100°C können im Brandfall von zum Beispiel CdTe-Modulen auch Schwermetalle, wie Cadmium in die Gasphase übergehen und somit emittiert werden. Eine Übersicht über mögliche Brandprodukte im Brandrückstand nach einem Brand ist in Abb. 4.2 zu erkennen. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei Ruß. Im Brandfall von Solarmodulen können toxisch wirkende Brandprodukte sowohl im Brandrückstand als auch im Rauchgas vorhanden sein. Um die Mengen und die stofflichen Gefahren abschätzen zu können, wurden sowohl in den Brandrückständen als auch im Rauchgas analytische Untersuchungen durchgeführt.



Abb. 4.1: Übersicht über mögliche Brandprodukte im Brandrauch



Abb. 4.2: Übersicht über mögliche Brandprodukte im Brandrückstand

Von besonderem Interesse für die Branduntersuchungen sind die toxikologisch wirksamen Bestandteile in den PV-Zellen. Diese sind für die marktüblichen Zelltechnologien, die im Rahmen der Versuche getestet wurden, in Tab. zusammengestellt:

Tab.	4.1:	Übersicht	über	Schwermetallmassenanteile in PV-Modulen	

Technologie	Schwermetalle	Massenanteil
Si-kristallin	Blei	ca. 6,5-13 g/m² [46]
CdTe	Cadmium, Tellur	ca. 6,55-66,4 g Cd/m² [47, 48]
CIGS	Kupfer, Indium, Gallium, Selen	ca.3,6-6,7 g/m <sup>2</sup> *Element <sup>8</sup>

Bei den CIGS-Modulen schwanken die Massenanteile der Schwermetalle im Halbleiter je nach Hersteller und technologischer Entwicklung. Bei den Si-Modulen wird Blei vor allem im Lot und in der Metallisierungspaste für die Frontkontakte verwendet. Die Angaben zum Cadmium-Gehalt in CdTe-PV-Zellen schwanken ebenfalls in der Literatur. Eigene Berechnungen, auf Grundlage des Datenblatts von First Solar bei einer Schichtdicke von 3  $\mu$ m, weisen unter Berücksichtigung der entsprechenden Dichten (Cd, Te, CdTe), einen Cadmium-Gehalt von ca. 11 g/m<sup>2</sup> auf.

Die Toxizität von Rauchgasen ist eine aus dem Griechischen abgeleitete Bezeichnung für Giftigkeit bei einem Brand entstehender Gase. Dabei entscheidet die aufgenommene Dosis darüber, ob eine Giftwirkung eintritt. Als Stufen der

 $<sup>^8</sup>$  eigene Berechnungen, gleiche Elementverteilung, Schichtdicke insgesamt 3  $\mu$ m

Toxizität gibt es verschiedene Kennwerte und Kriterien, die nachfolgend erläutert werden.

Die Toxizität von Rauchgasen ist kein Kriterium der Brandprüfungen von PV-Modulen. Neben den Schwermetallen, die in den PV-Modulen vorhanden sind, können auch toxische Rauchgase, wie z.B. Kohlenmonoxid, Formaldehyd, u.v.m. entstehen.

Die Literaturangaben zu Grenzwerten bezüglich toxikologischer Bewertung von Schwermetallen sind sehr unterschiedlich. Zum Beispiel wird in den MAK-Listen<sup>9</sup> (*Maximale Arbeitsplatzkonzentration*) die tödliche Menge für Cadmium bei einer 8 stündigen Exposition mit 5 mg/m<sup>3</sup> angegeben, die entsprechenden AEGL-Werte (*Acute Exposure Guideline Levels*) geben eine Konzentration von 0,93 mg/m<sup>3</sup> an [50].

Es gibt eine Reihe von Grenzwerten in der Literatur, die hier kurz erläutert werden.

Beim EPRG-Wert (*Emergency Response Planing Guidelines*) handelt es sich um eine maximale luftgetragene Konzentration, bei der davon ausgegangen wird, dass unterhalb dieses Wertes beinahe sämtliche Personen bis zu einer Stunde lang exponiert werden könnten. Es gibt drei Stufen:

- ERPG-1: ohne, dass sie unter mehr als leichten, vorübergehend nachhaltigen gesundheitlichen Auswirkungen leiden und ohne dass sie einen eindeutig definierten unangenehmen Geruch wahrnehmen.
- EPRG-2: ohne, dass sie unter irreversiblen oder sonstigen schwerwiegenden gesundheitlichen Auswirkungen oder Symptomen leiden, bzw. solche entwickeln, die die Fähigkeit einer Person beeinträchtigen könnten, Schutzmaßnahmen zu ergreifen.
- EPRG-3: ohne, dass sie unter lebensbedrohenden gesundheitlichen Auswirkungen leiden bzw. solche entwickeln.

Die AEGL-Werte (*Acute Exposure Guideline Levels*) dienen als Planungswerte für die sicherheitstechnische Auslegung von störfallrelevanten Anlagen (12. BlmSchV) und sind toxikologisch begründete maximale Stoffkonzentrationen für unterschiedliche Expositionszeiten (10 min, 30 min, 1 h, 4 h, 8 h). Es gibt drei Effektschweregrade:

•	PAC-1 / AEGL-1:	spürbares Unwohlsein
•	PAC-2 / AEGL-2:	schwerwiegende, lang andauernde oder
		fluchtbehindernde Wirkung
•	PAC-3 / AEGL-3:	tödliche Wirkung

Die entsprechenden AEGL-Werte in ppm oder mg/m<sup>3</sup> wichtiger Bestandteile, die im Brandfall von PV-Modulen relevant sein können, sind in Tab. 4.3 aufgelistet [50].

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> The MAK Collection for Occupational Health and Safety, ISBN: 9783527600410, Wiley-VCH 2013

Cadmium	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
AEGL-1	0,03 (0,13)	0,03 (0,13)	0,02 (0,1)	0,01	0,008
				(0,063)	(0,041)
AEGL-2	0,28 (1,4)	0,19 (0,96)	0,15 (0,76)	0,08 (0,4)	0,04 (0,2)
AEGL-3	1,7 (8,5)	1,2(5,9)	0,95 (4,7)	0,38 (1,9)	0,15 (0,93)
Kohlenmonoxid	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
AEGL-1	-	-	-	-	-
AEGL-2	420	150	83	33	27
AEGL-3	1700	600	330	150	130
Acrolein	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
AEGL-1	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
AEGL-2	0,44	0,18	0,1	0,1	0,1
AEGL-3	6,2	2,5	1,4	0,48	0,27
Schwefeldioxid	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
AEGL-1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
AEGL-2	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
AEGL-3	30	30	30	19	9,6
Formaldehyd	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
AEGL-1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
AEGL-2	14	14	14	14	14
AEGL-3	100	70	56	35	35
Fluorwasserstoff	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
AEGL-1	1	1	1	1	1
AEGL-2	95	34	24	12	12
AEGL-3	170	62	44	22	22
Essigsäure	10 min	30 min	60 min	4 h	8 h
ERPG-1			5 (13,2)		
ERPG-2			35 (92,5)		
ERPG-3			250 (661)		
AEGL-2				20 (53)	

Tab. 4.2: AEGL-Werte in ppm (zusätzlich in mg/m<sup>3</sup>) von PV-Modul-Bestandteilen bzw. möglichen Brandprodukten

http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/chemlist.htm

Die PAC-Werte (Protective Action Criteria) basieren auf den korrespondierenden 60-Minuten AEGL-, ERPG-, oder TEEL-Werten. Diese Werte stellen Grenzwerte für den toxikologischen Schutz dar. Die toxikologische Wirkung der Schwermetalle bzw. deren Oxide, welche im Brandfall entstehen können, sind anhand der PAC-Werte in mg/m<sup>3</sup> in Tab. 4.2 dargestellt.

Um ein Bild für die Gefährlichkeit der Schwermetalle in PV-Zellen zu bekommen, sind die Schwellenwerte PAC-2 in Abb. 4.3 in reziproker Darstellung aufgetragen. Will man das Risikopotential abschätzen, das sich im Brandfall bei einer Freisetzung von Schwermetallen ergibt, muss zusätzlich die Menge der entsprechenden Stoffe in den Modulen berücksichtigt werden. Dazu werden die reziproken PAC-2 Werte mit der mittleren spezifischen Masse des Bestandteils multipliziert (bei Cd wurde der berechnete Wert zu Grund gelegt). Für die Schwermetalle ergibt sich damit folgendes Risikopotential, wie in Abb. 4.3 gezeigt.

Bestandteil	PAC-1	PAC-2	PAC-3
Blei	0,15	120	700
Bleidioxid	0,17	140	810
Cadmium	0,1	0,76	4,7
Cadmiumoxid	0,36	4	57
Tellur	1,8	20	20
Telluroxid	0,38	0,89	16,0
Kupfer	1	1	45
Kupferoxid	0,6	16	93
Selen	0,2	0,2	1,6
Selenoxid	0,84	2,3	2,3
Indium	0,1	0,1	0,45
Indiumoxid	0,32	0,88	5,3
Gallium	30	330	2000
Galliumoxid	16	180	1100
Methan	2900 ppm	2900 ppm	17000 ppm
CO <sub>2</sub>	30000 ppm	30 000 ppm	50000 ppm
Ethen	600ppm	6600 ppm	40000 ppm

Tab. 4.3: PAC-Werte von PV-Modul-Bestandteilen bzw mögliche Brandprodukte in mg/m<sup>3</sup> (bzw.ppm)



Abb. 4.3: Abschätzung der toxikologischen Gefährlichkeit der Schwermetalle in PV-Modulen

Es zeigt sich, dass von den Dünnschicht-Technologien CdTe und CIGS die größten Gefährdungen ausgehend im Vergleich zu den Dickschicht-Modulen, bei welchen

Blei eine Rolle spielt. Besonders die Elemente Indium und Selen, gefolgt von Cadmium ergeben mögliche Gefährdungspotentiale im Brandfall.

Natürlicherweise kommt Cadmium im Mineralbestand der Erdkruste mit einer durchschnittlichen Konzentration von 0,1 bis 0,5 mg/kg vor. Durch die industrielle Nutzung von Cadmium kommt es zu Anreicherungen in Böden, Luft und Wasser. Bei CdTe-Modulen ist das Element Cadmium als Cadmium-Tellurid gebunden. Diese Verbindung ist wesentlich weniger giftig als das reine Cadmium. Bei beschädigten Modulen kann durch Auswaschungen allerdings Cadmium in die Umwelt gelangen, wie verschiedene Labortests belegen [51]. Deshalb werden CdTe-Module in den USA als Sondermüll behandelt, der nicht auf einer normalen Deponie entsorgt werden darf.

Für Cadmium wurde im Rahmen einer Studie [47] ein Vergleich angestellt zwischen den Cadmium-Emissionen, welche

- bei konventioneller Stromproduktion und
- bei Stromproduktion aus CdTe-Modulen

über die gesamte Lebensdauer entstehen.

Auf der einen Seite wurde eine Cd-Emissionsbilanz der Kraftwerke durchgeführt, auf der anderen Seite eine Cd-Emissionsbilanz von der Cd-Gewinnung, Aufbereitung, PV-Modulherstellung und vollständiger Freisetzung des in den Modulen vorhandenen Cadmiums.

Im Ergebnis schneidet die CdTe-Stromproduktion, trotz der angenommenen 100%-Freisetzung des in den Modulen vorhandenen Cadmiums, signifikant besser ab. Die Hauptursache dafür liegt in der hohen spezifischen Cd-Emission der bestehenden Kraftwerke, insbesondere der Kohle- und Ölkraftwerke.

Mehrere Recycling-Programme der Hersteller von CdTe-Modulen stellen sicher, dass die Module nach Ablauf der Lebensdauer fachgerecht rezykliert werden können. Dies reduziert darüber hinaus signifikant die Beschaffungskosten für Cadmium und Tellur. Allerdings ist nicht sichergestellt, dass die Betreiber von PV-Anlagen auch alle Module in den Recycling-Prozess zurückführen und wie sich möglicher Herstellerkonkurs und Marktwandel auf das Recycling nach der Lebensdauer von ca. 20 Jahren auswirken können.

Die Grundlagen zur Beurteilung der Toxizität von Brandgasen sind zusammenfassend in [52, 53] zu finden. Dabei können verschiedene Konzepte zur Beurteilung der Toxizität von Brandgasen herangezogen werden. Neben dem Vergleich der gemessenen Konzentrationen und den AEGL-, PAC-Werten können die Konzentrationen der Brandgase und Expositionszeiten mit den Auswirkungen auf den Menschen auch nach der vfdb-Richtlinie Schadstoffe bei Bränden [54] bewertet werden. Die entsprechenden Auswirkungen auf dem Menschen sind in Tab. 4.4 anhand der toxischen Gase Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Formaldehyd und Acrolein gezeigt.

Tab. 4.4: Auswirkungen von Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Acrolein und Formaldehyd auf den Menschen<br/>Auszug aus der vfdb-Richtlinie Schadstoffe bei Bränden (vfdb Richtlinie 10/03 Mai 2009) [54]

Kohlenmono	Schwefeldioxid		
Symptome	Konz. in ppm	Symptome	Konz. in ppm
AGW	30	Geruchsschwelle	0,52,5
Keine beobachtbaren Vergiftungserscheinungen	100	MAK (CH) [AGW noch nicht bestimmt]	0,5
Kopfschmerzen nach 23 h	200	Reizungen von Atemwegen und Lunge	48
Ausgeprägte Vergiftungserscheinungen (Verlangsamung des Pulses, Ansteigen des Blutdruckes, Zittern)	300	Milde Reizung von haut und Atemwegen	35
Ausgeprägte Vergiftungserscheinungen nach 23 h	400	Leichte Reizung von Haut und Atemwegen	812
Halluzinationen nach 2030 Min	500		
Erschwerte Bewegung, Tod nach zweistündiger Inhalation	1000	Erhöhter Atemwegswiderstand	10
Tod nach einstündiger Inhalation	1500	Husten, Augenreizung	20
Tödlich nach 30 Min	3000	Lebensgefährlich	100250
Sofortiger Tod	8000	In wenigen Minuten tödlich	600800
Formaldehy	Acrolein		
Symptome	Konz. in ppm	Symptome	Konz. in ppm
Geruchsschwelle	0,051	AGW	0,09
MAK-Wert (CH) [AGW noch nicht bestimmt]	0,3	Reizungen der Schleimhäute, Augentränen	0,8
Leichte Reizungen von Schleimhäuten	0,081,5	Sofort wahrnehmbare Reizungen	1
Nasen- und Rachenreizung	> 0,5	Starke Reizwirkungen	5,5
Bindehaut-, Nasenschleimhautentzündung Rachenkatarrh	10	Stärkste Reizungen, tödlich in kurzer Zeit	> 10
Husten, Lungenentzündung, Bronchitis, Atemnot	10 15		
Zerstörung der Schleimhäute, Kehlkopfkrampf, Lungenödem	50		

Das FED-Konzept (*Fractional Effective Dose*) ist eine Möglichkeit, die Gefahren durch toxische Gase auf den Menschen und deren einsetzende Handlungsunfähigkeit bzw. Tod zu berechnen. Bei der Beurteilung der Toxizität von Brandgasen wird sich auf die Leitsubstanzen, d.h. Stoffe, die qualitativ und quantitativ die Toxizität des Brandrauches beeinflussen, beschränkt. Dabei handelt
es sich zum einen um Substanzen wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Blausäure (HCN), die in der Konsequenz der Inhalation erstickende Wirkungen zeigen und zum Sauerstoffmangel im Körpergewebe führen (Hypoxie). Zum anderen können toxische Substanzen zu irritativen Auswirkungen führen, die von der Augenreizung bis zum Lungenödem reichen. Zu diesen Komponenten gehören die Reizgase Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff, Bromwasserstoff, Schwefeldioxid und Stickoxide [55]. Weiterhin beschreibt die Norm DIN 53436-5 die rechnerische Abschätzung des toxischen Potentials anhand der sogenannten FED- bzw. LC<sub>50</sub>-Werten, die sich wiederum auf einen Vergleich mit Tierversuchen beziehen [55].

Um die freigesetzten Gaskonzentrationen im Brandfall bestimmen zu können, wird die FTIR-Spektroskopie zur Analyse genutzt. Die Bestimmung der quantitativen Rauchgasanalyse mittels FTIR-Spektroskopie ist in der Norm ISO 19702 beschrieben [56].

Die bei den Brandversuchen mit PV-Modulen entstandenen Gaskonzentrationen werden in Kapitel 7 mit den beschriebenen Beurteilungskonzepten diskutiert.

# 5 Durchführung der Brandversuche

In diesem Kapitel werden die untersuchten Materialien, die Brandversuche und deren Bewertung im Laborbrandmaßstab sowie auf einem Testdach in Originalgröße verschiedener PV-Module vorgestellt und diskutiert.

# 5.1 Materialen

Die untersuchten PV-Module wurden vom handelsüblichen Markt (Baumarkt, Internet) bezogen und sind zusammenfassend in Tab. 5.1 aufgelistet. Dabei wurde versucht, möglichst typische und meistverkaufte PV-Module aus jeder PV-Kategorie und Preisklasse mit einzubeziehen, um einen möglichst realistischen Umfang der verschiedenartigen PV-Module untersuchen zu können. Ziel ist eine möglichst realistische Einschätzung des Brandverhaltens von eingesetzten PV-Modulen.

Hersteller	Technologie	Bauweise	Rahmen	Maße in mm
1	amorphe Si-Dünnschicht	Glas/Glas	-	1311 x 711 x 7
2	amorphe Si-Dünnschicht	Glas/Folie	Aluminium	1253 x 1103 x 41
3	Monokristalline Si-Dickschicht	Glas/Folie	Aluminium	1082 x 1237 x 38
4	Monokristalline Si-Dickschicht	Glas/Folie	Aluminium	1676 x 998 x 41
5	Polykristalline Si-Dickschicht	Glas/Folie	Aluminium	1658 x 834 x 46
6	Amorphe Si-Folie	Folie	-	695 x 350 x 2
7	CdTe- Dünnschicht	Glas/Glas	-	1200 x 600 x 7
8	CIGS- Dünnschicht	Glas/Glas	Aluminium	1196 x 636 x 36
9	Monokristalline Si- Dickschicht	Glas/Folie	Aluminium	1650 x 990 x 40
10	Polykristalline Si-Dickschicht	Glas/Folie	Aluminium	1370 x 670 x 35

Tah	5 1. Augwahl	verschiedenartige	PV-Module und	doron	Spazifikationan
Tab.	J. I. Auswall	verschliedenantige	F v-Iviouule ullu	ueren	Spezilikationen

# 5.2 Laborbrandversuche mit PV-Modulen

Folgende PV-Module wurden für die Voruntersuchungen ausgewählt (Tab. 5.2): Tab. 5.2: Im Laborbrandmaßstab untersuchte PV-Module

Hersteller	Technologie	Verkapselung	Rahmen	Maße in mm
1	amorphe Si Dünnschicht	Glas/Glas	-	1311*711*7
2	amorphe Si Dünnschicht	Glas/Folie	Aluminium	1253*1103*41
3	Monokristalline Dickschicht	Glas/Folie	Aluminium	1082*1237*38
7	Cadmiumtellurid Dünnschicht	Glas/Glas	-	1200*600*7
8	Dünnschicht CIGS	Glas/Glas	Aluminium	1196*636*36

Die ausgewählten Module decken dabei einen großen Teil der am Markt verfügbaren Technologien, Verkapselungen und Rahmenarten ab.

Zunächst erfolgten umfangreiche Labor-Brandversuche. Für die einzelnen Brandtests wurden die Module den Anforderungen entsprechend genau zugeschnitten (Wasserstrahlverfahren).

Des weiteren wurden die verschiedenen PV-Modul-Proben einem Test zur Entflammbarkeit nach DIN 4102-1 im Brennkasten unterzogen. Dazu wird die Entzündbarkeit mit Hilfe einer Propangasflamme untersucht und das Abtropfverhalten bewertet. Mit dieser Prüfung wird die Minimalanforderung Normalentflammbarkeit für Baustoffe nachgewiesen, die Beflammungsdauer beträgt dabei 15 Sekunden.

Des Weiteren wurden Labor-Brandtests in der Rauchdichtekammer und im Cone Calorimeter in Hinblick auf die Bestimmung der Rauchentwicklung und der Rauchgaszusammensetzung durchgeführt. Des weiteren dienten die Brandversuche auch zur Erzeugung von Brandrückständen für die Brandrückstandsanalyse von Schwermetallen in CdTe- und CIGS-Modulen.

# 5.2.1 Normalentflammbarkeit im Brennkasten nach DIN 4102-1 (bzw. ISO 11925-2)

Für die Vorversuche zur Entflammbarkeit wurden die Modulproben im Brennkasten eingespannt und für 15 s einer Propangasflamme ausgesetzt (Abbildung 5.1). Dabei wird beobachtet, ob sich die Proben entzünden und wie weit sich die Flamme ausbreitet. Die Tests wurden sowohl an der Vorderseite als auch an der Rückseite durchgeführt. Die Flammenleistung ist vergleichbar mit der einer Streichholzflamme (Länge der Flamme 2 cm). Diese Versuche wurden sowohl mit zugeschnittenen Proben direkt nach Norm als auch in PV-Modul-Originalgröße durch Heranfahren des Propanbrenners in Anlehnung an die Normbedingungen durchgeführt, um das komplizierte Zuschneidverfahren zu ersparen und eine dadurch möglicherweise erzeugte Fehlerquelle zu unterbinden (das Glas bekommt Risse). Es konnten keine Unterschiede in der Vorgehensweise im Ergebnis festgestellt werden.



Abb. 5.1: Brandtests zur Entflammbarkeit nach DIN 4102-1 im Brennkasten, links: Si-Dünnschicht-Modul, Rückseite, rechts: Si-monokristallin-Modul, Vorderseite, im Vergleich rechts nach Norm, links in Originalgröße

Die Versuche im Brennkasten ergaben, dass alle Module als nicht entflammbar (und mindestens als B2) gemäß DIN 4102-1 eingestuft werden können. Bei den entsprechenden Modulen mit Folie an der Rückseite wurden die Versuche in Anlehnung an die DIN 4102-1 außerhalb des Brennkastens in Originalgröße durchgeführt. Ein Zerschneiden der Module hätte zum Zerspringen des Sicherheitsglases geführt. Dabei zeigten sich an der Folie auf der Modulrückseite jeweils kleine Brandflecken. Die Folie wurde dabei jedoch nicht entzündet. In Abb. 5.2 ist der Brennkastentest exemplarisch für ein a-Si-Dünnschicht-Modul und ein monokristallines Si-Dickschicht-Modul gezeigt.



Abb. 5.2: Brandflecken an der Modulrückseite der Glas/Folie-Module während der Brennkastenversuche nach DIN 4102-1 (links: a-Si-Dünnschicht-Modul, rechts: monokristallines Si-Dickschicht- Modul)

# 5.2.2 Brandversuche in der Rauchkammer nach ISO 5659-2

Um weitere Aussagen über das Brandverhalten und die Rauchentwicklung von PV-Modulen im Brandfall treffen zu können, wurden Vorversuche in der Rauchdichtekammer (Smoke Density Chamber, SDC) durchgeführt. Dazu wurden aus Original PV-Modulen Proben mit einer Größe von 75 mm x 75 mm zugeschnitten. Bei einer Bestrahlungsstärke von 50 kW/m<sup>2</sup> wurden die zugeschnittenen Modulproben in der Rauchdichtekammer in Anlehnung an ISO 5659-2 getestet (Abb. 5.3). Zusätzlich zur Strahlung diente eine Propangasflamme als Zündquelle für die austretenden Gase.



Abb. 5.3: Rauchdichtekammer nach ISO 5659-2 (links: Rauchkammer, Mitte: Kopplung zum FTIR-Gerät, Sauerstoffanalysatator, rechts: Probenhalter auf einer Waage unter einem Cone mit zusätzlicher Propanflamme)

Während der Tests werden das Brandverhalten und die Rauchentwicklung beurteilt. Über eine Lichtmessstrecke wird die Trübheit der Rauchgase gemessen und quantifiziert. Neben der spezifischen optischen Rauchdichte wurde auch die Rauchgaszusammensetzung mittels FTIR-Spektroskopie (Fourier Transformierte Infrarot-Spektroskopie) während der Brandversuche ermittelt. Die Ergebnisse dazu sind im Kapitel 7 ausgewertet.

Bei dem hier verwendeten FTIR-Spektrometer handelte es sich um das Gerät Nicolet 380 der Firma ThermoFisher Scientific GmbH, welches direkt an die Rauchdichtekammer gekoppelt ist. Der Versuchsaufbau ist in der Abb. 5.3 wiedergegeben. Über eine Sonde, einen beheizten Partikelfilter und eine beheizte Transferleitung (180°C) gelangen die heißen Rauchgase in das FTIR-Spektrometer und werden dort qualitativ und quantitativ analysiert. Die Messungen erfolgten bei 185°C mit einer Auflösung von 0,5 cm<sup>-1</sup>. Folgende Komponenten können beurteilt werden: Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Wasser, Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak, Ethen, Ethin, Acrolein, Phenol, Benzen, Formaldehyd, Cyanwasserstoff, Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff. Des Weiteren wird der Sauerstoffgehalt mit Hilfe eines Sauerstoffanalysators der Firma Servomex gemessen.

Folgende Modularten wurden in der Rauchdichtekammer getestet:

- CIGS-Dünnschicht-Module
- CdTe-Dünnschicht-Module
- a-Si-Dünnschicht-Module

Es zeigte sich bei allen drei untersuchten Modulproben ein weitgehend ähnliches Zünd- und Brandverhalten. Etwa 3-4 min nach Versuchsbeginn kommt es zu Rissen in der Glasscheibe, die Laminatschicht zwischen den Glasplatten der Modulprobe vergast, die Gase entzündeten sich. Zunächst brennt es nur in den Rissen, dann auf der ganzen Oberfläche. Es werden Flammenhöhen von ca. 10-15 cm erreicht. Zum Ende brennt nur der Rand der Probe und das Feuer erlischt nach etwa 15 min. Das Brandverhalten der Module ist sehr ähnlich, wobei das CIGS-Modul ein wenig stärker brennt. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Flammenentwicklung einer CdTe- und einer CIGS-Modulprobe zu erkennen. Der Massenverlust der Module durch die Brandtests ist sehr gering, auch der Sauerstoffverbrauch. Der Massenverlust und die Beobachtungen während der Brandversuche in der Rauchkammer sind in Tab. 5.3 zusammengefasst.



Abb. 5.4: CdTe- (oben) und CIGS-Dünnschicht-Module (unten) während der Brandtests nach etwa 6 min in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) nach ISO 5659-2

Tab. 5.3: Beobachtungsergebnisse zum Brandverhalten von CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulen w	/ährend der
Brandversuche in der Rauchkammer nach ISO 5659-2 (50 kW/m <sup>2</sup> , Pilotflamme)	

Beobachtungen	CdTe-Module	CIGS-Module
Erste Risse	ca. 4 min.	ca. 3 min.
Entzündung (in Risse)	5-6 min	4-6 min
Flamme am Rand	8-11 min.	6-7 min
Feuer aus	14-17 min	14-17 min
Rückstandsgewicht	92-96%	97%

# 5.2.3 Brandversuche im Cone Calorimeter nach ISO 5660

Weitere Untersuchungen zum Brandverhalten von PV-Module wurden im Cone Calorimeter nach ISO 5660 durchgeführt (Abb. 5.5). Die Rauchdichte und Rauchentwicklung wurden mittels einer Lichtmessstrecke im Lauf des Brandversuchs aufgezeichnet. Die Masse sowie die Massenverlustrate wurden ebenfalls gemessen. Der Aufbau des Cone Calorimeter wurde modifiziert, um die Rauchzusammensetzung von den Brandgasen im Laufe des Brandversuchs quantifizieren zu können. Dabei wurde ein FTIR-Spektrometer an den Abzug gekoppelt, und die Gase mit einem Durchfluss von 4,5 L/min gemessen. Die Werte

dazu werden in Kapitel 7 besprochen. Die Original Platten wurden auf 100 mm × 100 mm, beziehungsweise 4 Platten a 50 mm × 50 mm zugeschnitten und bei einer Beanspruchung von 70 kW/m<sup>-2</sup> gemessen. In Abb. 5.6 sind die Modul-Proben vor dem Cone Calorimeter-Test im unbeanspruchten Zustand zu erkennen.



Abb. 5.5: Cone Calorimeter nach ISO-5660 gekoppelte mit FTIR-Spektrometer (links: Cone Calorimeter, Mitte: Probenvorrichtung mit Waage, Zünder und Cone, daneben FTIR-Spektrometer, rechts: die Probe unter dem Cone)



Abb. 5.6: PV-Modul-Proben vor dem Brandtest im Cone Calorimeter nach ISO 5660 (v.l.n.r: monokristallines Si-Dickschicht-Modul, a-Si-, CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Module)

In Abb. 5.7 ist ein a-Si-Dünnschicht-Modul während eines Brandversuchs im Cone Calorimeter gezeigt. Dies ist exemplarisch gezeigt, das Brandverhalten der verschiedenen Module ist sehr ähnlich, wenn die Bauweise gleich ist. Zunächst entstehen nach etwa einer Minute Risse im oberen Glas, in diesen Rissen und vom Rand entweichen dann die Pyrolysegase bis es zur Entzündung nach etwa 2 Minuten kommt. Die Module brennen 1-2 Minuten, die Extinktion steigt, dann werden die Flammen wieder kleiner und das Feuer geht nach 3-4 min wieder aus. Die Si-Dickschichtmodule der Bauweise Glas/Folie monokristallinen sind im Brandverhalten anders, da diese eine enflammbare Kunststoff-Rückschichtfolie besitzen und somit viel intensiver brennen als die untersuchten Dünnschichte-Module der Bauweise Glas/Glas, wie auch in Abb. 5.8 im Vergleich zu erkennen ist.



Abb. 5.7: a-Si-Dünnschicht-Modul während eines Brandversuches im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündflamme) nach ISO-5660-1 (links: vor Entzündung mit spark igniter, Entweichung von Pyrolysegasen, Mitte: Entzündung, rechts: maximale Flammenhöhe während des Tests)



Abb. 5.8: Brandverhalten verschiedener PV-Module während der Cone-Calorimeter-Tests (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündflamme) nach ISO 5660 (v.l.n.r.: monokristallines Si-Dickschicht-Modul, a-Si-Dünnschicht-Modul, CIGS-Modul und CdTe-Modul)

In Tab. 5.4 sind die Beobachtungen während der Cone Calorimeter-Versuche von CdTe- und CIGS-Modulen vergleichend zusammengefasst. Es wurden zum einen Proben der Größe 100 x 100 mm, wie es in der Norm gefordert wird, und zum anderen geviertelte Proben (4 mal 50 x 50 mm, als Puzzle zusammengelegt) verbrannt. Hintergrund der geviertelten Proben ist die spätere einfachere Probenaufarbeitung für die Brandrückstandsanalytik. Es konnten in den Ergebnissen in Hinblick auf die Rauchentwicklung, Rauchgaszusammensetzung und den Brandereignissen der einzelnen Probe und der geviertelten Proben keine Unterschiede gefunden werden. In der Tab. 5.4 sind in den Klammern die Mittelwerte aus 4 Messungen angegeben.

Die Schadensbilder der CdTe- und CIGS-Module in ganzer und geviertelter Form nach den Brandtests im Cone Calorimeter sind in den Abb. 5.9 und Abb. 5.10 wiedergegeben.

Beobachtungen	CdTe-Module	CIGS-Module
Entweichen von Pyrolysegasen	ca. 1-2 min.	ca. 1 min
	(1 min 33)	(1 min 05)
Entzündung (tig)	2 min-2 min30	ca. 2 min
	(2 min21)	(1 min 50)
Feuer aus (flame-out)	ca. 4 min (3 min 49)	ca. 3 min 30
		(3 min 22)
Rückstandsgewicht	ca. 97%	ca. 97 %

Tab. 5.4: Beobachtungsergebnisse zum Brandverhalten von CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulen während der Brandversuche im Cone Calorimeter nach ISO 5660



Abb. 5.9: CdTe-Dünnschicht-Module vor und nach den Brandversuchen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündflamme) in geviertelter Form und als Ganzes (v.l.n.r.: 4 Stücke-Form (4 mal 50 x 50 mm) vor und nach dem Brandtest, als Ganzes (100 x 100 mm) vor und nach dem Brandtest)



Abb. 5.10: CIGS-Dünnschicht-Module vor und nach den Brandversuchen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündflamme) in geviertelter Form und als Ganzes (v.l.n.r.: 4 Stücke-Form (4 mal 50 x 50 mm) vor und nach dem Brandtest, als Ganzes (100 x 100 mm) vor und nach dem Brandtest)

Die Schadensbilder auf Silizium basierter Module sind in Abb. 5.11 und Abb. 5.12 wiedergegeben. Auch hier zeigte sich, dass die Probenform (als Ganzes oder geviertelt) keinen Einfluss auf das Brandverhalten. Im Gegensatz dazu hat die Bauweise Glas/Folie oder Glas/Glas einen sehr großen Einfluss auf das Brandverhalten (Abb. 5.9). Die Brandereignisse der Si-Module im Vergleich sind in Tab. 5.5 wiedergegeben. Nähere Informationen zur Rauchgaszusammensetzung und dem Brandverhalten sind in Kapitel 7, die Schadensbilder und detaillierte Informationen zu den Brandrückständen der CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Module sind im Kapitel 8 zu finden.

Tab. 5.5: Beobachtungsergebnisse von a-Si-Dünnschicht-Modulen und monokristallinen Si-Dickschicht-Modulen zum Brandverhalten während der Cone-Calorimeter-Tests nach ISO 5660

Beobachtungen	a-Si-Dünnschicht- Module	monokristalline Si-Dickschicht-Module
Entweichung der Pyrolysegase	ca. 1min (1 min 22)	1 min 07
Entzündung (tig)	1 min 48	1 min 11
Feuer aus (flame-out)	3 min 36	2 min 22
Rückstandsgewicht	ca. 97%	ca. 88%



Abb. 5.11: a-Si-Dünnschicht-Module vor und nach den Brandversuchen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündflamme) in geviertelter Form und als Ganzes (v.l.n.r.: 4 Stücke-Form (4 mal 50 x 50 mm) vor und nach dem Brandtest, als Ganzes (100 x 100 mm) vor und nach dem Brandtest)



Abb. 5.12: Monokristalline Si-Dickschicht-Module vor und nach den Brandversuchen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündflamme) in geviertelter Form und als Ganzes (v.l.n.r.: 4 Stücke-Form (4 mal 50 x 50 mm) vor und nach dem Brandtest, als Ganzes (100 x 100 mm) vor und nach dem Brandtest)

# 5.2.4 Brandversuche in der SBI-Apparatur nach DIN EN 13823

Um das Brandverhalten von vertikal montierten PV-Modulen zu analysieren, wurden zwei verschiedene Brandtests in der SBI-Apparatur, dem Single Burning-Item Test nach DIN EN 13823 [57], durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Silizium-Dünnschicht-Modul mit einer Glas/Glas Bauweise vertikal an die Wand des SBI-Brandraums befestigt. Dazu dienten die am Modul befindlichen backrails an der Rückseite, diese waren mit zwei Halteleisten verschraubt. Diese Montageart repräsentiert die übliche Halterung an einer Fassade. Somit können Aussagen über das reale Brandverhalten vertikal angebrachter PV-Module gemacht werden.

Die Brandbeanspruchung der PV-Module wurde zunächst normkonform zur DIN EN 13823 mit einer Wärmefreisetzungsrate von 30,7+/-2,0 kW angepasst. In einem

zweiten Brandversuch wurde eine höhere Brandbeanspruchung von 130 kW eingestellt. In der Abb. 5.13 ist der Versuchsaufbau mit brennendem Hilfsbrenner und vertikal an der Wand befestigtem Solarmodul zu erkennen. Während der Versuche wurde das Modul an der rechten unteren Seite befeuert (Abb. 5.13). Der Volumenstrom beträgt 0,6 +/- 0,05 m/s.

Nach einer Brandbeanspruchung von 130 kW fällt das gesamte Modul nach 6 min aus der Halterung von der Wand ab und brennt noch bis zur 13. Minute. Auch hier konnten nach den Brandversuchen an den untersuchten PV-Modulen noch Strom gemessen werden. Die Schadensbilder sind in Abb. 5.15 dargestellt.



Abb. 5.13: Versuchsaufbau mit Referenzbrenner im SBI, Modul im Hintergrund vertikal an der Wand

Abb. 5.14: Brandtest im SBI an einem Si-Dünnschicht-Modul bei vertikaler Montage

Bei den Brandversuchen konnten in Abhängigkeit der Brandbeanspruchung folgende Beobachtungen zum Brandverhalten gemacht werden (Tab. 5.6):

Tab. 5.6: Brandereignisse während der SBI-Tests von Si-Dünnschicht-Modulen der Bauweise Glas/Glas in Abhängigkeit der Brennerleistung

Brennerleistung	30 kW	130 kW
Glasbruch	9 min	1 min
Abfallen von Teilen	15 min	4 min
Versuchsende	30 min	6 min (Modul fällt ab)
Feuer aus	30 min	Teile brennen bis 13 min
Schadensdimensionen	21 cm x 14 cm	133 cm x 37 cm



Abb. 5.15: Schadensbilder nach einem SBI-Test bei einer Brandbeanspruchung von 130 kW, links: kurz vor dem Abfallen eines Si-Dünnschicht-Moduls in vertikaler Anordnung, rechts: Schadensfläche der Rückseite nach dem Test

# 5.3 Brandversuche von PV-Modulen auf einem Testdach

# 5.3.1 Brandversuche mit dem Drahtkorb nach CEN TS 1187/1

Die Norm CEN TS 1187 ist eine deutsche Norm zur Prüfung von Dachbaustoffen. Der dort beschriebene Prüfaufbau wurde genutzt, um PV-Module hinsichtlich ihres Brandverhaltens zu untersuchen.

Die Versuche werden auf einem Testdach nach CEN TS 1187 durchgeführt. Es besitzt die Mindestmaße 1,8 m x 0,8 m, die Dachneigung lässt sich variieren. Es können alle realen Einbausituationen von PV-Modulen nachgestellt werden. Als Norm-Tragunterlage für den Schrägdachaufbau wurde eine Holzfaserplatte nach CEN TS 1187 Punkt 4.4.2.2 b), bzw. für Flachdachaufbau eine Kalzium-Silikatplatte nach Punkt 4.4.2.2 c) gewählt. Die Brandversuche mit dem Drahtkorb wurden gemäß dem ersten Prüfverfahren nach CEN TS 1187 in dachparalleler Anordnung der PV-Module durchgeführt. Dieser Test beinhaltet einen Holzwolle-Drahtkorb als Brandsatz. Dies entspricht z.B. dem Szenario, bei dem, durch Ansammlung von Laub unter den Modulen, ein ähnlicher Brandsatz entstehen kann.

Zusätzlich wurden aber auch Brandversuche mit dem Drahtkorb in aufgestellter Anordnung der Module auf einem Flachdach durchgeführt. Dabei wurde der Drahtkorb zu einen an der unteren Kante der Module und zum anderen unter den Modulen (Flamme von innen, Szenario Dachstuhlbrand) positioniert. Das Flachdach bestand dabei sowohl aus Metall/Silikatplatten als auch aus Bitumen/Dachpappe.

# 5.3.1.1 Testdach

Das Testdach repräsentiert ein typisches Wohnhausdach oder auch ein Scheunendach, welches mit Dachziegeln der Standardform "Frankfurter Pfanne" gedeckt ist. Darauf sind die Dachhaken und Trägerleisten für die Module angebracht. Das Testdach befand sich im Wandprüfstand, der als Brandraum bzw. als Abzug diente, um entstehende Rauchgase während der Brandversuche absaugen zu können Die Neigung des Daches kann frei eingestellt werden. Für die Versuche wird eine Neigung von 30° verwendet. Dies entspricht in etwa dem optimalen Anstellwinkel für PV-Module für den größten Solarertrag (28°).

Um das Brandverhalten des Drahtkorbes als Vergleich zu haben, wurde dieser vorab ohne PV-Module auf dem Testdach angezündet. Es zeigte sich, dass die Flammen der Holzwolle nach ca. 4 min erloschen sind; die Glut nach weiteren 5 min. Thermoelement-Messungen unter den Dachziegeln (Oberseite, an der Stelle des Brandsatzes) zeigen Temperaturen um ca. 300°C ohne ein zusätzliches PV-Modul. Das Testdach mit dem Brandsatz ohne PV-Modul ist in Abb. 5.16 zu sehen.



Abb. 5.16: Drahtkorbtest ohne PV-Modul in dachparalleler Anordnung (Schrädach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1: Testdach mit Dachziegeln

# 5.3.1.2 Systematisierung

Die Drahtkorbversuche nach CEN TS 1187/1 verfolgen die beiden Zielsetzungen:

- Beurteilung des Brandverhaltens der PV-Module nach unterschiedlicher Positionierung des Drahtkorbes
- Analyse der Brandrückstände in Hinblick auf Schadstoffe

Für die Versuchsdurchführung wurden folgende Parameter variiert (Tab. 5.7):

Variation	Möglichkeiten					
Modulart	Glas/Folie, Glas/Glas, Folie					
Dachoberfläche	Dachziegel, Beton, Bitumen, Blech,					
Montage des Moduls	Aufdachmontage, Aufständerung auf Flachdach, Dach- integriert, aufgeklebte Folie					
Neigung	0 - 45°					
Feuerangriff	Unterseite, Oberseite, Modulkante (oben, unten, Seite)					
Prüfverfahren	u.U. härtere Beanspruchung durch andere Prüfverfahren					

Tab. 5.7: Variation der Testparameter für die Brandtests nach CEN TS 1187/1

Die chemisch-analytischen Untersuchungen des verbleibenden Brandrückstandes sind notwendig, um Rückschlüsse auf den Verbleib der giftigen Schwermetalle in den Modulen ziehen zu können.

# 5.3.1.3 Durchführung der Brandversuche

# 5.3.1.3.1 Monokristallines Silizium-Dickschicht-Modul in Glas/Folie-Bauweise mit Aluminium-Rahmen

Zunächst wurde das klassische Silizium-Dickschicht-Modul auf dem Testdach getestet. Der Brandsatz wurde auf das Modul gestellt und in dieser Position mit Drähten gegen ein Abrutschen oder Einsinken gesichert. Der Versuchsaufbau kurz nach dem Entzünden ist in Abb. 5.17 gezeigt. Die Holzwolle brannte ca. 4 min. Während der größten Hitzeentwicklung wölbte sich das Solarglas, welches nur ca. 3 mm dick ist nach unten, es zerbrach aber nicht. Dabei verbrannte ein Teil der rückseitigen Folie, welches auf den Schadensbildern in Abb. 5.18 dargestellt ist.



Abb. 5.17: Drahtkorbtest nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1: Testdach mit Si-Dickschicht-Modul und Drahtkorb-Brandsatz in dachparalleler Anordnung



Abb. 5.18: Schadensbilder an Vorder- und Rückseite des Si-Dickschicht-Moduls nach dem Drahtkorbtest in dachparaller Anordnung (Schrägdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Zur Bestimmung der Temperaturen während des Brandtests wurden Thermoelemente an mehreren Stellen angebracht, unter dem Drahtkorb sowie über, rechts und links vom Drahtkorb, unter dem Modul, an der Dachoberfläche und an der Dachunterseite. Die entsprechenden Temperaturverläufe sind in Abb. 5.19 dargestellt.



Abb. 5.19: Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen während eines Drahtkorbtests in dachparaller Anordnung (Schrägdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Vergleicht man den Temperaturverlauf mit den Schadensbildern, so ist zu erkennen, dass ein Schaden nur im Bereich der beiden Sensoren direkt unter dem Brandsatz aufgetreten ist. An den Sensoren, welche um den Brandsatz im Abstand von 3 cm links und rechts angeordnet waren, wurden Maximaltemperaturen bis ca. 170°C erreicht. Auf der Unterseite des Moduls ist aber an diesen Stellen kein Schaden zu verzeichnen.

Insgesamt hielt das Modul der Feuereinwirkung von oben ohne Probleme stand und schützte damit sogar das darunter liegende Dach. Die Temperaturen an der Dachoberfläche betrugen im Maximum nur etwa 70°C, unter der Dachhaut konnte Raumtemperatur registriert werden.

In einem weiteren Versuch sollte beurteilt werden, wie sich eine Brandbeanspruchung von der Modulunterkante auswirkt. Dieses Szenario entspricht einer Ansammlung von Laub in einer Regenrinne, die im Brandfall die Kantenbeanspruchung des PV-Moduls hervorrufen könnte. Der Drahtkorb wurde unterhalb des Moduls auf den Dachziegeln befestigt. Die Brandbeanspruchung an der Kante ist in Abb. 5.20 gezeigt.



Abb. 5.20: Kanten-Brandbeanspruchung des Moduls in Anlehnung an den Drahtkorbtest in dachparalleler Anordnung (Schrägdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Entgegen den Erwartungen zeigte sich auch hier nur ein geringfügiger Schaden an der Modulkante (Abb. 5.21). Die Ursache dafür liegt vor allem am Modulrahmen, welcher das eigentliche PV-Modul gegen die seitliche Feuereinwirkung schützt.



Abb. 5.21: Verursachte Schäden einer Kantenbefeuerung (links: Oberseite, rechts. Unterseite) eines Drahtkorbtests in dachparalleler Anordnung (Schrägdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Die beim Brandversuch entstandenen Temperaturen sind in Abb. 5.22 aufgetragen. Die Thermoelemente befanden sich mittig im Abstand von ca. 12 cm von der Kante entfernt. Durch das Ablösen des Thermoelements an der Modulunterseite entstanden bis ca. 650°C, da das Thermoelement direkt der Flamme ausgesetzt war. Die Größe des Brandflecks an der Unterseite war wesentlich kleiner als bei Anordnung des Brandsatzes auf dem Modul. Auch hier entstanden an der Dachhaut keine hohen Temperaturen.



Abb. 5.22: Temperaturverlauf während eines Drahtkorbtests mit Kantenbefeuerung in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

In einem weiteren Brandversuch wurde beurteilt, wie sich eine Brandbeanspruchung an der Modulunterseite bei Flachdachmontage auswirkt. Dieses Szenario entspricht dem möglicherweise durch Wind angesammelten Laub direkt unter dem aufgestellten PV-Modul auf einem Flachdach. Dazu wurde der Brandsatz unterhalb des Moduls auf einer Kalzium-Silikatplatte als Norm-Tragunterlage nach CEN TS 1187-4.4.2.2 c) gestellt. Das Modul wurde in einem Winkel von 30° aufgeständert. Die Versuchsdurchführung ist in Abb. 5.23 veranschaulicht.



Abb. 5.23: Drahtkorbtest eines Silizium-Dickschicht-Moduls (Seitenansicht und Oberseite) in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Es war zu beobachten, dass sich das Glas bei der Brandbeanspruchung wieder nach unten durchbog. Darüber hinaus erfolgte im Gegensatz zum Brandsatz auf dem

Modul bei der Befeuerung von unten ein kompletter Abbrand der Rückseitenfolie im Bereich des Feuers. Ein Durchscheinen des Feuers war auf der Vorderseite zu erkennen, das Glas hielt der Beanspruchung jedoch stand, es kam zu keinen Feuerdurchtritt (Abb. 5.16). Die Schadensbilder nach dem Brandversuch sind in Abb. 5.24 gezeigt.



Abb. 5.24: Schadensbilder eines Si-Dickschicht-Moduls (links: Rückseite, rechts: Vorderseite) nach einem Drahtkorbtest in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Oberhalb des Moduls treten im Maximum Temperaturen um etwa 280°C auf, während an der Unterseite des Moduls bis etwa 550°C auftreten, durch die Brandbeanspruchung von unten. Der Temperaturverlauf während dieses Versuches ist in Abb. 5.25 wiedergegeben.



Abb. 5.25: Temperaturverlauf eines Si-Dickschicht-Moduls während eines Drahtkorbtests unterhalb des Moduls in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Bei allen drei Versuchen stellte sich heraus, dass die Folie an der Rückseite des Moduls nicht von selbst weiterbrannte und das Glas der Beanspruchung durch das Feuer standhielt. Es kam zu keinem brennenden Abtropfen. Alle drei Module zeigten nach den Versuchen noch vollständige Stromleistung.

# 5.3.1.3.2 Silizium-Dünnschicht-Modul in Glas/Folie-Bauweise mit Aluminium-Rahmen

Die Si-Dünnschicht-Module der Bauweise Glas/Folie sind ähnlich aufgebaut wie die Si-Dickschicht-Module. Die Unterschiede liegen in der fotoaktiven Schicht (Si-Dünnschicht statt Si-Einkristall) und in zwei Stützstreben an der Modulrückseite. Bei den Drahtkorbtests mit einer Beanspruchung des Moduls in aufgeständerter Anordnung von unten zeigte sich aber ein anderes Brandverhalten. Die Folie an der Modulrückseite verbrannte und es kam zu einem Bruch der Glasplatte im beanspruchten Bereich. Der Flammendurchbruch und das Schadensbild nach dem Versuch sind in Abb. 5.26 zu sehen.



Abb. 5.26: Flammendurchbruch und Schadensbild eines Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach einem Drahtkorbtest in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Die Folie an der Modulrückseite begann während des Versuchs zu schmelzen, fing Feuer und tropfte brennend auf die Unterlage. Nach ca. 3 Minuten zerbrach das Glas. Die Temperaturen unterhalb des Moduls liegen bei etwa 550°C, oberhalb bei etwa 400°C, bis es zum Ablösen der Thermoelemente nach etwa 180 Sekunden, kurz vor dem Flammendurchbruch, kommt (Abb. 5.27). Im Diagramm ist deutlich der Moment zu erkennen, an dem das Modul durchgebrochen ist (nach ca. 180 s). Zuvor stieg die Temperatur an der Modulunterseite auf ca. 500°C an, während die Temperaturen an der Moduloberseite wesentlich langsamer anstiegen, abgepuffert durch das Solarglas. Nach dem Bruch des Glases hing der obere Sensor (grüne Linie) direkt in der Flamme, dadurch wurden ca. 800°C erreicht. Die Sensoren "Modulunterseite\_Mitte" und "Modulunterseite" waren am größten Glasbruchstück befestigt und fielen nach 200 s zusammen neben den brennenden Drahtkorb. Dies erklärt die abrupt sinkenden Temperaturen. Der starke Temperaturabfall nach ca. 420 s ist auf ein Verlöschen des Drahtkorbes zurückzuführen.



Abb. 5.27: Temperaturverlauf eines Si-Dünnschicht-Moduls während eines Drahtkorbtests in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

#### 5.3.1.3.3 Silizium-Folienmodul auf Flachdach

In der Regel werden Folienmodule auf ein Beton-Flachdach aufgeklebt. Um diesen Fall zu testen, wurde ein kleineres Folienmodul mit den Maßen 70 cm x 35 cm auf eine Kalzium-Silikatplatte als Norm-Tragunterlage CEN TS 1187 Punkt 4.4.2.2 c) gelegt. Dies entspricht einem ungenügend angeklebten Folienmodul. Der Drahtkorb befand sich auf dem Modul und wurde entzündet. Das Modul begann kreisförmig unter dem Drahtkorb durch die Hitzeeinwirkung zuerst zu schmelzen, nach ca. 4 min entzündeten sich die entstehenden Gase. Nach 14 min war das Feuer erloschen. Im mittleren und oberen Bereich der Flamme entwickelte sich dunkler Ruß, der auf eine unvollständige Verbrennung der Kohlenwasserstoffe aus der Folie hindeutet. In Abb. 5.28 sind der Brandtest und das entsprechende Schadensbild wiedergegeben. Das Modul brannte nur im Bereich der Hitzeeinwirkung durch den Brandsatz in einem Durchmesser von ca. 42 cm. Ein Weiterbrennen der Folie von allein konnte nicht beobachtet werden.



Abb. 5.28: Drahtkorbtest eines Si-Folienmodul auf einem Flachdach in Anlehnung CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 und dazugehöriges Schadensbild

Es konnten Temperaturen bis zu ca. 800°C gemessen werden (Abb. 5.29). Dabei trat die Temperaturerhöhung zuerst zwischen Brandsatz und Modul auf. Zeitverzögert konnte auch an der Modulunterseite eine Temperatur bis ca. 800°C gemessen werden. Die Dicke der Folie betrug dabei 3 mm. Die Temperaturen fielen nach dem Versuch langsamer als bei den anderen Versuchen, da die Tragunterlage die Wärme speicherte und auch mehr erhitzt wurde als in den vorangehenden Versuchen.

Durch den höheren Anteil an Laminat besitzen Folienmodule, im Vergleich zu traditionellen Modulen mit Glas als Träger, eine erhöhte Brandlast. Es verbrannte eine Fläche von ca. 0,044 m<sup>2</sup>. Der Rest des Moduls mit den Anschlüssen war noch entsprechend der geringeren Fläche funktionsfähig.



Abb. 5.29: Temperaturverlauf während eines Drahtkorbtests eines Si-Folienmoduls auf einem Flachdach in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

#### 5.3.1.3.4 Si-Dünnschicht-Modul in Glas/Glas-Bauweise

Als nächstes wurde ein Si-Dünnschicht-Modul dem Brandtest unterzogen. Die bereits durchgeführten Versuche zeigten, dass die Beanspruchung des Moduls bei einer Brandlast unter dem Modul am größten war. Deshalb wurde dieses Modul auf einem Flachdachständer montiert und von unten her beflammt (Abb. 5.30).



Abb. 5.30: Drahtkorbtest eines Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Außer einem leichten Glasbruch traten bei diesem Versuch keine nennenswerten Schäden auf. Die Temperaturmessungen sind in Abb. 5.31 dargestellt.



Abb. 5.31: Temperaturverlauf während eines Drahtkorbtests eines Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Es zeigte sich, dass durch die Wärmeleitung die Temperatur an der Modulunterseite ca. 430°C betrug. Das Modul bildete im Bereich der Feuerbeanspruchung kleinere Risse in beiden Glasschichten, ein Durchbrand erfolgte allerdings nicht. Die Laminatschicht blieb ebenfalls intakt.

#### 5.3.1.3.5 CIGS-Dünnschicht-Modul in Glas/Glas-Bauweise mit Aluminiumrahmen

Das Brandverhalten eines CIGS-Moduls wurde in dachparalleler Anordnung untersucht und ist in Abb. 5.32 wiedergegeben.



Abb. 5.32: Drahtkorbtest eines CIGS-Dünnschicht-Moduls in dachparalleler Anordnung (Schrägdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 (links)

Abb. 5.33: Schadensbild nach dem Drahtkorbtest eines CIGS-Dünnschicht-Moduls in dachparalleler Anordnung (Schrägdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1



Bei diesem Test zeigte sich nach ca. 4 Minuten ein Bruch des Deckglases und Bruchstellen im Rückseitenglas, es erfolgte jedoch auch hier kein Durchtritt des Feuers nach unten. Das Schadensbild ist in Abbildung 5.33 zu erkennen.

Die entsprechenden Temperaturmessungen sind in Abb. 5.34 aufgetragen. Ein Wandern der Flammenfront ist oberhalb des Moduls erkennbar, die Temperaturen schwanken sehr in Abhängigkeit der Flammenfront. An der Modulunterseite sind die Temperaturen unter 80°C und unter der Dachunterseite ist Raumtemperatur.



Abb. 5.34: Temperaturverlauf während des Drahtkorbtests eines CIGS-Dünnschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Des Weiteren wurden die CIGS-Dünnschicht-Module auch entsprechend einer typischen Flachdachmontage aufgeständert und mit einem Brandsatz von unten getestet (Abb. 5.35).



Abb. 5.35: Drahtkorbtest eines CIGS-Dünnschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Wie in Abb. 5.36 zu sehen ist, zeigten sich größere Brandschäden als bei einer dachparalleler Schrägdachmontage. Es konnte kein Feuerdurchtritt o.ä. beobachtet werden.



Abb. 5.36: Schadensbilder eines CIGS-Moduls nach einem Drahtkorbtest in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Betrachtet man die Temperaturmessungen (Abb. 5.37) im Vergleich zur Schrägdachmontage, so fällt auf, dass die Temperaturen auf der Seite der Flamme höhere Maximalwerte erreichen. Sie liegen um 200°C höher. Dies liegt vor allem an der stärkeren Beanspruchung durch die nach oben brennende Flamme. Beim Schrägdach, mit oben aufliegendem Brandsatz, verteilt sich die größte Hitzeeinwirkung oberhalb des Moduls, wohingegen bei der Flachdachaufständerung der Feuer-Impact an die Modulunterseite gelangt.

Die Temperaturen an der vom Feuer abgewandten Seite des Moduls erreichen bei der Flachdachmontage auch signifikant höhere Werte als bei Schrägdachmontage, ca. 250°C statt 90°C.



Abb. 5.37: Temperaturverlauf Drahtkorbtest eines CIGS-Dünnschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

# 5.3.1.3.6 CdTe-Dünnschicht-Modul in Glas/Glas-Bauweise

Des weiteren wurden CdTe-Module den systematischen Brandtests unterzogen. Zunächst erfolgte ein Brandtest in dachparaller Anordnung (Schrägdach), siehe Abb. 5.38. Im Brandverlauf kommt es auch hier zu keinen Flammendurchbruch.



Abb. 5.38: Drahtkorbtest eines CdTe-Dünnschicht-Moduls in dachparalleler Anordnung (Schrägdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Die Schadensbilder in Abb. 5.39 zeigen Glasbruch in beiden Scheiben (Front- und Rückseite), jedoch keinen Brand, Durchbrand oder Brandweiterleitung. Eine weiße Verfärbung zwischen den Scheiben deutet auf eine thermische Zersetzung der Laminatschicht hin.



Abb. 5.39: Schadensbilder nach einem Drahtkorbtest eines CdTe-Dünnschicht-Moduls in dachparalleler Anordnung (Schrägdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Der Temperaturverlauf während des Brandversuches entspricht in etwa dem des CIGS-Moduls bei gleicher Montage (Abb. 5.40). Auch hier sind starke Temperaturschwankungen an der Moduloberfläche sichtbar, unterhalb der Dachunterseite sind keine nennenswerten Temperaturen zu registrieren.



Abb. 5.40: Temperaturverlauf während eines Drahtkorbtests eines CdTe-Dünnschicht-Moduls in dachparalleler Anordnung (Schrägdach) nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Des weiteren wurde ein CdTe-Modul auf einem Flachdach aufgeständert und in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 von der Unterseite aus getestet (Abb. 5.41). Auch hier kommt es zu keinem Brand oder Durchbrand des Moduls.



Abb. 5.41: Drahtkorbtest eines CdTe-Dünnschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

Die entsprechenden Schadensbilder sind in Abb. 5.42 gezeigt. Der Ruß deutet darauf hin, dass die Pyrolyse der Laminatschicht eingesetzt hat und brennbares Gas aus den Bruchstellen austrat. Dies wurde auch bei den Rauchkammer-Versuchen beobachtet.



Abb. 5.42: Schadensbilder nach einem Drahtkorbtest eines CdTe-Dünnschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Die Temperaturen von etwa 600°C werden unterhalb des Moduls erreicht, oberhalb sind diese unter 200°C, der Temperaturverlauf ist in Abb. 5.43 wiedergegeben.



Abb. 5.43: Temperaturverlauf während eines Drahtkorbtests eines CdTe-Dünnschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

#### 5.3.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tab. 5.8 sind die beobachteten Schadensparameter der verschiedenen Drahtkorbversuche nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 zusammenfassend dargestellt.

Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Schadensbilder von

- der Bauart des Moduls (Glas/Glas oder Glas/Folie) und
- der Montageart (Flachdachaufständerung oder Schrägdachmontage).

Am meisten wurden die Module beschädigt, wenn der Brandsatz unter dem Modul angeordnet war.

Die Glas/Glas Bauweise hielt allen Drahtkorb-Brandtests stand, ebenso die Einscheiben-Sicherheitsverglasung des Si-Dickschicht-Moduls. Lediglich das Si-Dünnschicht-Modul mit Rahmen und nur einer Scheibe wurde durch die Flamme soweit zerstört, dass ein Glasbruch und Durchbrand erfolgte.

Nachdem die verschiedenen Module den Brandtests unterzogen worden waren, wurde weiterhin der Frage nachgegangen, inwiefern die teilweise zerstörten Module im Sonnenlicht noch elektrische Leistung liefern können. Zu diesem Zweck wurden die Module in die Sonne gelegt und die Leerlaufspannung sowie der Kurzschlussstrom gemessen. Die Stromhöhe im Vergleich zum Nennstrom war in etwa proportional zum unzerstörten Modulbereich.

Modul, Montage	Brand- satz	Schaden oben in cm	Schaden unten in cm	Durch- brand	Ab- tropfen	Zeit bis zum Verlöschen	Elektrische Leistung nach dem Test
Monokristallin Si-Dickschicht mit Rahmen, Schrägdach dachparallel	oben Kante	25 x 28 -	27 x 30 20 x 11	-	-	4 min 4 min	95%
Monokristallin Si-Dickschicht mit Rahmen, Flachdach aufgeständert	unten	21 x 38	23 x 39	-	-	5 min	95%
Si- Dünnschicht mit Rahmen, Flachdach aufgeständert	unten	37 x 86	37 x 86	nach 4 min	ja	7 min	-
Si-Folie, Flachdach	oben	42 cm (Kreis)	42 cm (Kreis)	(nach 4 min)	-	14 min	12%
Si- Dünnschicht ohne Rahmen, Flachdach aufgeständert	unten	-	-		-	7 min	76%
CIGS- Dünnschicht mit Rahmen, Schrägdach dachparallel	oben	19 x 18	23 x 21	-	-	5 min	29%
CIGS- Dünnschicht mit Rahmen, Flachdach aufgeständert	unten	22 x 20	24 x 23	-	-	5 min	-
CdTe- Dünnschicht ohne Rahmen, Schrägdach dachparallel	oben	17 x 14	9 x 14	-	-	4 min	21%
CdTe- Dünnschicht ohne Rahmen, Flachdach aufgeständert	unten	-	31 x 37	-	-	5 min	29%

Tab. 5.8: Schadensdimensionen der PV-Module nach den Brandtests nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1

# 5.3.2 Burning Brand Test nach IEC 61730-2

Im Teil 2 der IEC 61730 geht es um die Sicherheitsprüfungen von PV-Modulen, dabei werden drei verschiedene Anwendungsklassen sowie die daraus resultierende Schutzklasse festgelegt. Für die brandtechnologischen Untersuchungen von PV-Modulen werden der Burning Brand und der Spread of Flame Test im Dachbereich herangezogen. Dabei werden sowohl die dachintegrierten als auch die aufgeständerten Module nur von der Oberfläche aus beflammt. PV-Module werden in verschiedene Klassifizierungen A, B und C unterteilt. Die Klasse C stellt die Mindestanforderung an PV-Module dar. Beim Burning Brand Test wird das Brandverhalten der PV-Module mit unterschiedlichen Brandsätzen in Abhängigkeit der zu prüfenden Klasse getestet. Die Masse der Holzkrippen unterscheidet sich von 10 g, 500 g bis 2 kg (siehe Abb. 5.45).



Abb. 5.44: Holzkrippen für Klassifizierung A, B und C nach UL 790/IEC 61730-2<sup>10</sup>

5.3.2.1 Vergleich der Brandsätze

Um Brandbeanspruchungsniveau in den relevanten Normen vergleichen zu können, werden im Folgenden die verwendeten Brandsätze und Rahmenparameter zusammenfassend gegenübergestellt (Tab. 5.9).

Norm	Prüfverfahren	Brandsatz	Brandsatz Dimensionen in cm	Wind (m/s)	Wärme- strahlung in kW/m <sup>2</sup>
DIN 4102	Teil 1	Propangas	Flamme: 2 cm		
CEN TS 1187	PF 1 PF 2 PF 3 PF 4	600 g Holzwolle Holzkrippe (8 Stäbe) Holzfaser-Krippe, Heptan wie PF 3, Vortest mit Erdgas	30 x 30 x 20 2 x 10 x 10 5,5 x 5,5 x 3,2 wie PF 3	- 2 2 2	- - 12,5 12,5
IEC 61730-2, UL 790	Burning brand Test Typ A Burning brand Test Typ B Burning brand Test Typ C Spread of flame Test	2 kg Holzkrippe 500 g Holzkrippe 10 g Holzkrippe 380 kW Erdgas	30 x 30 x 5,6 15 x 15 x 5,6 4,5 x 4,5 x 3,8 -	5,3 5,3 5,3 5,3	-

Tab. 5.9: Verwendete Prüfmethoden und die wichtigsten dazugehörigen Brandbedingungen

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> http://www.analytics.currenta.com/tl\_files/currenta/medien/analytik/brandtechnologie/pdf

#### 5.3.2.2 Brandtests mit Holzkrippe Klassifikation A

Es wurden Brandversuche mit höherem Beanspruchungsniveau durchgeführt. Herangezogen wurden die auf Basis des UL 790 vorgeschlagenen Holzkrippen-Brandversuche, der sogenannte Burning Brand Test, welcher auch in der IEC 61730-2 enthalten ist. Zunächst wurden die Brandversuche mit der Holzkrippe nach IEC 61730-2 der A-Klassifizierung durchgeführt. Als Brandsatz kommt hier eine dreilagige, im Grundriss quadratische Holzkrippe mit einer Kantenlänge von jeweils 30 cm zum Einsatz. Sie wiegt mit 2 kg mehr als dreimal so viel wie die Holzwolle in den Tests nach CEN TS 1187. Die Beanspruchung wird durch ein starkes Anfachen der Krippe mit Wind signifikant erhöht.

# 5.3.2.2.1 Si-Dünnschicht-Module

Der Versuchsaufbau ist in Anlehnung an IEC 61730-2, bzw. UL 790. Der Windkanal ist etwas kleiner, die Windgeschwindigkeiten von 5,3 m/s werden aber nach Norm eingehalten. Die Kalibrierung erfolgte mit einem Heißdraht-Anemometer.

In Abb. 5.45 ist der entsprechende Brandtest mit Windzufuhr eines Si-Dünnschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung auf einem Test-Flachdach wiedergegeben. Das Modul bog sich nach wenigen Sekunden nach unten und brach nach etwa 2 min, die Glasscheiben sowie die Laminatschicht konnten dem Feuer nicht standhalten. Der verursachte Schaden ist in der Abb. 5.46 gezeigt. Die brennende Rückseite sowie das Abfallen von Teilen eines Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie während des Burning Brand Tests ist in

Abb. 5.47 zu erkennen.



Abb. 5.45: Burning Brand Test eines Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A



Abb. 5.46: Schadensbild eines Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas nach einem Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A



Abb. 5.47: Brennende Rückseite und Abfallen von Teilen während des Burning Brand Tests eines Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A

Die Temperaturmessungen eines Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas sind in Abb. 5.48 aufgetragen. Die Temperatursensoren verrutschten bei der Verformung von der Oberfläche und lösten sich beim Bruch des Moduls. Dies betrifft hier v.a. den Sensor an der Oberseite der Krippe, welcher die Temperatur an der Moduloberseite erfassen sollte. Dieser löste sich vom Modul und war der Flamme ausgesetzt.



Abb. 5.48: Temperaturmessung an einem Si-Dünnschicht-Modul der Bauweise Glas/Glas während eines Burning Brand Tests in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A

#### 5.3.2.2.2 Si-Dickschicht-Module

Des weiteren wurde ein monokristallines Si-Dickschicht-Modul dem gleichen Test unterzogen. Im Unterschied zur Glas/Glas-Bauweise des Dünnschicht-Moduls bestand das Dickschicht-Modul nur aus einer Einscheiben-Verglasung aus gehärtetem Glas mit Rückseitenfolie. Der Brandversuch ist in der Abb. 5.49 dokumentiert.



Abb. 5.49: Burning Brand Test eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A

Auch hier war nach nur 2 min das Bersten des Sicherheitsglases zu vernehmen, nach einer weiteren Minute brannte die Folie auf der Rückseite und das Feuer zerstörte einen Teil des Moduls vollständig. Der Schaden ist in der Abb. 5.50 dargestellt. Man erkennt deutlich die feinkörnige Bruchstruktur des Sicherheitsglases.



Abb. 5.50: Schadensbilder eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls nach einem Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Temperaturverlauf Abb. 5.51 fallen wieder Im in der die abrupten Temperaturänderungen nach ca. 160 s auf. Sie ergaben sich durch das Abfallen der Sensoren, welche auf der Schadstelle montiert waren, zusammen mit einem Teil des Solarglases. Durch die Schadstelle erfolgte in diesem Moment auch eine strömungstechnische Verbindung zwischen Vorder- und Rückseite des Moduls. Dies beeinflusste auch stark die Messung an der Rückseite. Bis zum Abfallen sind die Temperaturen unterhalb des Moduls um die 450°C.



Abb. 5.51: Temperaturverlauf am monokristallinen Si-Dickschicht-Modul nach einem Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A

#### 5.3.2.2.3 Vergleich der Ergebnisse

Im Vergleich zu den Tests mit dem Drahtkorb resultierten die Versuche mit der 2 kg Holzkrippe in Anlehnung an die IEC 61730-2/Typ A immer in der Zerstörung der Module mit Durchbrand und Glasbruch. Dies trat bei den Drahtkorbversuchen nur bei Kunstsoff-Folie Si-Dünnschicht-Modul der und einem mit Einscheiben-Normalverglasung auf. Die gewonnenen Resultate sind in Tab. 5.10 zusammengefasst:

Tab. 5.10: Vergleich der Brandereignisse und Schadensdimensionen von Si-Modulen nach Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A

Modul	Schaden Vorderseite	Schaden Rückseite	Durch- brand	Ab- tropfen	Zeit bis zum Verlöschen	Elektrische Leistung nach Test
a-Si-Dünnschicht ohne Rahmen, Glas/Glas	31 x 28 cm	31 x 28	nach 2 min	ja	8 min	0%
Monokristallines Si-Dickschicht mit Rahmen, Glas/Folie	46 x 65 cm	51 x 72	nach 2 min	ja	10 min	0%

#### 5.3.2.3 Brandtests mit Holzkrippe Klassifikation B

Die Ergebnisse des Tests mit der 2 kg Holzkrippe (Typ A) zeigte eine vollständige Zerstörung der Module. Im Folgenden wird eine Testreihe mit der nächst kleinerer Holzkrippe für die Klassifizierung Typ B vorgenommen. Hierbei besitzt die Holzkrippe ein geringeres Gewicht von 500 g. Es wurden Brandversuche mit doppelt verglasten Modulen sowie mit Einscheiben-Sicherheitsglas-Modulen vorgenommen.

# 5.3.2.3.1 Si-Dünnschicht-Module

Das Si-Dünnschicht-Modul repräsentiert die Glas/Glas Bauweise und wurde analog dem vorangegangenen Versuch auf dem Testdach montiert. Als Brandsatz nach der B-Klassifikation kam eine Holzkrippe mit einem Gewicht von 500 g mit den Maßen 15 cm x 15 cm x 5,6 cm zum Einsatz. Der entsprechende Brandversuch ist in Abb. 5.53 gezeigt.



Abb. 5.52: Burning Brand Test eines a-Si-Dünnschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B

Nach etwa einer Minute brachen die beiden Glasscheiben des Moduls. Durch die Laminatschicht wurden die Scherben allerdings so gehalten, dass es zu keinem Durchbrand kam. Die Schadensbilder nach dem Versuch sind in Abb. 5.53 wiedergegeben.



Abb. 5.53: Schadensbilder eines a-Si-Dünnschicht-Moduls nach einem Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

# 5.3.2.3.2 Si-Dickschicht-Module

Weiterhin wurde ein monokristallines Si-Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie dem gleichen Test unterzogen. Die Versuchsdurchführung ist in der Abb. 5.54 dokumentiert.



Abb. 5.54: Burning Brand Test eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B (links: Vorderseite, rechts: Durchbrand auf Rückseite)

Nach etwa einer Minute war das Bersten des Sicherheitsglases zu vernehmen, nach einer weiteren Minute brannte die Folie auf der Rückseite (Abb. 5.54: Burning Brand Test eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B (links: Vorderseite, rechts: Durchbrand auf Rückseite)). Trotz des Berstens blieben die Glasscherben in ihrer Position, es zeigte sich nach dem Test, im Gegensatz zum Test mit dem 2 kg Brandsatz, kein Loch im Modul. Auf der Rückseite brannte die Folie. Die Schadensbilder sind in der Abb. 5.55 wiedergegeben.



Abb. 5.55: Schadensbilder eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls nach einem Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

#### 5.3.2.3.3 Vergleich der Ergebnisse

Im Vergleich zu den Tests mit der 2 kg Holzkrippe (Typ A) führte der Test mit der kleineren Holzkrippe nach Typ B nur bei den Modulen der Bauweise Glas/Folie zum Durchbrand. Bei beiden Modulbauarten war das Glas gebrochen, bei der Glas/Glas
Bauweise verhinderte aber die innere Laminatschicht das Durchbrennen auf die Rückseite. Die gewonnenen Resultate sind in Tab. 5.11 zusammengefasst.

Modul	Schaden oben in cm	Schaden unten in cm	Durch- brand	Ab- tropfen	Zeit bis zum Verlöschen	Elektrische Leistung nach Test
a-Si- Dünnschicht ohne Rahmen, Glas/Glas	21 x 14	16 x 9	-	-	7 min	0%
Monokristallin Si-Dickschicht mit Rahmen, Glas/Folie	29 x 21	27 x 31	nach ca. 2 min	ja	12 min	0%

Tab. 5.11: Vergleich der untersuchten Si-Module nach Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B

5.3.2.4 Brandtests mit Holzkrippe Klassifikation C

Die Klasse C nach IEC 61730-2 enthält die Mindestanforderungen für PV-Module im Dachbereich und beinhaltet eine Brandbeanspruchung einer Holzkrippe von (3,8 x 3,8 x 1,9 cm) und zusätzlichem Wind (5,3 m/s). Der kleinste der drei Brandsätze nach der IEC 61730-2/Typ C erbrachte keinerlei Beschädigung an den Modulen, sowohl bei den doppelt verglasten als auch bei den Einscheiben-Sicherheitsglas-Modulen, wie am Beispiel eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls in Abb. 5.56 zu erkennen ist.



Abb. 5.56: Burning Brand Test eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ C

#### 5.3.2.5 Brandversuche mit chinesischen Modulen

Ausgewählte Brandversuche mit chinesischen Modulen sollten vermeintliche Unterschiede im Brandverhalten aufzeigen. Dazu wurden zwei kommerziell erhältlich meist verkaufte "teure" Module von Hersteller 1 (monokristallin) und zwei sogenannte

"preiswerte Produkte" von Hersteller 2 (polykristallin) aus China untersucht. Die Versuchsreihe erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit und die Ergebnisse beziehen sich nur auf die untersuchten Module. Es handelt sich bei den Modulen um Si-Dickschicht-Module in der Bauweise Glas/Folie.

Die Brandversuche wurden in Anlehnung an den Burning Brand Test/Typ B mit einer Brandbeanspruchung der mittleren Holzkrippe (500 g) nach IEC 61730 und zusätzlichem Wind von 5,3 m/s durchgeführt. Dies entspricht der Klassifikation B. Aufgezeichnet wurden die Temperaturen mittig oberhalb und unterhalb der Holzkrippe sowie mittig über der Krippe. Die gemessenen Temperaturen der 4 Versuche sind in Abb. 5.59 zu erkennen. Die maximalen Temperaturen der "preiswerten" Module erreichen an der Oberfläche etwa 800°C. Nach etwa 2 min entsteht eine starke Rauchentwicklung und nach 4 min brennt die Folie auf der Rückseite, zu einem Flammendurchbruch kommt es nach etwa 8 min. Das entsprechende Brandverhalten der "teuren" Module ist ähnlich.



Abb. 5.57: Temperaturverlauf an Ober- und Unterseite der Module "preiswerter" (oben) und "teurer" (unten) Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Folie aus China während der Burning Brand Tests in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B

Auch bei den teuren Modulen entstehen in den ersten 4 Minuten während des Brandversuches etwa 600°C an der Oberseite. Maximale Temperaturen an der Vorderseite von etwa 800°C und etwas geringere Temperaturen auf der Rückseite von etwa 600°C zeigen insgesamt ein sehr ähnliches Temperaturverhalten beider Modulsorten (Abb. 5.59).



Abb. 5.58: Temperaturverlauf an Ober- und Unterseite der "preiswerten" und "teuren" Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Folie aus China während der Burning Brand Tests in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B

Des weiteren erfolgten Videoaufzeichnungen rechts und links hinter dem Modul (Rückseite) sowie zweimal von vorne (Vorderseite). Zum Vergleich wurden die Beobachtungszeitpunkte zum Entzünden, zur Rauchentwicklung, zum brennenden Abtropfen sowie der Feuerdurchbruch registriert. Die Reproduzierbarkeit zwischen jeweils zwei gleichen Modulen ist relativ gut. Das Brandverhalten der untersuchten chinesischen Module ist untereinander ähnlich, die "teuren" Module schneiden dabei sogar etwas schlechter ab (Tab. 5.12). In Abb. 5.59 kann man das brennende Abtropfen nach etwa 4 min sowohl bei den "preiswerten" als auch bei den "teuren" Modulen sehr gut erkennen.

Tab. 5.12: Brandereignisse und Schadensdimensionen chinesischer Module nach Burning Brand Test in
aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ B

Beobachtung	"teure" Module	"preiswerte" Module
Rauchentwicklung	2 min	3-4 min
Entzünden der Folien-Rückseite	3 min	4-5 min
Brennendes Abtropfen	stark	mittel stark
Flammendurchbruch	6 und 7 min	8 min
Weiterbrennen nach	wenige Sekunden	nein
Versuchsende		
Schadensflächen	17 x 20 cm	16 x 18 cm
des Durchbruchs	16 x 24 cm	20 x 24 cm
Gesamte verbrannte Fläche	24 x 27 cm	20 x 27 cm
	21 x 30 cm	24 x 37 cm



Abb. 5.59: Brennendes Abtropfen nach etwa 4 min während der Brandversuche nach IEC 61730-2 mit einer Holzkrippe 500 g (links: "teures" chinesisches PV-Modul, rechts: "preiswertes" chinesisches PV-Modul)

Die entsprechenden Schadensbilder der Vorder- und von der Rückseite sind in Abb. 5.60 wiedergegeben.



Abb. 5.60: Schadensbilder nach den Brandversuchen nach IEC 61730-2 mit einer Holzkrippe 500 g (links: Vorderseite und Rückseite des "teuren" chinesischen PV-Moduls, rechts: Vorderseite und Rückseite des "preiswertes" chinesischen PV-Moduls)

Bei zwei der durchgeführten Brandversuche wurde Dachpappe unter dem Modul unterlegt, um festzustellen, ob es zu einer Brandweiterleitung oder Entzündung kommt. In beiden Fällen kam es zu keiner Entzündung. Die brennenden Teile erloschen von alleine.

Nach den Brandversuchen konnte an den verbrannten PV-Modulen noch Strom gemessen werden.

Vergleicht man das Brandverhalten mit den in Kapitel unter den gleichen Bedingungen getesteten Si-Dickschicht-Modulen in gleicher Bauweise Glas/Folie, so erkennt man deutliche Unterschiede. Während die untersuchten chinesischen Module einem Flammendurchbruch erst nach 6-8 min aufweisen, zeigte das unter Kapitel 5.3.2.3 untersuchte Si-Dickschicht-Modul bereits einen Flammendurchtritt in den Glasspalten nach 2 min. Allerdings ist die entstandene Schadensfläche bei den untersuchten chinesischen Modularten deutlich größer und das brennende Abtropfen und die Rauchentwicklung im Vergleich stärker.

5.3.2.6 Vergleich der Burning Brand Tests von PV-Modulen nach IEC 61730-2

Ein Überblick über durchgeführte Burning Brandtests von PV-Modulen in Abhängigkeit des Beanspruchungsniveaus bzw. der Masse der Holzkrippe ist in Tab. 5.13 zusammengefasst.

	Burning Brand Test						
Beobachtung	Klasse A (2 kg Krippe)		Klasse B (500 g Krippe)		Klasse C (10 g Krippe)		
	Si-Dick mono	Si-Dünn	Si-Dick* mono	Si-Dünn	Si-Dick mono	Si-Dünn	
	Glas-Folie	Glas-Glas	Glas-Folie	Glas-Glas	Glas-Folie	Glas-Glas	
Abfallen von Teile	ja	ja	ja	nein	nein	nein	
Abtropfen	ja	ja	ja	nein	nein	nein	
Glasbruch	2 min	2 min	1 min	1 min	nein	nein	
Durchbrand (Versuchsende)	2 min	2 min	2 min	nein	nein	nein	
Feuer ausgelöscht	10 min	8 min	12 min	7 min	kein Weiterbren nen	keine weiterbren nen	
Schaden vorne (cm * cm)	46 x 65	31 x 28	29 x 21	21 x 14	Nein	nein	
Schaden hinten (cm * cm)	51 x 72	31 x 28	27 x 31	16 x 9	nein	nein	
Elektrische Leistung nach dem Test	0%	0%	<10%	<10%	100%	100%	

Tab. 5.13: Überblick über die Brandereignisse und Schadensdimensionen nach Burning Brand Tests von verschiedenen PV-Modulen

\*Chinesische Modularten wurden hier nicht betrachtet, siehe dazu Tabelle 5.12

## 6 Entwicklung eines neuen Testverfahrens

Nach dem die systematischen Untersuchungen mit den zur Verfügung stehenden Brandtests der verschiedenen PV-Module mit ihren unterschiedlichsten Aufbauarten durchgeführt wurden. konnte festgestellt werden. dass die Tests im Beanspruchungsniveau entweder zu niedrig oder zu hoch lagen. Hinzu kam, dass die Handhabung mit den einzelnen Brandsätzen kompliziert und Anforderungen aus den einzelnen Normen unübersichtlich waren. Deshalb wurde nach einer einfachen Möglichkeit gesucht, mit der man das Beanspruchungssniveau der PV-Module direkt anpassen kann. Die Erarbeitung von Grundlagen für die Festlegung von Anforderungen an den Brandschutz von PV-Module als Bauprodukt war Ziel dieser Untersuchungen. Das entwickelte Testverfahren besteht aus einem Gasbrenner, mit dem man unterschiedliche Wärmestrahlungsstromdichten und damit unterschiedliche Beanspruchungsniveaus einstellen kann. In Vorversuchen wurden Kriterien, wie Abstand und Neigungswinkel variiert und für unsere Anforderungen optimiert. Die Wärmestrahlung des Brenners wurde vor den Versuchen mittels der verbrauchten Masse an Propan während eines Brennvorgangs von 5 min berechnet und kalibriert.

## 6.1 Versuchsaufbau

Brenner: Propangasbrenner mit Druckminderer

Der Brenner selbst hat einen Winkel von 150°, und das Gestell von 30°. Daraus errechnet sich ein Eintrittswinkel von 60° auf die Oberfläche des Solarmoduls.

Es wurden 2 Konfigurationen getestet:

- Propan-Gasflamme auf die vordere Seite des Moduls, was einen Brand von außen simuliert, und
- Propan-Gasflamme auf die hintere Seite des Moduls, was einem Hausbrand von innen simuliert.

#### Von vorne:

Die Flamme wurde von vorne auf die Moduloberfläche mit einem Winkel von 60° aufgebracht. Es wurde eine Distanz zwischen dem Brenner (wenn dieser aus ist) und der Moduloberfläche von 10 cm gewählt. Das Flammenzentrum trifft das Panel in der Mitte der Modulbreite, in einer Höhe von 25 cm von der unteren Kante des Moduls (Abb. 6.1).



Abb. 6.1: Konfiguration des Propan-Gasbrenners für Brandversuche von vorne (25 cm über der unteren Kante und in der Breite zentriert, die Distanz Brenner-Modul ist 10 cm)

#### Von hinten:

Die Flamme wurde von der Unterseite des Moduls mit einem Winkel von 60° auf die Moduloberfläche aufgebracht (Abb. 6.2). Die Distanz zwischen Brenner im Ausgangszustand und Moduloberfläche betrug ebenfalls 10 cm. Das Flammenzentrum trifft das Panel mittig bezüglich der Breite und in 25 cm Höhe ausgehend von der unteren Modulkante.



Abb. 6.2: Konfiguration des Propan-Gasbrenners für Brandversuche von hinten (25 cm über der unteren Kante und in der Breite zentriert, die Distanz Brenner-Modul ist 10 cm)

#### Temperaturmessungen:

Die Temperaturen an der Oberfläche den Modulen wurden auf der Vorderseite und auf der Rückseite an 6 Punkten gemessen (Abb. 6.3). Thermoelemente wurden am Flammeneintritt eingebracht, 25 cm von der untere Kante (Oberseite 1, Unterseite 4), 50 cm über der unteren Kante (Oberseite 2 und Unterseite 5) und 75 bzw. 70 cm von der unteren Kante (Oberseite 3 und Unterseite 6) entfernt.



Abb. 6.3: Positionen der Thermoelemente zur Wiedergabe des Temperaturverlaufs während der Brandversuche mit dem Gasbrenner (25 cm von der untere Kante (Oberseite 1, Unterseite 4), 50 cm über der unteren Kante (Oberseite 2 und Unterseite 5) und 75 bzw. 70 cm von der unteren Kante (Oberseite 3 und Unterseite 6)

#### Übersicht Gasbrenner-Brandversuche:

Zum einen wurden Brandversuche mit Brandbeaufschlagung durch den Gasbrenner von außen (simuliert Flugfeuer von außen) und zum anderen von innen (simuliert Gebäudebrand von innen) experimentell umgesetzt. Variiert wurden dabei die Modularten und die Wärmestrahlung des Brenners. Eine Übersicht ist in Tab. 6.1 zu finden.

Tab. 6.1: Übersicht über die durchgefü	ührten Gasbrenner-Brandversuche
--	---------------------------------

Konfiguration Brenner	Modultyp	Wärmestrahlung	Bauweise
Vorderseite (von außen)	Monokristallines Si-Dickschicht	16 kW 30 kW 46 kW	Glas/Folie
	Polykristallines Si- Dickschicht	30 kW 30 kW+Dachpappe 46 kW	Glas/Folie
	a-Si-Dünnschicht	16 kW 30 kW 46 kW	Glas/Glas
Rückseite (von innen)	Polykristallines Si- Dickschicht	30 kW	Glas/Folie
	a-Si-Dünnschicht	30 kW	Glas/Glas

#### Verlauf der Tests:

Zunächst wurde der Gasbrenner 5 min brennen gelassen, um eine stabile Flamme zu bekommen. Danach wurde die Flamme an der Moduloberfläche aufgebracht und die Zeitmessung gestartet. Die Flamme bleibt an der Oberfläche bis zum Durchbrand des Moduls. Als Durchbrand des Moduls wird hier der Zeitpunkt definiert, wenn die Flamme das Modul erstmalig durchbricht. In der Regel verbrennt erst die Kunststofffolie und dann zerbricht das Glas, es kommt zum Durchbrand. Nach diesem Zeitpunkt wird der Gasbrenner ausgestellt und es wird die Zeit gemessen, bis das Modul selbstständig verlischt. Kommt es zu keinen Durchbrand in den ersten Minuten, ist eine maximale Branddauer von 15 Minuten für die Gasbrenner-Brandversuche vorgesehen.

## 6.2 Kalibrierung des Gasbrenners

Um einen Überblick zu bekommen, wie sich die Brandsätze vom Beanspruchungsniveau unterscheiden, wurde die Leistung der entsprechenden Brandsätze: Holzwolle-Drahtkorb nach CEN TS 1187 und Holzkrippen nach UL 790/IEC 61730-2 berechnet und miteinander verglichen. Für die Abschätzung wurde ein Heizwert für Holz von 4,5 kWh/kg herangezogen. Der Vergleich ist in Tab. 6.2 zusammengefasst.

	Standards			
	<b>CEN TS 1187</b>	UL790 A	UL 790 B	UL 790 C
Brandsatzart	Drahtkorb mit	Holzkrippe	Holzkrippe	Holzkrippe
	Holzwolle			
Masse des Brandsatzes	600 g	2000 g	500 g	10 g
Brenndauer	4 min	7 min	6 min	10 min
Leistung	41 kW	77 kW	23 kW	0,32 kW

Tab. 6.2: Vergleich der Brandsätze der verschiedenen Standards

zeigten, Die Brandversuche der PV-Module dass keine Schäden nach Beanspruchung nach UL 790/Klasse С (entspricht etwa 0,32 kW. Mindestanforderung nach IEC 61730-2) sowie nach Prüfung auf Normalentflammbarkeit nach DIN 4102-1 bzw. ISO 11925-2 entstanden sind.

Im Fall der Brandprüfungen nach CEN TS 1187/Prüfverfahren 1 (entspricht etwa 41 kW) kommt es bei keinem Modul zu ernsthaften Schäden oder zu einem Flammendurchbruch, nur bei einem untersuchten Modul kommt es zu einem Flammendurchgang, wenn der Drahtkorb von unten das Modul beflammt.

Bei den Brandtests nach UL 790/Klasse A (entspricht etwa 77 kW) versagten alle untersuchten Module.

Nach einer Beanspruchung entsprechend der Klassifikation B (entspricht etwa 23 kW) kam es zum Durchbruch bei allen untersuchten Glas/Folien-Modulen.

Größere Schadensdimensionen wurden auch nach Prüfungen in der SBI-Apparatur nach DIN EN 13823 (entspricht 30 kW) erreicht. Nach einer Beanspruchung von 130 kW kam es sogar zum Abfallen des Moduls von der Wand. Ab einer Wärmestrahlung von etwa 23 kW kann es zu Schäden an den PV-Modulen kommen und nach einer Beanspruchung von 77 kW werden alle Module zerstört. Eine realistische und sinnvolle Beanspruchungs-Wärmestrahlung liegt deshalb zwischen 15 bis 50 kW. Dem entsprechend wurden die Brennerleistungen der Gasbrenner-Versuche den Brandsätzen der obengenannten Normen angepasst. Dabei wurden Brennerleistungen von 16 kW, 30 kW und 46 kW ausgewählt. Zum Vergleich bei einem Wohnzimmerbrand liegt die freigesetzte Wärme in der Vollbrandphase bei etwa 4000 kW.

Die Wärmestrahlung des Brenners wurde mittels verbrauchter Masse an Propan während eines Brennvorgangs von 5 min kalibriert. Dabei wurde ein Heizwert von Propan von 46,354 MJ/kg angenommen. Der Brenner wurde 5 min im Dauerbetrieb genutzt und die Gasflasche vorher und nachher gewogen. Bei einem Verbrauch von z.B. 0,3 kg Propan in 5 min errechnet sich die Leistung zu: 46,354\*0,3\*1000/5/60= 46,4 kW.

## 6.3 Wärmestrahlungsstromdichten

Heat Flux Messungen:

Die Wärmestrahlungsstromdichten wurden mit Hilfe eines Heat-Flux-Meters auf der Oberfläche einer Silikatplatte an verschiedenen Punkten gemessen (Abb. 6.4). Ziel war es zu ermitteln, welche Wärmestrahlung, bei einer festen Gasbrennerleistung, wirklich auf der Moduloberfläche ankommt. Dazu wurden drei verschiedenen Wärmestrahlungen (16 kW, 30 kW und 46 kW) am Gasbrenner eingestellt und die entsprechenden Bestrahlungsstromdichten auf der Oberfläche einer Isolierplatte gemessen (Tab. 6.3).



Abb. 6.4: Versuchsaufbau zur Messung der Strahlungsstromdichten mit einem Heat-Flux-Meter (links: vordere Seite, Mitte: Seitenansicht, rechts: Heat flux meter transducer)

Die Distanz zwischen Brenner und Bestrahlungsstärke-Messgerät, dem Heat-Flux-Meter war 10 cm. Es wurde folgendes Gerät dazu genutzt: Thermogage Circular Foil Heat Flux Transducers, Serial Nr.: 9829, Typ: TG1000-1, dieser war wassergekühlt. Die Messunsicherheit des Heat-Flux-Meters betrug 5 kW/m<sup>2</sup>. Das Heat-Flux-Meter wurde in eine Isolierplatte des Typs Vermiculite eingebracht, nachdem zuvor entsprechende Löcher in die Platte gebohrt wurden. Auch bei diesen Messungen hatte der Gasbrenner Vorlaufzeiten von 2 bis 5 Minuten, bevor die eigentlichen Wärmestrahlungsstromdichte-Messungen begannen. Das Heat-Flux-Meter hat eine Antwortzeit von 2 Sekunden. Es wurden Messungen an verschiedenen Punkten, wie in Abb. 6.5 dargestellt, durchgeführt.



Abb. 6.5: Messpunkte auf einer Oberfläche einer Isolierplatte für die Bestimmung der Wärmestrahlungsstromdichte (links) bei einer Bestrahlungsstärke des Gasbrenners von 30 kW zur Extrapolation der Bestrahlungsstärke der Gasbrenner-Flamme auf einem PV-Modul (rechts)

Die mit dem Heat-Flux-Meter ermittelte Bestrahlungsstärke des Gasbrenners ist in Tab. 6.3 in Abhängigkeit der Brennerleistung zu erkennen.

	Brennerleistung		
	16 kW	30 kW	46 kW
Maximale Bestrahlungsstärke im Zentrum der Flamme	150 kW/m²	180 kW/m²	170 kW/m²

Tab. 6.3: Bestrahlungsstärke des Gasbrenners in Abhängigkeit der Brennerleistung

Das Flammenbild ist oval und erreicht eine Fläche bei 30 kW von etwa 40 x 60 cm. In Abhängigkeit der Brennerleistung ergaben sich im Zentrum der Flamme maximale Bestrahlungsstärken von 150-180 kW. Dabei nimmt die Bestrahlungsstärke in horizontaler Ausrichtung von Flammenzentrum innerhalb weniger cm sehr stark ab. In vertikaler Richtung ist die Bestrahlungsstärke dagegen noch relativ hoch. Zum Beispiel ist die Strahlungsstromdichte an der Oberfläche bei einer Brennerleistung von 30 kW im seitlichen Abstand von ca. 20 cm vom Flammenzentrum 5 kW/m<sup>2</sup> und in einer vertikalen Distanz von 25 cm vom Flammenzentrum nach oben immerhin noch 50 kW/m<sup>2</sup>. Die meisten der durchgeführten Brandversuche wurden mit einer Brennerleistung von 30 kW durchgeführt.

	Position vo	om Zentrum	Bestrahlungsstärke	
	horizontaler Abstand x (cm)	vertikaler Abstand y (cm)	in kW/m <sup>2</sup>	
	0	0	180	
	10	0	120	
X = 0 cm	15	0	40	
	20	0	3	
	-10	0	80	
	-20	0	5	
	0	10	160	
X = 0 cm	0	15	120	
	0	20	80	
	0	25	50	
	10	-10	110	
X = 10 cm	10	15	90	
	10	20	60	

Tab. 6.4: Bestrahlungsstärke des Gasbrenners bei 30 kW in Abhängigkeit der Position zum Zentrum der Flamme

## 6.4 Brandbeanspruchung der PV-Module durch Feuer von außen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gasbrenner-Versuche mit äußerer Brandbeanspruchung in Abhängigkeit Brennerleistung sowohl für Si-Dünnschicht- als auch Si-Dickschicht-Module vorgestellt und diskutiert. Während der Brandversuche werden die Temperaturen an verschiedenen Positionen auf und unter den Modulen und die Beobachtungen bezüglich des Brandverhaltens und der Flammenausbreitung und deren Schadensdimensionen ausgewertet.

#### 6.4.1 Einfluss der Wärmestrahlung auf Si-Dünnschicht-Module

In den folgenden Diagrammen (Abb. 6.6) sind die Temperaturverläufe an verschiedenen Positionen der Ober- und Unterseite der Module in Abhängigkeit der Brennerleistung des Gasbrenners wiedergegeben.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass bei einer Brennerleistung von 16 kW, die a-Si-Dünnschicht-Module innerhalb der Testzeit keinen Durchbrand zeigen. Es sind allerdings nach 55 Sekunden Risse zu erkennen, aus denen brennende Pyrolysegase ausgetreten sind. Ein weiterer Glasriss entlang der Modulbreite erschien nach 2 min. Maximale Temperaturen werden zwischen 800 und 1000°C erreicht. An diesen Stellen befanden sich die Thermoelemente direkt entlang der Flamme. Auf der Rückseite der Module werden Temperaturen unter 500°C erreicht, begründet ist dies durch die zwei schützenden Glasschichten. Im Laufe des Tests von 15 min ist es zu keinem Durchbrand gekommen. Erst nach Abkühlung des Moduls kommt es zu einem Glasbruch. Dabei handelt es sich um einen spannungsbedingten Glasbruch, welcher auch in den Schadensbildern wieder zu finden ist (Abb. 6.7).







Abb. 6.6: Temperaturverläufe an 6 verschiedenen Positionen der Vorder- und Rückseite von amorphen Si-Dünnschicht-Modulen der Bauweise Glas/Glas während der Gasbrennerversuche in Abhängigkeit der Brennerleistung (oben: 16 kW, Mitte: 30 kW, unten: 46 kW)





Abb. 6.7: Schadensbilder eines a-Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas nach einem Gasbrenner-Versuch mit äußerer Brandbeanspruchung von 16 kW (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Das Brandverhalten der Si-Dünnschicht-Module verändert sich drastisch mit Erhöhung der Brennerleistung auf 30 kW. Nach einer Minute kommt es zum ersten Glasbruch an der vorderen Seite sowie zur Entzündung der Pyrolysegase, erzeugt durch die Zersetzung der Kunststofffolie (Abb. 6.8). Dabei erhöhten sich die Rückseiten-Temperaturen über 500°C. Brennende Teile fielen nach 4 min ab, und der Durchbrand erfolgte nach knapp 7 min (Abb. 6.9). Weitere Teile sind abgebrochen und runtergefallen während der Abkühlungsphase nach Versuchsende. Die entsprechenden Schadensbilder nach einer Brandbeanspruchung von 30 kW weisen deutlich größere Schäden als an den Modulen nach Beanspruchung von 16 kW auf. Allerdings ist ein großer Teil der Module während der Abkühlungsphase abgefallen. Die verbrannte Kunststofffolie ist ebenfalls in Abb. 6.10 zu erkennen.



Abb. 6.8: a-Si-Dünnschicht-Modul der Bauweise Glas/Glas während eines Gasbrenner-Versuches mit äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: Glasbruch an der vorderen Seite nach 1 min 17, rechts: Glasscheibe bricht in der Mitte der Flamme nach 3 min 48, es ist noch kein Durchbrand erfolgt)



Abb. 6.9: a-Si-Dünnschicht-Modul der Bauweise Glas/Glas während und nach dem Gasbrenner-Versuch mit äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: Durchbrand, mit Absturz von oberen Teilen nach 6 min 48, rechts: Abfallen weiterer Teile nach Versuchsende)





Abb. 6.10: Schadensbilder eines a-Si-Dünnschicht-Modul der Bauweise Glas/Glas nach dem Gasbrenner-Versuch mit äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Eine weitere Erhöhung der Brennerleistung von 46 kW bewirkte einen Flammendurchbruch des a-Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas bereits nach 1 min 37. Die obere Glasscheibe riss nach einer Minute, gleichzeitig entzündete sich die Rückseite und es kam zum Abfallen einzelner Teile und 27 Sekunden später kam es zum Durchbrand (Abb. 6.11). Nachdem der Brenner ausgestellt wurde, brannte es am Rand des Innenlochs etwa eine Minute weiter bis es zum Erlöschen kam.



Abb. 6.11: a-Si-Dünnschicht-Modul der Bauweise Glas/Glas während des Gasbrenner-Versuchs mit äußerer Brandbeanspruchung von 46 kW (links: Entzündung an der Rückseite nach 1 min 10, Mitte: Durchbrand nach 1 min 27, rechts: Nachbrennen bis 1 min 37)

In Abb. 6.12 sind die Schadensbilder nach dem Versuch zu erkennen. Die Schadensausmaße sind ähnlich, wie bei den Versuchen mit 30 kW Brandbeanspruchung. Zusätzlich erkennt man eine starke Rußbildung hervorgerufen durch die Entzündung der Rückseite.





Abb. 6.12: Schadensbilder eines a-Si-Dünnschicht-Modul der Bauweise Glas/Glas nach dem Gasbrenner-Versuch mit äußerer Brandbeanspruchung von 46 kW (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Das Brandverhalten a-Si-Dünnschicht-Module der Bauweise Glas/Glas ist Tab. 6.5 in Abhängigkeit der Brennerleistung zusammengefasst.

Tab. 6.5: Schadensdimensionen a-Si-Dünnschicht-Module in der Bauweise Glas/Glas nach Gasbrenner-Versuchen mit äußerer Brandbeanspruchung in Abhängigkeit der Brennerleistung

Pachachtungan	Brennerleistung			
Beobachtungen	16 kW	30 kW	46 kW	
Rauchemission	5 min	1 min 17	1 min 10	
Abfallen von Teilen	keine	3 min 38	1 min 15	
Glasbruch	Glassrisse nach 55 sek	1 min 17	1 min 27	
Durchbrand (Versuchsende)	>15 min	6 min 48	1 min 37	
Feuer ausgelöscht	15 min	8 min 40	2 min 40	
Schaden vorne (cm * cm)	30 x 35	56 x 60	70 x 57	
Schaden hinten (cm * cm)	30 x 34	38 x 56	71 x 64	
Elektrische Leistung nach dem Test	17%	10,3%	7,6%	

Ein Vergleich der Temperaturverläufe an Vorder- und Rückseite der a-Si-Dünnschicht-Module während der Gasbrenner-Versuche sind in Abb. 6.13 in Abhängigkeit der Brennerleistung zu erkennen. An der Vorderseite werden im Flammenbereich Temperaturen zwischen 800°C und 1000°C in den ersten Minuten erreicht (Oberseite 1). Schwankungen resultieren in der Anfangsphase durch das Verbiegen des Vorderglases und/oder durch Rissbildung.

Der Temperaturverlauf auf der Oberfläche der Rückseite ist in der ersten Minute in Abhängigkeit der unterschiedlichen Brennerleistung sehr ähnlich (Unterseite 4), dank der zwei schützenden Glasscheiben. Nach einer Minute werden ca. 200°C erreicht, das ist die Temperatur, bei welcher sich die Sandwich-EVA-Folie zersetzt. Es kommt zur Entstehung von Pyrolysegasen und zur Rauchentwicklung. Die maximalen Temperaturen auf der Rückseite bei 30 und 46 kW Brennerleistung sind etwa 550°C.



Abb. 6.13: Vergleich des Temperaturverlaufes während der Gasbrenner-Versuche von a-Si-Dünnschicht-Modulen der Bauweise Glas/Glas in Abhängigkeit der Brennerleistung (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

## 6.4.2 Einfluss der Wärmestrahlung auf Si-Dickschicht-Module

6.4.2.1 Monokristalline Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Glas

Der Temperaturverlauf und die Brandereignisse während der Brandversuche monokristalliner Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Folie in Abhängigkeit der Brennerleistung von 16, 30 und 46 kW sind in Abb. 6.14 wiedergegeben. Auch hier wurden die Temperaturen analog zu den Si-Dünnschicht-Modulen an 6 verschiedenen Positionen gemessen. In allen Versuchen kommt es nach etwa einer Minute zur Rauchentwicklung und nach etwa 2 Minuten zur Entzündung der Rückseitenfolie und zum brennenden Abtropfen. Im Laufe des Brandversuches mit einer Brennerleistung von 16 kW kommt es zu keinem Flammendurchbrand, der Brenner wird nach 15 min ausgeschaltet. Nach einer weiteren Minute nach Versuchsende kommt es dann zur Rissbildung des gesamten Sicherheitsglasses und zum Durchbruch.

Das Anfangs-Temperaturverhalten an der Oberfläche und der Rückseite der Module ist trotz zunehmender Brennerleistung von 30 und 46 kW sehr ähnlich, die Anfangstemperaturen an der Oberflächen steigen innerhalb von einer Minute auf 800-1000°C und auf der Rückseite werden Temperaturen von 600-800°C nach etwa 3 Minuten erreicht. Ansonsten sieht man in den Temperaturdiagrammen sehr deutlich das Abfallen einzelner Thermoelemente sowie das Abfallen von Modulteilen und den Durchbrand. Der Zeitpunkt des Flammendurchgangs ist bei den Versuchen mit einer Brennerleistung von 30 kW und 46 kW ähnlich und liegt zwischen 7-8 min. Ein Nachbrennen von etwa 2 min findet bei beiden Versuchen nach Versuchsende statt, bevor das Feuer dann von alleine ausgeht.





Abb. 6.14: Temperaturverläufe an 6 verschiedenen Positionen der Vorder- und Rückseite von monokristallinen Si-Dickschicht-Modulen der Bauweise Glas/Folie während eines Gasbrennerversuches in Abhängigkeit der Brennerleistung von 16, 30 und 46 kW

In Abb. 6.15 ist der Gasbrenner-Versuch mit einer Brennerleistung von 16 kW dargestellt. Erst nach Versuchsende kommt es zu einem Glasbruch.



nach 1 min 12: Rauchentwicklung





nach 2 min 37: starkes Abrennen der Rückseite

nach 2 min 21: Entzündung Rückseite + Abfallen von Teilen



nach 9 min 50: Brennen am Rand, Abtropfen, Glasschicht ist nicht gebrochen

Abb. 6.15: Monokristallines Si-Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie während des Gasbrenner-Versuchs mit äußerer Brandbeanspruchung von 16 kW (Glasbruch erst nach Versuchsende)

Die entsprechenden Schadensbilder nach Versuchsende von der Vorder- und Rückseite sind in Abb. 6.16 zu sehen.



Abb. 6.16: Schadensbilder eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach äußerer Brandbeanspruchung von 16 kW (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Die Entzündung der Rückseitenfolie nach etwa 2 Minuten ist deutlich in Abb. 6.17 beim Brandversuch mit einer Brennerleistung von 30 kW zu erkennen. Nach etwa 7 min kommt es zum Flammendurchbrand.



Abb. 6.17: Monokristallines Si-Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie während eines Gasbrenner-Versuchs nach äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: nach 2 min 34 brennende Rückseitenfolie mit brennendem Abtropfen, rechts: Durchbrand nach 6 min 36 min)

Ein sehr großes Loch und eine starke Verrußung an der Rückseite sind die Schadensresultate nach dem Brandversuch mit einer Brennerleistung von 30 kW (Abb. 6.18).



Abb. 6.18: Schadensbilder eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: Vorderseite, rechts: Rückseite, unten: Schaden an der Anschlussdose)

Auch nach einer Brandbeanspruchung mit einer Brennerleistung von 46 kW kommt es nach 1-2 min zu einer sehr starken Rauchentwicklung, der Kunststoff tropft brennend von der Rückseite ab bis sich die ganze Rückseitenfolie entzündet (Abb. 6.19). Es kommt zum Durchbrand mit Glasbruch nach 7 min 32.



Abb. 6.19: Monokristallines Si-Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie während eines Gasbrenner-Versuchs nach äußerer Brandbeanspruchung von 46 kW (links: nach 2 min 18 brennende Rückseitenfolie mit brennendem Abtropfen, rechts: Abfallen großer Teile nach 3 min 22 min)

Die entsprechenden Schadensdimensionen nach dem Brandversuch sind in Abb. 6.20 ersichtlich.



Abb. 6.20: Schadensbilder eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach äußerer Brandbeanspruchung von 46 kW (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 6.6) sind die Brandereignisse und Schadensdimensionen der monokristallinen Si-Dickschicht-Module nach den Gasbrenner-Versuchen in Abhängigkeit der Brennerleistung zusammengefasst.

Tab. 6.6: Schadensdimensionen monokristalliner Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Folie nach Gasbrenner-Versuchen mit äußerer Brandbeanspruchung in Abhängigkeit der Brennerleistung

Pachachtungan	Brennerleistung			
Beobachtungen	16 kW	30 kW	46 kW	
Rauchemission	1 min 10	1 min 18	1 min 26	
Abfallen von Teile	2 min 25	2 min 23	2 min 05	
Glasbruch	>15 min	6 min 37	7 min 35	
Durchbrand	> 15 min	6 min 27	7 min 25	
(Versuchsende)		0 11111 37	7 11111 35	
Feuer ausgelöscht	16 min	8 min 37	9 min 45	
Schaden vorne (cm * cm)	34 x 60	47 x 60	53 x 66	
Schaden hinten (cm * cm)	43 x 72	74 x 84	71 x 95	
Elektrische Leistung nach dem Test	26,2 %	11,2 %	19%	

Durch die Zersetzung der Rückseitenfolie, hervorgerufen durch die hohen Temperaturen auf der Rückseite, kommt es zur starken Rauchentwicklung nach 1-2 min. Auch die Entzündung der Rückseitenfolie ist darauf zurückzuführen, dass die Temperaturen der Rückseite ähnlich sind bei allen drei Brennerleistungen (Abb. 6.21). Die Blasenbildung fängt bei einer Unterseitentemperatur von über 200°C an, die Rauchentwicklung bei einer Temperatur von über ca. 300°C. Bei Erreichen einer Temperatur über 350°C, entzündet sich die Rückseitenfolie mit starkem brennendem Abtropfen.

Die Unterschiede in der Temperatur am Anfang der Messungen auf der Vorderseite liegen in der Verformung der Vorderglases im Laufe des Brandtests. Man sieht deutlich das Abrutschen der Thermoelemente nach dem sich das Glas nach 2 min verbiegt, am Anfang lag es noch direkt auf der Oberfläche des Modules, dann ragt es in die Flamme. Die Temperaturmessungen sind empfindliche Sensoren für die Verformung der Module im Brandfall und spiegeln die einzelnen Brandereignisse, wie Entzündung, Abfallen und Durchbruch, sowohl an der Vorderseite als auch an der Rückseite, deutlich wieder (Abb. 6.21).



Abb. 6.21: Temperaturverläufe auf der Vorder- und Rückseite von monokristallinen Si-Dickschicht-Modulen während der Gasbrenner-Versuche in Abhängigkeit der Brennerleistung (links: an der Oberseite 1, rechts: an der Unterseite 4)

6.4.2.2 Polykristalline Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Folie

Die nachfolgend im Brandfall untersuchten Si-Dickschicht-Module unterscheiden sich nicht in der Bauweise, beide bestehen aus Glas/Folie. Der Unterschied besteht in der Si-Dickschicht, zum einen besteht diese aus einer monokristallinen und zum anderen aus einer polykristallinen Si- Dickschicht. Der Aufbau Glas/Glas und Glas/Folie hat einen entscheidenden Einfluss auf das Brandverhalten, dagegen sollten die Unterschiede im Brandverhalten der Dickschicht keinen gravierenden Einfluss haben.

Die anfängliche Temperaturentwicklung auf der Vorderseite ist der der monokristallinen Dickschicht-Module sehr ähnlich, die Temperaturen steigen innerhalb der ersten Minute auf 800-1000°C. Auch hier kann man wieder sehr sensitiv das Abfallen von Teilen, das Verbiegen des Glases und dem damit verbundenden Verrutschen der Thermoelemente sowie den Durchbruch im Temperaturverhalten an Vorder- und Rückseite beobachten (Abb. 6.22).



Abb. 6.22: Temperaturverläufe an 6 verschiedenen Positionen der Vorder- und Rückseite von polykristallinen Si-Dickschicht-Modulen der Bauweise Glas/Folie während der Gasbrennerversuche in Abhängigkeit der Brennerleistung von 30 und 46 kW

Die Rauchentwicklung setzt ebenfalls bereits nach etwa einer Minute ein und es kommt zur Entzündung der Rückseitenfolie nach 1 min 30. Nach etwa 4 min kommt

es zum Abfallen größerer brennender Teile und nach etwa 7 min kommt es zum Glasbruch verbunden mit einem Flammendurchtritt. Der Brenner wird nach 8 min ausgestellt und auch hier kommt es zum Weiterbrennen von etwa einer Minute. Die beschriebenen Brandereignisse nach einer Brandbeanspruchung von 30 kW sind in Abb.6.23 zu erkennen.



Abb.6.23: Polykristallines Si-Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie während eines Gasbrenner-Versuchs nach äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW und deren Brandereignisse: nach 1 min 29 Entzündung, brennendes Abtrofen (oben links), nach 1 min 36 stark brennende Rückseite (oben rechts), nach 4 min 04 abfallende, brennende Teile, Durchbiegen des Glases (unten links), nach 7 min 28, erste Risse im Glas mit anschließendem Durchbrand

Die entsprechenden Schadensbilder der Vorder- und Rückseite der polykristallinen Si-Dickschicht-Module sind in Abb. 6.24 und Abb. 6.25 gezeigt. Die Dimensionen der Schadensfläche sind sehr ähnlich für die Brennerleistung 30 und 46 kW sowohl der mono- als auch der polykristallinen Variante.





Abb. 6.24: Schadensbilder der Vorderseite eines polykristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW





Abb. 6.25: Schadensbilder eines polykristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach äußerer Brandbeanspruchung von 46 kW (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Die Temperaturen an Ober- und Unterseite der Module sind im anfänglichen Brandverlauf auch sehr ähnlich und unterscheiden sich kaum in Abhängigkeit der Brennerleistung von 30 und 46 kW (Abb. 6.26). Unterschiede werden erst durch den Glasbruch und dem damit verbundenden Flammendurchgang sichtbar.



Abb. 6.26: Temperaturverläufe an der Vorder- und Rückseite von polykristallinen Si-Dickschicht-Modulen während der Gasbrenner-Versuche in Abhängigkeit der Brennerleistung (links: an der Oberseite 1, rechts: an der Unterseite 4)

Auch die Brandereignisse und Schadensdimensionen sind sehr ähnlich, wie in Tab. 6.7 auch zusammenfassend erkennbar ist. Das Durchbiegen des Glases findet nach Brandbeanspruchungen von 30 und 46 kW statt (Abb. 6.27).

Tab. 6.7: Brandereignisse und Schadensdimensionen polykristalliner Si-Dickschicht-Module in der Bauweise Glas/Folie nach Gasbrenner-Versuchen mit äußerer Brandbeanspruchung in Abhängigkeit der Brennerleistung

Pachachtungan	Brennerleistung		
Beobachtungen	30 kW	46 kW	
Rauchemission	0 min 50	1 min 02	
Abfallen von Teile	1 min 37	1 min 30	
Durchbrand	7 min 28	12 min 20	
(Versuchsende)	(8 min 32)	12 11111 30	
Feuer ausgelöscht	9 min 40	13 min 47	
Schaden vorne (cm * cm)	61 x 70	53 x 67	
Schaden hinten (cm * cm)	67 x 73	68 x 72	
Elektrische Leistung nach dem Test	9,6 %	7,7%	





Abb. 6.27: Biegen des Glases eines polykristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach äußerer Brandbeanspruchung mit einem Gasbrenner (links: nach einer Brennerleistung von 30 kW, rechts: nach 46 kW)

# 6.4.3 Vergleich der PV-Module nach Brandbeanspruchung von außen mit 30 kW

In Tab. 6.8 ist ein Vergleich der Brandereignisse und Schadensdimensionen nach Brandbeanspruchung mit einer Brennerleistung von 30 kW aller untersuchten Si-Module aufgelistet. Das Brandverhalten ist ähnlich. Der einzige große Unterschied besteht im brennenden Abtropfen der Module mit Folienunterseite. Die Bauweise Glas/Glas schützt somit das Modul im Brandfall vor dem brennenden Abtropfen und trägt damit weniger zum Weiterleiten des Brandes bei. Versuche mit Dachpappe als Untergrund zeigten jedoch, dass es auch bei brennendem Abtropfen zu keiner Weiterleitung des Brandes kommt. Die Brandereignisse unterscheiden sich in Abhängigkeit der Bauweise zeitlich geringfügig. Die Schadensflächen der Si-Module sind nach dem Brand ähnlich groß.

Beobachtungen	Amorphe Si-Dünnschicht- Modul (Glas/Glas)	Monokristallines Si- Dickschicht-Modul (Glas/Folie)	Polykristallines Si- Dickschicht-Modul (Glas/Folie)
Rauchentwicklung	1 min 17	1 min 18	1 min 08
Abfallen von Teile	3 min 38	2 min 23	1 min 37
Glasbruch	1 min 17	6 min 37	7 min 28
Durchbrand (Versuchsende)	6 min 48	6 min 37	7 min 28
Feuer ausgelöscht	8 min 40	8 min 37	9 min 40
Schaden Vorderseite (cm * cm)	56 x 60	47 x 60	61 x 70
Schaden Rückseite (cm * cm)	38 x 56	74 x 84	67 x 73
Elektrische Leistung nach dem Brandtest	10,3%	11,2 %	9,6 %

Tab. 6.8: Brandereignisse und Schadensdimensionen verschiedener Si-Module nach Gasbrenner-Versuchen mit äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW

Das bei der Bauweise Glas/Folie stattfindende brennende Abtropfen, findet sich auch im Temperaturverhalten wieder (Abb. 6.28). Während die Temperaturen an der Vorderseite zwischen 800°C und 1000°C liegen, sind die Temperaturen an der Rückseite abhängig von der Bauart (Glas/Glas oder Glas/Folie). Schon nach ca. 2 Minuten kommt es zur Entzündung der Rückseitenfolie verbunden mit starkem Abtropfen und Abfallen von Teilen auf dem Boden im Falle der Glas/Folien-Module (mono- und polykristalline Si-Dickschicht-Module). Durch die Entzündung an der Rückseite werden Temperaturen über 600°C bereits nach 2 Minuten erreicht. Im Gegensatz dazu fallen bei Glas/Glas-Modulen brennende Teile erst nach 4 Minuten ab. Auch hat die Bauart Einfluss auf dem Zeitpunkt der Rauchentwicklung und des Abtropfens und der Flammenausbreitung.



Abb. 6.28: Temperaturverlauf während der Gasbrenner-Versuche von verschiedenen PV-Modulen bei äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: an der Oberseite 2, rechts: an der Unterseite 5, gemessen 25 cm über der Flammezentrum)

Im Vergleich treten diese Erscheinungen bei Dünnschicht-Modulen der Glas/Glas-Bauweise zu einem späteren Zeitpunkt auf und zeigen eine geringere Flammausbreitungsgefahr im Vergleich zu den Glas/Folien-Modulen.

Auch die Schadensbilder unterscheiden sich zwischen Modulen der Glas/Glas- und Glas/Folie-Aufbau deutlich. Ein starkes Brennen und Abtropfen während des Brandes bewirkt auch eine größere verbrannte Fläche der Glas/Folien-Module auf der Folien-Rückseite (Abb. 6.29). Bei einer Glas/Glas-Bauart ist nur eine (EVA)-Laminatschicht zwischen den Glasscheiben, während bei den Glas/Folien-Modulen sowohl eine EVA Laminatschicht als auch eine Kunststofffolien-Rückseite als Brandlast fungiert.



Amorphes Si-Dünnschicht-Modul



Monokristallines Si-Dickschicht-Modul



Polykristallines Si-Dickschicht-Modul



Amorphes Si-Dünnschicht-Modul



Monokristallines Si-Dickschicht-Modul



Polykristallines Si-Dickschicht-Modul

Abb. 6.29: Schadensbilder verschiedener PV-Module nach Gasbrenner-Versuchen mit äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW (oben: Vorderseiten, unten: Rückseiten)

## 6.4.4 Brandversuche von PV-Modulen mit Dachpappe als Dachuntergrund

Um die Gefahr von abfallenden brennenden Teilen bei PV-Modulen der Bauart Glas/Folie beurteilen zu können, wurde z.B. ein polykristallines Si-Dickschicht-Modul mit einer Dachpappenunterlage einer Brandbeanspruchung von 30 kW ausgesetzt. Die Dachpappe diente als Dachhaut für ein Flachdach, auf welches das Modul aufgeständert wurde. Es wurde eine typische im Baumarkt erhältliche Dachpappe genutzt. Dabei handelt es sich um eine leicht entflammbare (Klasse F laut EN 13501-1+A1:2010 and ISO 11925-2:2011) Dachpappenfolie (Bitumat, R333H/Sindelit SR von Dehtochema, CZ), die 1,5 mm dick war. Diese kann als Isolierungsmaterial unter einem Faltdach für temporäre Dämm-Maßnahmen benutzt werden.

In Abb. 6.30 (links) ist der Dachpappenversuch gezeigt. Es kommt zur Entzündung der Rückseitenfolie nach 1 min 47, gefolgt von starken brennenden Abtropfen und Abfallen von brennenden Teilen bis hin zum Durchbrand nach 7 min. Es gab eine Nachbrennzeit von mehr als zwei Minuten nach Ausschalten des Brenners. Man sieht die brennenden Teile auf der Dachpappe, diese brennen wenige Sekunden und gehen dann von alleine aus. Die Schadensbilder des Moduls (das Durchbiegen des Glases) und die Dachpappe mit heruntergefallenen Modulteilen sind in Abb. 6.30 dargestellt. Es kam zu keiner Brandweiterleitung und keiner Entzündung der Dachpappe. Ein Vergleich der Brandereignisse und Schadensdimensionen der Brandversuche mit und ohne Dachpappe als Unterlage ist in Abb. 6.31 zusammengefasst. Die Dachpappe hat keinen Einfluss auf das Brandverhaltens des Moduls und es kam zu keiner Entzündung der Dachpappe hervorgerufen durch das Abfallen brennender Modulteile.





Abb. 6.30: Polykristallines Si-Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie während eines Gasbrenner-Versuchs nach äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW mit Dachpappe als Unterlage (links: nach 1 min 50 brennende Rückseitenfolie mit starkem brennenden Abtropfen, rechts: Abfallen großer Teile und der Anschlussdose)



Abb. 6.31: Schadensbilder eines polykristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: Biegen des Glases, rechts: Dachpappe mit abgefallenen Teilen des Moduls, es kam zu keiner Entzündung)

In Tab. 6.9 ist ein Vergleich zweier Brandversuche mit und ohne Dachpappe als Unterlage zu erkennen. Es wurden die Schadensdimensionen und die Brandereignisse nach gleichen Brandversuchen mit polykristallinen Si-Dickschicht-Modulen verglichen.

Beobachtungen	Polykristallines Si-Dickschicht-Modul (Glas/Folie) ohne Dachpappenunterlage	Polykristallines Si-Dickschicht-Modul (Glas/Folie) mit Dachpappenunterlage
Rauchemission	1 min 08	0 min 50
Abfallen von Teile	1 min 37	1 min 47
Durchbrand (Versuchsende)	7 min 28	6 min 20
Feuer ausgelöscht	9 min 40	8 min 33
Schaden vorne (cm * cm)	61 x 70	44 x 62
Schaden hinten (cm * cm)	67 x 73	46 x 65
Elektrische Leistung nach dem Test	9,6 %	45,6%

Tab. 6.9: Brandereignisse und Schadensdimensionen von Si-Dickschicht-Modulen nach Gasbrenner-Versuchen mit äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW

## 6.5 Beanspruchung der PV-Module durch Feuer von innen

Nachdem die PV-Module mit dem Gasbrenner von außen beansprucht wurden, wurden nun die PV-Module mit der festgelegten Standard-Brennerleistung von 30 kW auch von der Rückseite aus (innen) beaufschlagt. Ein hinter dem Modul durch Brand Wind angesammelter geratener Laubhaufen in oder ein Dachstuhl/Wohnungsbrand könnten reelle Brandszenarien sein, bei denen das Feuer von innen das PV-Modul angreift, deshalb ist es wichtig, auch das Brandverhalten der Module von innen zu beurteilen. Die PV-Module wurden auf einem Test-Flachdach wie zuvor in Kapitel 6.4 aufgeständert und mit einer 30 kW Brennerleistung rückseitig beaufschlagt.

## 6.5.1 Einfluss der Wärmestrahlung auf Si-Dünnschicht-Module

Der Brandversuch eines a-Si-Dünnschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas mit einer Brandbeaufschlagung der Rückseite von 30 kW ist in Abb. 6.32 wiedergegeben. Nach etwa einer Minute kommt es zum Glasbruch und zur Entzündung der entweichenden Pyrolysegase. Nach etwa 2 Minuten kommt es dann zum Flammendurchbruch. Die entsprechenden Brandschäden sind in Abb. 6.33 gezeigt.

Vergleicht man beide Brennerkonfigurationen, d.h. von innen und außen, so erkennt man in Abb. 6.34, dass die Temperaturen in der Anfangsphase ähnlich und unabhängig von der Brennerkonfiguration sind. Die Temperaturen an der jeweils beflammten Seite steigen innerhalb der ersten Minute auf 900-1000°C, an der nicht beflammten Seite steigen diese in den ersten 2 Minuten auf 400°C, bis es zum Durchbrand nach 2 min (bei Beanspruchung von innen) kommt. Nach Beanspruchung von außen bleiben die Temperaturen konstant an der beflammten Seite bei 900°C und an der nicht beflammten Seite bei ca. 550°C, bis es dann auch zum Durchbrand nach ca. 8 min kommt.



Abb. 6.32: a-Si-Dünnschicht-Modul der Bauweise Glas/Glas während des Gasbrenner-Versuchs mit innerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: Glasbruch und Entzündung der Pyrolysegase nach 53 sec, rechts: Durchbrand nach 2 min 08)





Abb. 6.33: Schadensbilder eines a-Si-Dünnschicht-Modul der Bauweise Glas/Glas nach einem Gasbrenner-Versuch mit innerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)



Abb. 6.34: Temperaturverläufe von a-Si-Dünnschicht-Modulen der Bauweise Glas/Glas während der Gasbrenner-Tests nach äußerer und innerer Brandbeanspruchung mit 30 kW (links: beflammte Seite, rechts: nicht beflammte Seite)

#### 6.5.2 Einfluss der Wärmestrahlung auf Si-Dickschicht-Module

Des weiteren wurde ein polykristallines Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie für die Versuche mit Brandbeanspruchung von innen gewählt. Nach Beanspruchung von 30 kW breitet sich das Feuer über die gesamte Modulfläche aus und nach etwa 11 min ist die gesamte Folien-Rückseite verbrannt (Abb. 6.35).



Abb. 6.35: Polykristallines Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie während des Gasbrenner-Versuchs mit innerer Brandbeanspruchung von 30 kW (links: Brandausbreitung nach 54 sec, rechts: vollständig verbrannte Rückseite nach 10 min 46)

Innerhalb weniger Sekunden steigen die Temperaturen auf der Unterseite auf über 1000°C (Abb. 6.36). An der Oberseite steigen die Temperaturen langsamer an (umgekehrter Prozess analog zur Vorderseiten-Beflammung). Es werden nach 2 min Temperaturen zwischen 100-400°C erreicht.

Im Temperaturverlauf in Abb. 6.36 erkennt man sehr deutlich, wann Brandereignisse, wie Abfallen von Teilen und Flammenausbreitung, Glasbruch und Auslöschen stattfinden. In diesem Beispiel kommt es erst zum Glasbruch, nachdem der Brenner nach 15 min ausgestellt wurde.

Ein Vergleich der Brandversuche von polykristallinen Si-Dickschicht-Modulen mit Brandbeaufschlagung von 30 kW von innen und außen ist in Tab. 6.10 zu erkennen. Der Flammendurchbruch nach äußerer Brandbeaufschlagung ist nach etwa 7 min. Im Gegensatz dazu verbrannte die gesamte Rückseitenfolie nach innerer Brandbeaufschlagung, wie auch in Abb. 6.37 zu sehen ist. Ein Glasbruch fand erst nach 15 min statt, nachdem der Versuch zuvor beendet wurde.



Abb. 6.36: Temperaturverläufe an 6 verschiedenen Positionen der Vorder- und Rückseite eines polykristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Folie nach innerer Brandbeanspruchung von 30 kW





Abb. 6.37: Schadensbilder eines polykristallinen Si-Dickschicht-Moduls der Bauweise Glas/Glas nach einem Gasbrenner-Versuch mit innerer Brandbeanspruchung von 30 kW (oben links: Vorderseite, oben rechts: Rückseite, unten: Schaden an Anschlussdose)

Das entsprechende Temperaturverhalten nach innerer und äußerer Brandbeanspruchung (30 kW) ist in Abb. 6.38 verglichen. Die Temperaturen sind in der Anfangsphase sowohl an der beflammten als auch an der nicht beflammten Seite sehr ähnlich. An der beflammten Seite werden in beiden Konfigurationen maximale Temperaturen von etwa 1200°C erhalten, während an der nicht beflammten Seite maximale Temperaturen von ca. 500°C erreicht werden.



Abb. 6.38: Temperaturverläufe von polykristallinen Si-Dickschicht-Modulen der Bauweise Glas/Folie während der Gasbrenner-Test nach äußerer und innerer Brandbeanspruchung mit 30 kW (links: beflammte Seite, rechts: nicht beflammte Seite)

Tab. 6.10: Vergleich der Brandereignisse und Beobachtungen polykristalliner Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Glas nach Gasbrenner-Versuchen mit innerer und äußerer Brandbeanspruchung von 30 kW

Deckechtungen	Polykristallines Si-Dickschicht-Modul (Glas/Folie)		
Beobachtungen	Beanspruchung von außen	Beanspruchung von innen	
Rauchemission	1 min 08	0 min 25	
Abfallen von Teile	1 min 37	0 min 26	
Abtropfen	ја	ја	
Glasbruch	7 min 28	17 min	
Durchbrand (Versuchsende)	7 min 28	> 15 mim	
Feuer ausgelöscht	9 min 40	> 17 min	
Schaden vorne (cm * cm)	61 x 70	165 x 83	
Schaden hinten (cm * cm)	67 x 73	165 x 83	
Elektrische Leistung nach dem Test	9,6%	8,2%	

# 6.5.3 Vergleich der PV-Module nach Brandbeanspruchung von innen mit 30 kW

Die Brandereignisse im Vergleich Si-Dünn- und Dickschicht-Module sind in Tab. 6.11 zusammengetragen. Während es bei den Si-Dünnschicht-Modulen der Bauweise Glas/Glas zu einem Durchbrand nach etwa 2 Minuten kam, verbrannte zwar beim Si-Dickschicht-Modul der Bauweise Glas/Folie die komplette Rückseitenfolie ab, aber es kam während des Brandversuches zu keinem Durchbrand.

Tab. 6.11: Brandereignisse und Schadensdimensionen nach Gasbrenner-Versuchen mit innerer Brandbeanspruchung von 30 kW in Abhängigkeit der Bauweise Glas/Glas und Glas/Folie

Beobachtungen	Polykristallines Si- Dickschicht-Modul (Glas/Folie)	a-Si-Dünnschicht- Modul (Glas/Glas)	
Rauchemission	0 min 25	0 min 53	
Abfallen von Teile	0 min 26	0 min 53	
Abtropfen	ja (0 min 18)	nein	
Glasbruch	17 min	0 min 53 (Risse unteres Glas)	
Durchbrand (Versuchsende)	> 15 min	2 min 09	
Feuer ausgelöscht	> 17 min	3 min 06	
Schaden vorne (cm * cm)	komplett (165 x 83)	25 x 31	
Schaden hinten (cm * cm)	komplett (165 x 83)	30 x 38	
Elektrische Leistung nach dem Test	8,2%	0%	

An der beflammten Rückseite sind die Temperaturen zwischen 800-1000°C, diese nehmen sofort ab, sobald es zum Durchbruch kommt und die Thermoelemente verrutschen und aus der Flammenzone fallen. Auf der Vorderseite, die nicht beflammt wurde, treten hingegen wieder Temperaturen von etwa 500°C auf. Auch hier sind die Temperaturmessungen ein empfindlicher Indikator für statt gefundenen Brandereignisse während des Brandversuches (Abb. 6.39).



Abb. 6.39: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite von Si-Modulen nach innerer Brandbeanspruchung von 30 kW in Abhängigkeit der Bauweise Glas/Glas und Glas/Folie (links: beflammte Rückseite, rechts: nicht beflammten Vorderseite)
## 6.6 Zusammenfassung Gasbrenner-Tests

Es wurde ein Testverfahren entwickelt, welches ermöglicht, das Brandverhalten und die Feuerwiderstandsfähigkeit<sup>1</sup> von PV-Module in einem einzigen Versuchsaufbau auf einfache Weise in Abhängigkeit unterschiedlicher Brandszenarien zu beurteilen.

Das Testverfahren besteht aus einem Gasbrenner, mit welchen die PV-Module sowohl gegen Flugfeuer von außen als auch gegen Feuer von innen getestet werden können. Zusätzlich können durch unterschiedliche Brennerleistungen die Brandszenarien bzw. die Beanspruchungsniveaus verändert werden und den Anforderungen angepasst werden.

Es wurden Brandversuche mit unterschiedlichen PV-Modulen in aufgeständerter Form (Flachdach) mit den Brennerleistungen 16, 30 und 46 kW durchgeführt. Diese Leistungen entsprechen größenordnungsmäßig in etwa den Brandsätzen aus den Standards CEN TS 1187 (Drahtkorb mit Holzwolle) oder der UL 790 Tests (Holzkrippe von 10 bis 2 000 g).

Für die Beurteilung der PV-Module im Brandfall wurden folgende Kriterien festgelegt: Zeiten bis zur Rauchentwicklung, Flammenausbreitung, Zeiten der Brandereignisse, wie brennendes Abtropfen, Abfallen von Teilen, Glasbruch, Flammendurchgang und Öffnungen.

Des weiteren wurden die Schadensflächen und die elektrische Leistung der Module nach den Brandversuchen beurteilt. Die Brandereignisse und die daraus resultierenden Schadensflächen der untersuchten PV-Module nach Brandbeanspruchung mittels Gasbrenner durch Feuer von innen und außen sind in Tab. 6.12. zusammengefasst.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Bauweise der Module die Hauptrolle im Brandverhalten spielt. Module der Bauweise Glas/Folie zeigen zum Beispiel z.T. starkes brennendes Abtropfen oder Abfallen von Teilen im Vergleich zu den Modulen der Bauweise Glas/Glas. Dies liegt in der Rückseitenfolie begründet, diese besteht aus Kunststoff, diese neigt zum Verbrennen und es kommt zum Abtropfen der geschmolzenen Folie und zum Abfallen von brennenden Teilen (bestehen aus Silizium-Zelle mit brennende EVA-Enkapsulierungsfolie oder brennende Rückseitenfolie.

Ein weiteres wichtiges Kriterium in dem Performance Test der Module sind die Schadensdimensionen nach den Brandtests. Dabei schneiden Si-Dünnschicht-Module (Glas/Glas) etwas besser ab als die Module der Bauweise Glas/Folie. Ursache ist die geringere Flammenausbreitung der Module, die auch in der geringeren Menge an brennbarem Material begründet liegt.

Des weiteren spielt die Konfiguration des Gasbrenners auch eine entscheidende Rolle. Unsere Ergebnisse zeigen, dass eine Beanspruchung der Module von innen im Vergleich zu außen zu einem schnelleren Durchbrand, zu größeren Schadensflächen und zu einer geringeren elektrischen Leistung nach den Brandversuchen führt.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Feuerwiderstandsfähigkeit im Sinne der Landesbauordnungen umfasst die Aspekte Tragfähigkeit, Raumabschluss und Wärmedämmung (F-Klassifizierung). Im Rahmen dieses Berichtes bezieht sich dieser Begriff nur auf die Widerstandsfähigkeit gegen Feuer von außen.

	Feuer von außen						Feuer von innen			
Beobachtung	16	kW	kW 30 kW			46 kW			30 kW	
	Si-Dick	Si- Dünn	Si-I	Dick	Si- Dünn	Si-I	Dick	Si- Dünn	Si-Dick	Si- Dünn
	mono		mono	poly		mono	poly		poly	
Rauchemission	1 min 10	5 min	1 min 18	1 min 08	1 min 17	1 min 26	1 min 02	1 min 10	0 min 25	0 min 53
Abfallen von Teile	2 min 25	nein	2 min 23	1 min 37	3 min 38	2 min 05	1 min 30	1 min 15	0 min 26	0 min 53
Abtropfen	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	nein
Glasbruch	> 15 min	0 min 55	6 min 37	7 min 28	1 min 17	7 min 35	12 min 30	1 min 27	17 min	0 min 53
Durchbrand (Versuchsende)	> 15 min	> 15 min	6 min 37	7 min 28	6 min 48	7 min 35	12 min 30	1 min 37	> 15 mim	2 min 09
Feuer ausgelöscht	16 min	15 min	8 min 37	9 min 40	8 min 40	9 min 45	13 min 47	2 min 40	> 17 min	3 min 06
Schaden vorne (cm * cm)	34 x 60	30 x 35	47 x 60	61 x 70	56 x 60	53 x 66	53 x 67	70 x 57	165 x 83	25 x 31
Schaden hinten (cm * cm)	43 x 72	30 x 34	74 x 84	67 x 73	38 x 56	71 x 95	68 x 72	71 x 64	165 x 83	30 x 38
Elektrische Leistung nach dem Test	26,2%	17%	11,2%	9,6%	10,3%	19%	7,7%	7,6%	8,2%	0%

Tab.6.12: Vergleich der Brandereignisse und Schadensdimensionen der Gasbrenner-Versuche nach<br/>Brandbeanspruchung von innen und außen

# 7 Beurteilung der Rauchgasemission im Brandfall

Eigene Vorarbeiten zeigten, dass sich die (Fourier-Transformiertes-Infrarot) FTIR-Spektroskopie grundsätzlich dazu eignet, die Rauchgaskomponenten quantitativ zu bestimmen [57-63]. Dazu wurde ein mobiles FTIR-Spektrometer an die unterschiedlichen Brandprüfeinrichtungen gekoppelt. Die beim Brand emittierten Rauchgase werden über einen beheizten Partikelfilter und einer beheizten Transferleitung bis hin in eine auf 185°C beheizte Gaszelle geleitet. Die Rauchgasanalyse erfolgte dann über das Spektrometer, um die Volumenanteile der wesentlichen am Umsatz beteiligten Komponenten CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> und H<sub>2</sub>O zu bestimmen. Weitere Komponenten wie HCI, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> oder NO<sub>x</sub> können ebenfalls bestimmt werden. Im Ergebnis erhält man eine simultane Aufzeichnung der qualitativen und quantitativen Zusammensetzung des Brandgases.

## 7.1 Rauchentwicklung

Um die Rauchentwicklung während eines Brandes von PV-Modulen beurteilen zu können, wurden Laborbrandversuche in der Rauchkammer, im Cone Calorimeter und in der SBI-Apparatur durchgeführt. Bei der Rauchkammer handelt es sich um eine geschlossene Kammer, in welcher die emittierten Rauchgase innerhalb der Branddauer bzw. Versuchszeit gesammelt werden. Hingegen sind das Cone Calorimeter und die SBI-Apparatur ein offenes, gut ventiliertes System, d.h. die emittierten Rauchgase werden in einem Luftvolumenstrom, im Fall des Cone Calorimeters von 24 L/s und beim SBI-Test mit 0,6 m/s abgesaugt. Die Aufzeichnung der Rauchentwicklung erfolgt über die Transmission bzw. die optische Rauchdichte. Dies funktioniert auf optischem Weg mit Hilfe einer Lichtquelle und einem kalibrierten Fotosensor.

#### 7.1.1 Rauchentwicklung in der Rauchkammer nach ISO 5659-2

Während der Brandversuche in der Rauchkammer werden die entstehenden Rauchgase für eine Dauer von 20 min gesammelt. Die Rauchentwicklung von CdTe-, CIGS- und Si-Modulen ist insgesamt relativ gering im Vergleich zu Kunststoffen, wie PUR, PS, etc. Die Transmissionswerte sinken hier auf höchstens 40%. Die Transmissionswerte während dieser Brandversuche von CdTe- und CIGS-Modulen sind in Abb. 7.1 gezeigt. Die CIGS-Module entzünden sich 1-2 Minuten früher als CdTe-Module, welches sich auch in der Rauchentwicklung wiederspiegelt. Die Si-Module zeigen ein ähnliches Verhalten in der Rauchentwicklung. Kennwerte zur Rauchentwicklung der PV-Module sind in der Tab. 7.1 zusammengefasst. Die Reproduzierbarkeit der Transmissions-Daten ist sehr gut (Abb. 7.2). Die maximale spezifische optische Dichte der CdTe-Module ist 38 und die der CIGS-Module 54. Die optische Dichte ist dimensionslos und ist ein Maß für die Transmission durch ein Medium. Die Maximas werden nach 6-8 min erreicht. Ein leichter Anstieg der Transmissionswerte in der geschlossenen Kammer ist auch auf eine Weiterreaktion und ein Absinken der Partikel zurückzuführen.



Abb. 7.1: Rauchentwicklung (Transmission) von CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulen während der Brandversuche in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) nach ISO 5659-2



Abb. 7.2: Reproduzierbarkeit der Transmissionsmessungen von PV-Modulen während der Brandversuche in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) nach 5659-2 (links: CIGS-Dünnschicht-Module, rechts: CdTe-Dünnschicht-Module)

Tab. 7.1: Daten zur Rauchentwicklung von CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulen während der Brandtests in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) nach 5659-2

Daten zur Rauchentwicklung	CdTe- Dünnschicht- Module	CIGS- Dünnschicht- Module
Transmission bis zu	51%	40,4%
Geringste Transmission zum Zeitpunkt	8 min 25	6 min 09
Maximale spezifische optische Dichte	38,4	53,6
Zeit bis zur maximalen optischen Dichte	8 min 25	6 min 09

Die Rauchentwicklung wurde ebenfalls bei Brandversuchen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) beurteilt. Beim Cone Calorimeter handelt es sich um ein gut ventiliertes System, im grundlegenden Unterschied zu den zuvor durchgeführten Rauchkammertests, bei denen die Rauchgase in einem geschlossenen System gesammelt werden.

Es wurden folgende PV-Modulproben untersucht: monokristalline Si-Dickschicht-, a-Si-, CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Module. Die Rauchfreisetzungsrate, die gesamte Rauchfreisetzung sowie die Transmission während dieser Versuche sind in Abb. 7.3 aufgetragen und miteinander verglichen. Prinzipiell zeigten sich große Unterschiede zwischen Dickschicht- und Dünnschicht-Modulen. Die Si-Dickschicht-Module wiesen eine höhere Rauchfreisetzungsrate und Gesamtrauchfreisetzung zu früheren Zeiten auf als bei den Dünnschicht-Modulen, die wiederum untereinander ein ähnliches Verhalten zeigten. Die Transmissionswerte der Si-Dickschicht-Module sinkt auf etwa 40%, bei den Dünnschicht-Modulen sind diese zwischen 70-80%. Das CIGS-Modul weist die niedrigsten Transmissionswerte mit 70%, dann a-Si mit 75% und die höchsten Transmissionswerte zeigen die CdTe-Module mit etwa 80%, d.h. hier findet die geringste Rauchentwicklung statt.

Die Module der Bauweise Glas/Folie zeigen im Brandverhalten eine frühzeitigere Entzündung und ein intensiveres Brennen, eine höhere Flammenlänge, eine höhere Wärmefreisetzungsrate und eine stärkere Rauchentwicklung als die untersuchten Dünnschicht-Module der Bauweise Glas/Glas. Diese wiederum zeigen untereinander ein ähnliches Brandverhalten. Im Vergleich der verschiedenen Dünnschicht-Module zeigten die CIGS-Module eine etwas ausgeprägtere Rissbildung während des Brandvorganges, die dazu führte, dass die Freisetzung von Pyrolysegasen frühzeitiger stattfand und die Rauchentwicklung etwas intensiver war. Insgesamt schneiden im untersuchten Rauchverhalten die CdTe-Modulen am besten ab.

Rauchmessungen zur Reproduzierbarkeit sowie Vergleiche in Abhängigkeit der Probengröße (100 x100 mm im Vergleich zu 4 mal 50 x 50 mm) der verschiedenen PV-Module sind in Abb. 7.4 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen dabei eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Daten zur Rauchentwicklung sowie eine gute Übereinstimmung bezüglich der Probengröße.

Daten zur Rauchentwicklung	Monokristallines Si-Dickschicht- Modul	a-Si- Dünnschicht- Modul	CdTe- Dünnschicht- Modul	CIGS- Dünnschicht- Modul
Zeit bis maximale Rauchfreisetzungsrate (min)	2,1 min	2,7 min	3,1 min	2,7 min
Maximale Rauchfreisetzungsrate ((m²/s)/m²)	17 ± 2	6,5 ± 0,1	5,3 ± 0,5	8,7 ± 0,7
Gesamte Rauchfreisetzung (m²/m²)	380 ± 54	201 ± 23	177 ± 15	222 ± 13

Tab. 7.2: Daten zur Rauchentwicklung von verschiedenen PV-Modulen bei Brandversuchen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunke) nach ISO 5660



Abb. 7.3: Rauchentwicklung von verschiedenen PV-Modulen bei Brandversuchen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) nach ISO 5660 (oben: Rauchfreisetzungsrate, Mitte: gesamte Rauchfreisetzung, unten: Transmission)





Abb. 7.4: Reproduzierbarkeit der Rauchentwicklung von PV-Modulen während der Brandversuche im Cone-Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) nach ISO 5660 (links: Rauchfreisetzungsrate, rechts: Rauchfreisetzung, von oben nach unten: von monokristallinen Si-Dickschicht-Modulen, a-Si- Modulen, CdTe-, CIGS-Dünnschicht-Modulen in Abhängigkeit der Probengröße (100 x100 mm im Vergleich zu 4 mal 50 x 50 mm)

#### 7.1.3 Rauchentwicklung in der SBI-Apparatur nach DIN EN 13823

Im Brandraum der SBI-Apparatur wurde zwar eine Rauchentwicklung visuell beobachtet, mit Hilfe optischer Messungen konnte allerdings keine Rauchentwicklung nachgewiesen werden, da der Volumenstrom und die Verdünnung der Rauchgase zu groß waren. Auch die Rauchgaszusammensetzung unterschied sich nicht von gewöhnlicher Luft. Unter diesen Bedingungen konnte keine Emission von Kohlenmonoxid oder anderen giftigen Gasen nachgewiesen werden.

## 7.2 Rauchgaszusammensetzung

Die Fourier-Transformations-Infrarot (FTIR) Spektroskopie wurde zur qualitativen und quantitativen Rauchgasanalyse während der Brandversuche in der Rauchkammer, im Cone Calorimeter und während der Versuche im offenen Kalorimeter (SBI) genutzt. Die entstandenen Rauchgase gelangten über eine Sonde, einen Partikelfilter und eine Transferleitung in die Gaszelle des FTIR-Gerätes. Die Transportzeiten wurden gemessen und berücksichtigt. Die Gase wurden während der Brandversuche kontinuierlich gemessen. Eine quantitative Bestimmung der Gaskomponenten ist durch eine Kalibrierung des FTIR-Spektrometers möglich. Das FTIR-Spektrometer (*Nicolet type 380, Thermo Fisher Scientific GmbH*) hat eine Gaszellentemperatur von 185°C und eine Auflösung von 0,5 cm<sup>-1</sup>.

## 7.2.1 Rauchgaszusammensetzung in der Rauchkammer nach ISO 5659-2

Es wurden folgende PV-Module in der zugeschnittenen Probengröße 75 x 75 mm untersucht: CdTe, CiGS- und a-Si-Dünnschicht-Module. Die ersten Brandversuche in der Rauchkammer wurden nach ISO 5659-2 (Versuchsdauer von 10 min, eine Brandbeanspruchung von 50 kW/m<sup>2</sup> und eine zusätzliche Flamme) durchgeführt. Dabei zeigten sich nur leicht erhöhte Konzentrationswerte für Kohlenstoffmonoxid. Nach Versuchsende wurden die Gase in der Rauchkammer bis zu 12 min weiter gemessen. Nach 12 min stiegen die CO-Werte bis maximal 75 ppm (Tab. 7.3), d.h. es sind keine Vergiftungserscheinungen zu erwarten [54]. Kohlenmonoxid ist ein Zersetzungsprodukt der in den Modulen verwendeten EVA-Folie und entsteht erst nachdem sich während des Brandversuches im Modul Risse gebildet hatten. Im Maximum der Flammenbildung nach etwa 7 min ist die CO-Konzentration unter 20 ppm. Erst im weiteren Brandverlauf, nach 20 min, steigen die Konzentrationen auf maximal 165 ppm. Die entsprechenden Rauchgaszusammensetzungen der Module sind in den Abb. 7.5 bis 7.7 wiedergegeben. Im Realfall unter freiem Himmel sollten die CO-Emissionen keine entscheidende Rolle spielen. Kohlendioxid und Wasser sind dabei die Hauptprodukte der Verbrennung. Gaskomponenten, wie SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl, HCN, HBr, Benzen und Phenol konnten nicht in größeren Mengen nachgewiesen werden. Ebenfalls konnten in geringen Mengen die Gaskomponenten Methan, Ethen und Formaldehyd detektiert werden (Tab. 7.3). Weiterhin wurde Essigsäure als Zersetzungsprodukt der EVA-Folie in arößeren Mengen nachgewiesen. Hier wurde eine zusätzliche Kalibrierung zum quantitativen Nachweis von Essigsäure erstellt, die aber auf den Nachweis der anderen Gaskomponenten keinen merklichen Einfluss hat, wie auch in Kapitel 7.3 beschrieben wird.



Abb. 7.5: Rauchgaszusammensetzung eines CdTe-Dünnschicht-Moduls während der Brandversuche in der Rauchdichtekammer nach ISO 5659-2



Abb. 7.6: Rauchgaszusammensetzung eines CIGS-Dünnschicht-Moduls während der Brandversuche in der Rauchdichtekammer nach ISO 5659-2



Abb. 7.7: Rauchgaszusammensetzung eines a-Si-Dünnschicht-Moduls während der Brandversuche in der Rauchdichtekammer nach ISO 5659-2

Wiederholungsversuche der Rauchgasmessungen zeigten sowohl für die CdTe- als auch für die CIGS-Module in der Rauchkammer eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuche untereinander (Abb. 7.8 und Abb. 7.9).



Abb. 7.8: Reproduzierbarkeit der Rauchgasemission von CdTe-Dünnschicht-Modulen während der Brandversuche in der Rauchdichtekammer nach ISO 5659-2 (links: Kohlendioxidkonzentration, rechts: Kohlenmonoxidkonzentration)



Abb. 7.9: Reproduzierbarkeit der Rauchgasemission von CIGS-Dünnschicht-Modulen während der in der Rauchdichtekammer nach ISO 5659-2 (links: Kohlendioxidkonzentration, rechts: Kohlenmonoxidkonzentration)

Ein Vergleich der CO<sub>2</sub>- und CO-Emissionen der verschiedenen PV-Module im Brandfall zeigt, dass die Gaskonzentrationen in der Anfangsphase relativ ähnlich sind und die Art der Dünnschicht-Module hier kaum eine Rolle auf die Bildung der Hauptprodukte spielt. Im direkten Vergleich der Dünnschicht-Module untereinander, schneiden dann im weiteren Brandverlauf die CIGS-Module am schlechtesten ab, mit maximalen Konzentrationen von 165 ppm für CO, 23 ppm für Methan, 26 ppm für Ethen und 25 ppm für Formaldehyd, dennoch sind diese Gaskonzentrationen während der Brandversuche relativ gering (Abb. 7.10). Über die Emission von Essigsäure wird gesondert in Kapitel 7.3 berichtet.

In der Tab. 7.3 sind die maximalen Konzentrationen der emittierten Rauchgaskomponenten (aus 3-4 Versuchen) zusammengestellt. Aufgelistet sind dabei nur Gaskomponenten mit mehr als 5 ppm, d.h. Komponenten wie SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HCI, HCN, HBr, Benzen und Phenol konnten nicht nachgewiesen werden.

PV-Module	CO <sub>2</sub> (vol %)	CO (ppm)	Methan (ppm)	Ethen (ppm)	Formaldehyd (ppm)	
Versuch nach 12	Versuch nach 12 min					
CdTe	0,87 ± 0,12	40 ± 5	9 ± 3	6 ± 3	8 ± 1	
CIGS	0,98 ± 0,14	64 ± 11	9 ± 3	10 ± 2	12 ± 3	
a-Si	0,94	40	5	6	9	
Versuch nach 20 min						
CdTe	1,22 ± 0,07	79 ± 9	18 ± 3	12 ± 1	12 ± 1	
CIGS	$1,35 \pm 0,03$	154 ± 17	20 ± 3	$23 \pm 3$	24 ± 1	

Tab. 7.3: Maximale Rauchgaskonzentration von PV-Module während der Brandversuche in der Rauchdichtekammer (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) nach ISO 5659-2



Abb. 7.10: Vergleich der Gaskonzentrationen der untersuchten Dünnschicht-Module während der Brandversuche in der Rauchdichtekammer nach ISO 5659-2 (links oben: Kohlendioxidkonzentration bis 12 min Branddauer, rechts oben: Kohlenmonoxidkonzentration bis 12 min Branddauer, links unten: Kohlendioxidkonzentration bis 20 min Branddauer, rechts unten Kohlenmonoxidkonzentration bis 20 min Branddauer)

#### 7.2.2 Rauchgaszusammensetzung im Cone Calorimeter nach ISO 5660

Während der Brandversuche im Cone Calorimeter wird die Rauchgaszusammensetzung durch die Hauptprodukte Kohlendioxid und Wasser sowie durch Kohlenmonoxid und Essigsäure bestimmt. Weitere Gaskomponenten konnten nicht in höheren Mengen nachgewiesen werden. Ursache liegt hier in dem sehr gut ventilierten System. Im Gegensatz zur geschlossenen Rauchkammer erfolgt hier ein starker Verdünnungseffekt, welcher auch in der SBI-Apparatur beobachtet wurde. Die Rauchgaszusammensetzungen der einzelnen PV-Module während der Cone Calorimeter-Versuche sind in Abb. 7.11 wiedergegeben.



Rauchgaszusammensetzung in Cone Calorimeter CIGS-Dünnschicht





Abb. 7.11: Rauchgaszusammensetzung der PV-Module während der Brandversuche im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) nach ISO 5660 (von oben nach unten: CdTe-, CIGS-, a-Si-Dünnschicht-Module, monokristallines Si-Dickschicht-Modul)

Ein Vergleich der verschiedenen PV-Module bezüglich der CO<sub>2</sub>- und CO-Emission ist in Abb. 7.12 wiedergegeben. Die Si-Dickschicht-Module der Bauweise Glas/Folie zeigten, wie auch bei der Rauchentwicklung, die höchsten CO<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationen während der Brandversuche im Vergleich zu den Dünnschicht-Modulen. Dafür ist die Zersetzung der Rückseitenfolie verantwortlich. Die Maxima der CO<sub>2</sub> Emission mit 4,5 vol% und der CO-Emission mit 800 ppm werden nach etwa 2 min erreicht. Die Si-Dickschicht-Module entzünden sich nach etwa einer Minute, brennen sehr stark; das Feuer verlischt nach etwa 2 min. Dies spiegelt sich auch in der Rauchgasemission wieder. Es konnten sehr geringe Mengen von HF detektiert werden, die möglicherweise durch die Zersetzung von PVDF entstanden sind (eine mögliche Komponente der Rückseitenfolie). Die Dünnschicht-Module entzünden sich etwas später nach etwa 2 min und verlöschen erst nach 3-4 min. Die Maxima der CO<sub>2</sub> und CO-Konzentrationen werden somit erst nach 2,5-3 min erreicht. Dabei sind die Konzentrationen sehr gering unter 1 vol% CO<sub>2</sub> und unter 100 ppm CO.



Abb. 7.12 Kohlendioxidkonzentration (links) und Kohlenmonoxidkonzentration (rechts) während der Brandversuche von verschiedenen PV-Modulen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) nach ISO 5660

In Tab. 7.4 sind die maximalen Gaskonzentrationen während der Brandversuche im Cone Calorimeter zusammengefasst.

Tab. 7.4: Maximale Rauchgaskonzentrationen während der Brandversuche im Cone Calorimeter (70 kW/n	n²,
Zündfunken) nach ISO 5660	

PV-Module	CO <sub>2</sub> (vol %)	CO (ppm)	Methan (ppm)	Ethen (ppm)	Formal- dehyd (ppm)
	С	dTe-Dünnsch	icht-Modul		
Maximale Konzentration	$0,46 \pm 0,09$	40 ± 17	-	-	-
erreicht nach	3,2 min	3,2 min	-	-	-
	C	IGS-Dünnsch	icht-Modul		
Maximale Konzentration	0,81 ± 0,14	91 ± 8	3 ± 0	2 ± 1	-
erreicht nach	2,7 min	2,7 min	2,7 min	2,7 min	-
	a	-Si-Dünnschi	cht-Modul		
Maximale Konzentration	$0,64 \pm 0,08$	84 ± 9	3 ± 2	4 ± 1	-
erreicht nach	2,7 min	2,7 min	2,7 min	2,7 min	-
Monokristallines Si-Dickschicht-Modul					
Maximale Konzentration	3,7 ± 0,8	717 ± 115	10 ± 1	7 ± 1	3 ± 1
erreicht nach	2,2 min	2,2 min	2,2 min	2,2 min	2,2 min

## 7.3 Erstellen einer Kalibrierung zum qualitativen und quantitativen Nachweis von Essigsäure

Um die entstehenden Rauchgase zu quantifizieren, wurde ein FTIR-Spektrometer an die jeweilige Versuchsapparatur gekoppelt. Das Spektrometer ist für die quantitative Analyse für folgende 18 rauchgasspezifische Komponenten kalibriert:

CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>2</sub>O, C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O (Acrolein), C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O, HBr , HCI ,HF , HCN.

Für die quantitative Analyse weiterer Gaskomponenten ist das FTIR-Gerät nicht kalibriert, d.h. es können nur qualitative Aussagen zur Emission weiterer Gaskomponenten getroffen werden.

Ethylenvenylacetat (kurz EVA) wird bei der Herstellung von Modulzellen als Einkapsulierungsmaterial verwendet. Ein Zersetzungsprodukt von EVA ist Essigsäure. Um Essigsäure quantitativ nachweisen zu können, musste eine Kalibrierung für diese Komponente erstellt werden.

Dabei besteht die Schwierigkeit, einen geeigneten Wellenzahlbereich zu definieren. Denn die Wellenzahlbereiche, in denen Essigsäure absorbiert, überlappen stark mit denen von Acrolein und SO<sub>2</sub>. Somit kam es bei ersten quantitativen Rauchgasmessungen zu fehlerhaften Analyseergebnissen dieser drei Substanzen. Es mussten in der neuen Kalibrierung, die zur Auswertung verwendeten Wellenzahlbereiche für Acrolein, SO<sub>2</sub> und Essigsäure neu definiert werden.

Um Kalibrierspektren für die Essigsäurekalibrierung aufzunehmen, wurden definierte Volumen Eisessig in der Rauchdichtekammer verdampft und mittels FTIR-Spektrometer gemessen.

Vorab wurde die genaue Konzentration der Essigsäure durch Titration mit NaOH bestimmt.

Titration NaOH gegen Essigsäure:

 $CH_3COOH + NaOH \rightarrow CH_3COONa + H_2O$ 

Essigsäure (Eisessig):

= ca. 96%
= ca. 16 mol/L
= 60,05 g/mol
$= 1,05 \text{ g/cm}^3$

Der Analyt wurde für die Titration 1:50 verdünnt.

<u>Natronlauge</u> : m(NaOH) V(NaOH) M(NaOH)	= 0,742 g = 50 ml = 39,997 g/mol
c(NaOH)	= 0,371 mol/L

Verbrauchte Maßlösung (NaOH) für die Neutralisation von 5 ml Analyt (Essigsäure) ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Titration	V (NaOH)
	[ml]
1	4,43
2	4,44
3	4,40
Mittelwert	(4,42 ± 0,02) mL

c(CH <sub>3</sub> COOH)	$= \frac{c (NaOH) * V (NaOH)}{V (CH_2 COOH)} \times Verdünnungsfaktor$
c(CH <sub>3</sub> COOH)	= 16,398 mol/L
w(CH <sub>3</sub> COOH)	$=\frac{M(CH_{2}COOH)*c(CH_{2}COOH)}{\rho(CH_{2}COOH)}$
w(CH <sub>3</sub> COOH)	<u>= 93,78%</u>

Die verwendete Essigsäure hat einen Massenanteil von 93,78 %.

#### Erstellen der Kalibrierung:

In der Rauchdichtekammer, welche eine hermetisch abgeriegelte Kammer mit definiertem Volumen ist, wurden definierte Massen von Essigsäure unter einer Heizeinrichtung, die auf ca. 90°C erhitzt wurde, verdampft. Der Siedepunkt von Essigsäure liegt bei ca. 118°C. Es wurde eine Temperatur unter 100°C gewählt, um den gasförmigen Wasseranteil so gering wie möglich zu halten. Die Kammertemperatur war konstant bei ca. 25°C. Der Druck in der Kammer wurde aufgezeichnet und mit den jeweiligen aktuellen und absoluten Tagesluftdrücken verrechnet.

Für die Berechnung der Essigsäurekonzentration in der Versuchsapparatur, während der Aufnahme der Kalibrierspektren, liegt folgende Berechnung zu Grunde:

$$c(CH_3COOH) = \frac{w(CH_3COOH)*m(CH_3COOHverdampft)*1000*R*(T/P)}{M(CH_3COOH)*0,001*V(Versuchskammer)}$$

R	$=8,31451 \frac{J}{mol*K}$	
Т	= 35°C (Tempera	itur in der Versuchskammer)
Р	= Druck in Pa	(absoluter Kammerinnendruck)
V	$= 0,50937 \text{ m}^3$	(Versuchskammervolumen)
W(СНЗСООН)	= 93,78 %	

Es wurden 3 Kalibrierspektren für Essigsäure erstellt; die Daten dazu sind in Tab. 7.5 zusammengefasst.

Tab. 7.5: Daten für die E	Erstellung einer Essigsäur	e-Kalibrierung für	das FTIR-Gerät zur	Bestimmung der
	Zersetzungsprodukte der	EVA-Folie in den	PV-Modulen	

	Kalibrierspektrum 1	Kalibrierspektrum 2	Kalibrierspektrum 3	
T in [K]	308,15	308,15	308,15	
P in [Pa]	102160	101240	102160	
Masse verdampft in [g]	0,403	1,100	1,743	
Konzentration CH <sub>3</sub> COOH in [ppm]	310	854	1342	



Abb. 7.13: FTIR-Kalibrierspektren von Essigsäure für verschiedene Konzentrationen (oben: 1342 ppm, Mitte: 854 ppm, unten: 310 ppm)

Aus den erhaltenen Kalibrierspektren für die Essigsäure (Abb.7.13) und den vorhandenen Kalibrierspektren von SO<sub>2</sub>, Acrolein, CO<sub>2</sub> und CO wurde mit Hilfe einer gerätespezifischen Software eine neue Kalibrierdatei erstellt, die es ermöglicht, quantitativ die Zersetzungsprodukte von PV-Modulen zu bestimmen. Die dazu notwendigen Daten, wie genutzte Wellenlängenbereiche und Konzentrationen sind in Tab. 7.6 zusammengefasst; die entsprechenden Kalibrierdaten sind nachfolgend aufgelistet.

Kalibrierparameter:

Gerät:	FT-IR Spektrometer "Nicolet 380"
Detektor:	DTGD
Weglänge:	2 m
Wellenzahlbereich:	4500-400 cm-1
Auflösung:	0,5
Quantitative Analyse:	Classical least squares
Kalibrierkurve:	forced through zero for all the elements, First Order fitting algorithm.

Gaskomponente	Konzentration [ppm]	Wellenbereich [cm <sup>-1</sup> ]	Basislinien Typ	Interferenz
CO <sub>2(low)</sub>	50 320	2340-2331	linear removed	x
CO <sub>2(high)</sub>	10.000 20.000 30.000 40.000	2236-2242	linear removed	Х
CO <sub>(low)</sub>	50 80 160 320 625 1200	2098-2116	linear removed	х
CO <sub>(high)</sub>	2400 3600 5000	2205-2213	linear removed	х
SO <sub>2</sub>	85,25 101 598,3 1071 1984	2522-2501	Two points (2499-2527) Maximum range (2495-2540)	Acrolein (1211-1200)
Acrolein	110	1211-1200 1217-1213	linear removed	х
Essigsäure	310 854 1342	1729-1725	linear removed	Acrolein (1211-1200) SO <sub>2</sub> (2522-2501)

Tab. 7.6: Daten für die neu erstellte Kalibrierdatei zur Bestimmung der Gaskomponenten von PV-Modulen im Brandfall

Mit der neu erstellten Kalibrierung war es nun möglich, die Zersetzungsprodukte, die im Brandfall der Solarmodule auftreten können, genau zu bestimmen. Dabei zeigt die neue Kalibriermethode kaum Unterschiede in Hinblick auf die Analyse von CO und CO<sub>2</sub>, aber bietet neue Möglichkeiten, SO<sub>2</sub>, Acrolein und Essigsäure quantitativ zu bestimmen. Die Rauchgaszusammensetzung eines CdTe-Moduls während eines Brandtests in der Rauchkammer ist exemplarisch in Abb. 7.14 dargestellt. Es entstehen sehr hohe Konzentrationen an Essigsäure, dagegen konnten Acrolein und Schwefeldioxid in größeren Mengen nicht nachgewiesen werden.

# Ergebnisse der Essigsäurekonzentration von Solarmodulen während der Brandversuche in der Rauchkammer:



Abb. 7.14: Rauchgaszusammensetzung eines CdTe-Dünnschicht-Moduls während eines Brandtest (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) in der Rauchkammer nach ISO 5659 mit der neu erstellten Kalibrierung

Die sehr gute Reproduzierbarkeit der CO-Konzentrationen bezüglich neuer und alter Kalibrierung ist exemplarisch für das CdTe-Modul in Abb. 7.15 gezeigt.



Abb. 7.15: Reproduzierbarkeit der CO-Konzentrationen während der Brandtests (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) von CdTe-Dünnschicht-Modulen in der Rauchkammer nach ISO 5659

Essigsäure als Zersetzungsprodukt der EVA-Folie konnte mit Hilfe der neuen Kalibriermethoden in hohen Konzentrationen im Brandfall sowohl von CdTe-Modulen als auch in CIGS-Modulen nachgewiesen werden, wie in den Abb. 7.16 und Abb. 7.17 zu erkennen ist. Die Reproduzierbarkeit der entsprechenden Gaskonzentration ist dabei sehr gut. Es werden maximale Essigsäurekonzentrationen von etwa 300 ppm nach etwa 4-5 min erreicht. Diese Konzentration ist sehr hoch, wenn man bedenkt, dass der ERPG-2 Wert für eine 60-minutige Expositionszeit bei 35 ppm liegt, und die ERPG-3 (60 min) bei 250 ppm liegt.



Abb. 7.16: Essigsäurekonzentration während der Brandtests (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) von CdTe-Dünnschicht-Modulen in der Rauchkammer nach ISO 5659 (3 Wiederholungsversuche)



Abb. 7.17: Essigsäurekonzentration während der Brandtests (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme) von CdTe-Dünnschicht-Modulen in der Rauchkammer nach ISO 5659 (3 Wiederholungsversuche)

Die maximalen Rauchgaskonzentrationen von CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulen während der Brandversuche in der Rauchkammer mittels neuer Kalibrierung sind in Tab. 7.7 zusammenfassend aufgelistet.

PV-Module	CO <sub>2</sub> (vol %)	CO (ppm)	Essigsäure (ppm)	SO₂ (ppm)	Acrolein (ppm)		
CdTe-Dünnschicht-Modul							
Maximale Konzentration	1,29 ± 0,08	72 ± 11	226 ± 81	<10 ppm	< 10 ppm		
erreicht nach	20 min	20 min	5,7 min	-	-		
CIGS-Dünnschicht-Modul							
Maximale	$1,44 \pm 0,02$	158 ± 14	286 ± 27	< 10 ppm	< 10 ppm		
Konzentration							
erreicht nach	20 min	20 min	4,5 min	-	-		

Tab. 7.7: Maximale Konzentration in [ppm] während der Brandversuche von CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulen in der Rauchkammer nach ISO 5659

#### Ergebnisse der Essigsäurekonzentration von Solarmodulen während der Cone Calorimeter Versuche:

Das Maximum der Essigsäure-Emission stimmt sehr gut mit der Zeit der Entzündung der Proben im Cone Calorimeter überein. Nach der Entzündung nimmt die Essigsäure-Konzentration wieder ab, da die Pyrolysegase, wie Essigsäure, in der Flamme verbrannt werden und dann zu Wasser und CO<sub>2</sub> reagieren. Die maximale CO- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen stimmen mit der Zeit der stärksten Flamme überein. Insgesamt zeigte sich, dass die Si-Dickschicht-Module geringe Essigsäureemissionen aufweisen als die Dünnschicht-Module.

Während die Reproduzierbarkeit in der geschlossenen Rauchkammer sehr gut war, ist es in dem gut ventilierten System schwierig, die Konzentrationswerte für die Essigsäure zu reproduzieren. Das kann zum einen an der sehr kurzen Pyrolysephase, zum anderen an dem hohen Absaugstrom liegen. Weiterhin liegt die Dauer für die Aufnahme eines Spektrums bei ca. 0,4 min. Dennoch ist ein deutlicher Trend ersichtlich. Die Messungen zeigen einen Unterschied der Essigsäurekonzentrationen zwischen den verschiedenen Solarmodultypen (siehe Vergleich Abb.7.18 und Abb. 7.19). Bei den Brandversuchen mit monokristallinen Si-Dickschicht-Modulen sind die maximalen Essigsäure-Konzentrationen mit 49 ppm am geringsten; die CdTe-Modulen weisen die größten Essigsäurekonzentrationen mit 118 ppm auf (Tab. 7.8). Insgesamt sind die Essigsäurekonzentrationen im gut ventilierten Cone Calorimeter System geringer als in der Rauchkammer.

Im Fall der 10\*10 cm Proben ist allerdings die Essigsäure-Konzentrationen höher als bei der gevierteilten 5\*5 cm Proben. Bei den Brandversuchen mit dem a-Si-Dünnschicht-Modul werden bis ca. 400 ppm erreicht, mit dem CdTe-Modul etwa 250 ppm, mit dem CIGS-Modul werden ca. 400 ppm erreicht. Die Unterschiede in den Konzentrationen sind möglicherweise auf die Rissbildung in den Dünnschicht-Modulen und die damit verbundende Pyrolysegasentweichung vor der Entzündung zurückzuführen. Nur das monokristalline Si-Dickschicht-Modul erreicht bei beiden Probengrößen in etwa gleiche Werte mit 65 ppm.



Abb. 7.18: Rauchgaszusammensetzung eines CIGS-Dünnschicht-Moduls während eines Brandtest (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) im Cone Calorimeter nach ISO 5660



Abb. 7.19: Rauchgaszusammensetzung eines monokristallinen Si-Dickschicht-Moduls während eines Brandtest (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) im Cone Calorimeter nach ISO 5660

Tab. 7.8: Rauchgaskonzentrationen während der Brandtests (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) von verschiedenen PV-Modulen im Cone Calorimeter nach ISO 5660 (3 Wiederholungsmessungen von geviertelten Proben)

PV-Module	CO <sub>2</sub> (vol %)	CO (ppm)	Essigsäure (ppm)	SO₂ (ppm)	Acrolein (ppm)		
CdTe-Dünnschicht-Modul							
Maximale Konzentration	$0,41 \pm 0,04$	28 ± 11	118 ± 45	<3 ppm	< 1 ppm		
erreicht nach	3,2 min	3,2 min	2,3 min	-	-		
CIGS-Dünnschicht-Modul							
Maximale Konzentration	$0,78 \pm 0,08$	93 ± 12	72 ± 38	<3 ppm	< 1 ppm		
erreicht nach	2,8 min	2,8 min	1,9 min	-	-		
a-Si-Dünnschicht-Modul							
Maximale Konzentration	$0,66 \pm 0,07$	79 ± 11	66 ± 34	<3 ppm	< 1 ppm		
erreicht nach	2,8 min	2,8 min	1,8 min	-	-		
Monokristallines Si-Dickschicht-Modul							
Maximale Konzentration	3,70 ± 0,7	831 ± 142	49 ± 28	<3 ppm	< 1 ppm		
erreicht nach	2,1 min	2,1 min	1,3 min	-	-		

## 7.4 Beurteilung der Rauchgastoxizität

Die in den Brandversuchen ermittelten Rauchgaskonzentrationen werden mit den in Kapitel 4 vorgestellten Kennwerten und Grenzwerten verglichen und die Toxizität der emittierten Rauchgase beurteilt. Die Ergebnisse der Rauchentwicklung und der Rauchgaszusammensetzung sind in Tab. 7.9 in Abhängigkeit des Brandszenarios und der Modulart zusammengefasst. Für die Beurteilung der Rauchgastoxizität sind in Tab. 7.9 auch die toxikologischen Grenzwerte für die entsprechende Exposition aufgelistet.

Ein direkter Vergleich der Konzentrationsgrenzwerte ist nicht möglich, da die dafür angegebenen Expositionszeiten der Kennwerte wesentlich länger sind (bis zu 60 min), als die Brenndauer in den Brandprüfeinrichtungen (im Cone Calorimeter ca. 3 der Rauchkammer bis 20 min) und damit auch die min, in Rauchgaskonzentrationswerte. Der Vergleich soll lediglich einen Trend zeigen, in welchen Größenordnungen wir uns bewegen, wenn wir Rauchgaskonzentrationen im Brandfall der untersuchten Solarmodule beurteilen.

Tab. 7.9: Zusammenfassung den höchsten Konzentrationen erreicht in der Rauchkammer (50 kW/m²,
Pilotflamme) und in die Cone Calorimeter Test (70 kW/m², Zündfunken) im Vergleich mit toxikologische
begründete Werte

	CO <sub>2</sub> (vol %)	CO (ppm)	Essigsä ure (ppm)	Formald ehyd (ppm)	Ethen (ppm)	Methan (ppm)	Rauch
Toxikologische begründete maximale Stoffkonzentrationen für entsprechende Expositionszeiten (AEGL-Werte oder PAC-Werte)							Min. Trans- mission
AEGL-1 (10 min)		-		0,9			
AEGL-2 (10 min)		420		14			
AEGL-3 (10 min)		1700		100			
AEGL-1 (30 min)		-		0,9			
AEGL-2 (30 min)		150		14			
AEGL-2 (60 min)		83		14			
PAC-1 (60 min)	3,0				600	2900	
PAC-2 (60 min)	5,0				6600	2900	
ERPG-1 (60 min)			5				
ERPG-2 (60 min)			35				
ERPG-3 (60 min)			250				
CdTe-Dünnschicht	-Modul						
Rauchkammer	$1,29 \pm 0,08$	79 ± 9	226 ± 8	1 12 ±	1 12 ± 3	18 ± 3	51%
Cone Calorimeter	$0,46 \pm 0,08$	40 ± 17	118 ± 4	5 -	-	-	ca. 75%
<b>CIGS-Dünnschicht</b>	-Modul						
Rauchkammer	$1,44 \pm 0,02$	158 ± 14	286 ± 2	7 24 ±	1 23 ± 1	20 ± 3	40%
Cone Calorimeter	0,81 ± 0,14	93 ± 12	72 ± 38	3 -	2 ± 1	3 ± 1	ca. 70%
a-Si-Dünnschicht-Modul							
Rauchkammer	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	70%
Cone Calorimeter	$0,66 \pm 0,07$	84 ± 9	66 ± 34	4 -	4 ± 1	3 ± 2	ca. 70%
Monokristallines Si-Dickschicht-Modul							
Rauchkammer	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cone Calorimeter	$3,7 \pm 0,7$	831 ± 142	49 ± 2	8 3 ± 1	7 ± 1	10 ± 1	ca. 40%

Betrachtet man zum Beispiel die Gefährdung durch Kohlenmonoxid, dann schneiden die untersuchten Si-Dickschicht-Module bei den durchgeführten Cone Calorimeter-Brandversuchen am schlechtesten ab. Es werden sehr hohen Konzentrationen von über 800 ppm erreicht. Die AEGL-2 Werte für 10 und 30 Minuten sowie der AEGL-3 Wert für 30 Minute werden deutlich überschritten. Die angegebenen Expositionszeiten sind allerdings länger als die Brenndauer der Probe im Cone Calorimeter Test (2 min), dafür ist die kurze Expositionszeit unter gut belüfteten Bedingungen, deshalb können diese Vergleiche nur einen Trend abgeben.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die verfügbaren Grenzwerte mit den jeweiligen Konzentrationswerten der verschiedenen PV-Module aus den

Brandversuchen in der Rauchkammer und im Cone Calorimeter verglichen. Dabei handelt es sich <u>nur</u> um einen Trend, da die jeweiligen Expositionszeiten der Grenzwerte und der Messwerte unterschiedlich sind. Die Abbildungen sollen helfen, die Konzentrationswerte der emittierten Gaskomponenten (CO<sub>2</sub>, CO, Essigsäure und Formaldehyd) besser einordnen zu können. Die emittierte Methanmenge ist so gering, dass keine gefährlichen Konzentrationswerte erreicht werden. In den Abbildungen werden nur Gaskomponenten, die größeren Mengen bei den Brandversuchen entstanden sind, betrachtet.

Zum Vergleich, bei einem Wohnzimmerbrand werden etwa 30000 ppm CO in der Vollbrandphase freigesetzt.



134



Abb. 7.20: Maximal entstehende Rauchgaskonzentrationen (CO<sub>2</sub>, CO, Essigsäure, Formaldehyd) bei Brandversuchen in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme, 20 min) und im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken, ca. 3 min) im Vergleich zu verschiedenen Grenzwerten (AEGL, ERPG, PAC)

# 8 Brandrückstandsanalytik der PV-Module

Bei Bränden mit PV-Modulen kann es zur Emission von Schwermetallen kommen. Um die Schwermetallkonzentration von CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulen nach einem Brand bestimmen zu können, mussten die verbrannten PV-Modul-Proben analysiert werden Im ersten Schritt wurden die verbrannten Proben chemisch aufgearbeitet. Eine Übersicht zur Vorgehensweise ist in Abb. 8.1 wiedergegeben. Zunächst wurden die Brandrückstände mechanisch zerkleinert, in einer Kryomühle gemahlen und der Rückstand anschließend extrahiert. Das Extrakt wird dann mit analytischen Verfahren, wie z.B. der Atomabsorptions- und/oder mit der Optischen Emissionsspektrometrie untersucht.



Abb. 8.1: Übersicht zur Vorgehensweise bei der Bestimmung von Schwermetallkonzentrationen aus den PV-Modul-Brandrückständen

Die analytischen Verfahren AAS und ICP-OES wurden zur Analyse der Schwermetalle benutzt. Die Grundlagen der beiden Analyseverfahren sind in Abb. 8.3 zusammengefasst.





CRAPPORe commence with Skoop much and a model on C

- o Überführung der Proben in die Gasphase
- o Anregung über induktiv gekoppeltes Plasma
- o Elemente haben charakteristisches Emissionspektrum

Abb. 8.2: ICP-OES und F-AAS als analytische Verfahren zur Bestimmung von Schwermetallen

# 8.1 Erzeugung von Brandrückstandsproben

Für die analytischen Untersuchungen wurden Brandrückstände aus drei verschiedenen Brandszenarien herangezogen:

Laborbrand:

- Schwelbrand (50 kW/m<sup>2</sup>, zusätzliche Flamme zur Entzündung von Pyrolysegasen, hermetisch geschlossene Rauchkammer, 75 x 75 mm Proben)
- Vollbrand (70 kW/m<sup>2</sup>, Volumenstrom 24L/s, Zündflamme, im offenen Cone Calorimeter, 100 x 100 mm bzw. viermal 25 x 25 mm Proben)

Testdach:

Burning Brand-Test nach IEC 61730-2/Typ A, 2 kg Holzkrippe, Wind 5,3 m/s

## 8.1.1 Brandrückstandsproben aus der Rauchkammer nach ISO 5659-2

Die Proben der a-Si, der CIGS- und der CdTe-Module nach den Brandversuchen in der Rauchkammer sind in Abb. 8.3 gezeigt. Es ist auf dem Bild deutlich zu erkennen, dass die obere Glasschicht der CIGS-Modulprobe, im Gegensatz zu den anderen beiden Proben, feingliedrig gebrochen ist. Bei genauem Hinsehen ergab sich, dass die Gase nicht nur an den Bruchstellen austraten, sondern besonders gegen Ende der Versuche auch am Rand der Probe. Dies deutet darauf hin, dass

sich auch im Randbereich der mechanische Verbund zwischen Glas und Laminat soweit löst, dass Kanäle zum Gasaustritt gebildet werden. Exemplarisch sind in Abb. 8.4 ein CdTe-Modul und in Abb. 8.5 ein CIGS-Modul vor und nach dem Brandtest in der Rauchkammer im direkten Vergleich gezeigt.



Abb. 8.3: PV-Modulproben nach dem Brandtest in der Rauchdichtekammer (50 kW/m<sup>2</sup>, zusätzliche Flamme) nach ISO 5659-2 (links: a-Si-, Mitte: CdTe-, rechts: CIGS-Dünnschicht-Module)



Abb. 8.4: CdTe-Modul vor dem Brandversuch (Vorder- und Rückseite) und nach dem Test (Vorder- und Rückseite) in der Rauchkammer nach ISO 5659-2



Abb. 8.5: CIGS-Modul vor dem Brandversuch (Vorder- und Rückseite) und nach dem Test (Vorder- und Rückseite) in der Rauchkammer nach ISO 5659-2

#### 8.1.2 Brandrückstandsproben aus dem Cone Calorimeter nach ISO 5660

Die CdTe- und CIGS-Dünnschicht-Modulproben vor und nach den Brandversuchen im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) nach ISO 5660 sind in Abb. 8.6 und Abb. 8.7 zu sehen. Es ist auf dem Bild die Vierteilung der Proben zu erkennen, die zu

einer Vereinfachung der Probenaufarbeitung für die Rückstandsanalyse führt (siehe Kapitel 8.2).



Abb. 8.6: CdTe-Dünnschicht-Modul vor (links) und nach (rechts) dem Brandversuch im Cone Calorimeter (70 kW/m<sup>2</sup>, Zündfunken) nach ISO 5660



Abb. 8.7: CIGS-Dünnschicht-Modul vor (links) und nach (rechts) dem Brandversuch im Cone Calorimeter (70 kW/m², Zündfunken) nach ISO 5660

#### 8.1.3 Brandrückstandsproben nach Burning Brand Test nach IEC 61730-2

Um beurteilen zu können, welche Menge von Schwermetallen in den Modulen bei einem realen Brand freigesetzt werden und in die Umwelt gelangen, wurden, nach den Laborbränden, auch Probenstücke vom CIGS- und CdTe-Modulen auf einem Testdach mittels Burning Brand Test verbrannt, um die Rückstände analysieren zu können. Als Basis für den Vergleich der Schwermetallkonzentration dienen identische, unverbrannte Probenstücke. Die Größe der Proben war 25 cm x 25 cm, um sicherzustellen, dass die gesamte Probe mit Feuer beaufschlagt wird. Die Verbrennung erfolgt in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A (2 kg Holzkrippe, Wind 5,3 m/s) auf einer separat gefertigten Dachfläche aus Keramik mit einer Aussparung für das Probenstück. Damit die Probe nicht als großes Stück durch das Loch fällt, ist ein Drahtgitter mit einer Maschenweite von 5 cm vorgesehen. Damit ist garantiert, dass nur verbrannte Teilstücke nach unten fallen und das Feuer in diesem Moment die Bruchkante an der verbleibenden Probe gut angreifen kann. Die Probenhalterung mit einer CIGS-Probe ist in Abb. 8.8 zu erkennen.



Abb. 8.8: Versuchsaufbau für die Probenverbrennung nach einem Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A (links mit 2 kg Holzkrippe, rechts Draufsicht)

Der Brandtest ist in Abb. 8.9 zu sehen. Nach dem Brand stellte sich heraus, dass die Rückstände des CIGS-Moduls fast vollständig durch das Drahtnetz gefallen waren, wohingegen die Rückstände des CdTe- Moduls noch darauf lagen.







Abb. 8.9: Probenverbrennung nach einem Burning Brand Test in aufgeständerter Anordnung (Flachdach) in Anlehnung an IEC 61730-2/Typ A (oben: Gesamtansicht, Mitte: Feuerdurchtritt auf der Probenunterseite, unten: Brandrückstände)

Die Rückstände der CdTe-Probe zeigten eine signifikant hellere Färbung, die vorher schwarze, fotoaktive Schicht schien zum großen Teil verbrannt, bzw. chemisch umgewandelt worden zu sein.

## 8.2 Brandrückstandsproben-Aufarbeitung

Nach dem Produzieren verbrannter Proben, wurden diese anschließend chemisch aufgearbeitet. Der erste Schritt war das mechanische Zerkleinern der verbrannten Proben und das anschließende Mahlen. Nach dem Mahlen erfolgte der nächste Schritt des Extrahierens der Proben. Im letzten Schritt konnte aus dem Extrakt mittels analytischer Methoden dann die Schwermetallkonzentration in den verbrannten Proben bestimmt werden und mit der der unverbrannten Proben verglichen werden.

## 8.2.1 Mechanische Aufarbeitung

8.2.1.1 Mahlen der Proben nach dem Burning Brand Test nach IEC 61730-2

Im Anschluss an die Versuche wurden die Rückstände in einer Schlagrotormühle der Marke RETSCH SM 2000 zu Pulver gemahlen, welche in Abb. 8.10 im geöffneten Zustand zu erkennen ist.



Abb. 8.10: Schlagrotormühle der Marke RETSCH SM 2000 zur Probenzerkleinerung der Modulproben

Damit die Folie in den Modulproben nicht die Mühle verkleben, werden die Proben vorab grob zerkleinert und mit Stickstoff konditioniert und spröde gemacht. Danach wurde das Pulver in einer Mikrowelle mit Borax aufgeschlossen. Für die Elementaranalyse kam ein ICP-OES Spektrometer der Marke HORIBA Jobin Yvon Ultima 2 CHR zum Einsatz.

8.2.1.2 Mahlen der Proben nach dem Rauchkammer Test nach ISO 5659-2

Die verbrannten Proben aus der Rauchkammer wurden in einer Schwingmühle CryoMill von Retsch Deutschland durch Prall und Reibung zerkleinert (Abb. 8.11).

Der Mahlbecher wird vor und während der Vermahlung von außen mit flüssigem Stickstoff bei -196°C kontinuierlich gekühlt. Dadurch wird die Probe versprödet und leichtflüchtige Bestandteile bleiben erhalten.



Abb. 8.11: Schwingmühle zur Erzeugung des Pulvers (links), entsprechender Mahlbehälter mit Mahlkugel (rechts)

Nach einer Vorkühlungszeit von 10 Minuten und eine Schwingfrequenz von 5 Hz, wurden die verbrannten Proben gemahlen. Dies erfolgt in 5 Zyklen mit: Mahlvorgang von 1 min 30 bei 25 Hz gefolgt mit einem Kühlvorgang von 1 min bei 5 Hz. Dabei wurde die Kunststofffolie spröde und ließ sich besser verarbeiten. Es wurde eine bessere Homogenität des Pulvers erreicht als beim Mahlprozess mit einer Schlagrotormühle.

## 8.2.2 Chemische Aufschlussverfahren

Das PV-Modul-Pulver musste nun extrahiert werden und in eine wässrige Lösung gebracht werden, um die chemischen Elemente in den PV-Modulen analysieren zu können.

## 8.2.2.1 Voruntersuchung: Auswahl der Aufschlussmethode

Zwei verschiedene Aufschlussverfahren standen zur Auswahl für die Bestimmung der Zusammensetzung der PV-Module. Die Module bestehen aus einem hohen Anteil an Glas (Silikate) und in geringen Mengen aus Schwermetallen. Dabei eignen sich am besten oxidierend wirkende Säureaufschlüsse. Die meisten Schwermetalle bestehen aus Verbindungen, die gut in oxidierenden Säuren löslich sind. Deshalb ist diese Art des Aufschlusses besonders geeignet.

Der erste Aufschluss zur Auswahl besteht aus einen Säureaufschluss mit Königswasser (HNO<sub>3</sub>/HCI). Dieser Aufschluss ist für die Sedimentanalyse optimiert, d.h. für Materialen mit höheren Anteilen an Silikaten und der Präsenz in Spuren von Schwermetallen. Dabei wurden alle Elemente außer Silikate in Lösung gebracht.

Der zweite Aufschluss besteht aus einen Säureaufschluss mit Königswasser (HNO<sub>3</sub>/HCl) und Flusssäure (HF). Dieser Aufschluss ist für die Glasanalyse optimiert, bei welchen Silikaten und die Schwermetalle gelöst werden. In einem zweiten Schritt, wurde der Rest von HF mit H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> komplexiert.

Es wurden Voruntersuchungen mit einem Rückstand einer Si-Dünnschicht-Modulprobe und einer unbeschädigten CIGS-Modulprobe durchgeführt, um die beiden Aufschlussmethoden zu vergleichen. Beide Proben waren schon pulverförmig vorbereitet. Es wurden bei beiden Methoden sehr ähnliche Ergebnisse bezüglich der Konzentrationen der ausgesuchten Elemente erhalten. Es zeigte sich, dass beide Methoden für die Untersuchung der PV-Module geeignet sind.

Die Anwendung von Flusssäure und die nachfolgenden Schritte der Komplexierung mit H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> mit dem zweiten Aufschluss sind allerdings von Nachteil. Deswegen wurde der erste Aufschluss mit Königswasser für die weiteren Untersuchungen gewählt.

## 8.2.2.2 Ausgewählte Methode

Das PV-Modul-Pulver wurde mit Säure (Königswasser) aufgeschlossen. Für jedes Material wurden ca. 0,5 g von den pulverförmigen Proben mit 1,2 ml Salpetersäure HNO<sub>3</sub> 65%, 3,6 ml Salzsäure HCl 32% und 0,5 ml H<sub>2</sub>O oxidiert und den Aufschluss in eine Hochdruckmikrowelle überführt.

Dafür wurde eine Hochdruckmikrowelle von Mikrowelle Laborsystem MLS GmbH, mit dem Hochdruckrotor HPR 1000/10S verwendet (Abb. 8.12). Der Vorteil beim Druckaufschluss ist, dass die maximal möglichen Temperaturen höher liegen als bei einem normalen Aufschluss (die Temperatur ist begrenzt beim Siedepunkt der Aufschlusssäure). Dadurch ist die Reaktionsgeschwindigkeit höher und es ergeben sich kürzere Aufschlusszeiten.



Abb. 8.12: Hochdruckmikrowelle von Mikrowelle Laborsystem MLS GmbH benutzt für die chemischen Aufschlüsse der PV-Module (links) und Hochdruckbehalter mit Schutzmantel (rechts)

Das Temperatur-Mikrowellen Programm ist wie folgt: 10 min bei 1000 Watt und 160°C, dann 8 min bei 1000W und 220°C, dann 20 min bei 700 W und 220°C. Am Schluss wurde die Probe wieder bis Raumtemperatur abgekühlt.
Die überstehende gelbe Lösung mit weiß-beigen Rest (hauptsächlich Silikat) wurde dann filtriert und mit destilliertem Wasser auf 250 ml (für die CdTe-Module) bzw. 50 ml (für die CIGS-Module) aufgefüllt.

Blindwerte mit Säureaufschluss ohne Probe-Pulver wurden für jede neue Mikrowelle Vorgang hergestellt, um jeder möglichen Kontamination während der Aufschlussverfahren oder der Analyse zu vermeiden.

## 8.3 Methoden zur quantitativen Erfassung von Schwermetallen

Das Pulver der vier Proben (jeweils CdTe- und CIGS-Module vor und nach der Verbrennung) wurden anschließend auf ihre Zusammensetzung hin analysiert. Die Analyse erfolgte im Fall der Proben aus Burning Brand Test mit einem ICP-OES Spektrometer der Marke HORIBA Jobin Yvon Ultima 2 CHR und im Fall der Proben aus Rauchkammer und Cone Calorimeter mit dem ICP-OES Spektrometer iCAP 6000Series der Firma Thermo Scientific. Zusätzlich wurden die Cadmium- und Tellurkonzentrationen auch mit dem Flammenatomabsorptions-Spektrometer der Firma Perkin Elmer 3300 gemessen.

Die wässrigen Lösungen der jeweiligen Proben werden in die Gasphase überführt und in einem induktiv gekoppelten Plasma zur Emission angeregt. Die Elemente haben ein charakteristisches Emissionsspektrum, welches mit Hilfe eines Monochromators und einem Lichtdetektor aufgenommen wird. Das entsprechende Plasmagerät ist in der in der Abb. 8.13 zu erkennen.



Abb. 8.13: Analytische Verfahren der Atomspektrometrie zur quantitativen und qualitativen Analyse von Elementen in Feststoffen auf Basis von Emission mit einem ICP-OES Spektrometer (oben: der Firma HORIBA Jobin Yvon Ultima 2 CHR sowie Plasmafackel, unten: der Firma Thermo Scientific iCAP 6000Series

Der Vorteil der optischen Emissions-Spektrometrie ICP-OES liegt darin, dass es eine quantitative Methode ist, um Element-Konzentrationen zu bestimmen, unabhängig von der Element-Verbindung, es zählt das reine Element. Das Emissionsspektrum ist charakteristisch für das ausgewählte atomare Element. Dabei wird die gesamte Konzentration von z.B. Cadmium, Tellur umfasst, unabhängig von chemischen Umwandlungen.

### 8.3.1 Voruntersuchungen

Die Cadmium-, Tellur-, Gallium-, Indium- und Selen-Konzentrationen in den PV-Modulen wurden mit Hilfe der ICP-OES-Methode bestimmt. Um eine geeignete Wellenlänge für jedes Elemente auszuwählen, wurden verschiedene Voruntersuchungen gemacht. Für jedes zu analysierende Element wurden die 5 intensivsten Wellenlängen gemessen und ausgewertet.

Zwei kommerzielle ICP-Elementstandards wurden für die Herstellung der s benutzt. Der erste ICP-Standard ist eine multi-element standard solution (Certipur® ICP multielement standard solution VIII in dilute nitric acid) und erhält die Elemente: Cd, Te, Ga, Se, Zn und AI, B, Ba, Be, Bi, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, TI, in der Konzentration 100 mg/L pro Element. Der zweite ICP-Standard erhält Indium (Certipur® Indium ICP Standard in HNO<sub>3</sub>) in der Konzentration 1000 mg/L von Indium. Es wurde vor jede erst eine Indiumlösung auf 1:10 verdünnt und von diese Lösung die herstellt.

Es wurden durch Verdünnung 5 verschiedene Konzentrationen für jedes Element hergestellt (bestimmtes Volumen des jeweiligen ICP-Standards in millipore Wasser). Die jeweiligen Konzentrationen für jedes Element sind: 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 und 0,5 mg/L. Dazu kommt ein Nullwertstandard (millipore Wasser).

Es wurde die Intensität der untersuchten Elemente bei jeder Wellenlänge im Emissionsspektrum bestimmt. Mit Hilfe gerätespezifischer Software wurde dann eine 6-Punkte Kalibrierkurve errechnet. Nicht geeignete Wellenlängen für eine lineare Kalibrierkurve wurden von der Methode ausgenommen.

Mittels Voruntersuchungen von PV-Modul-Proben wurde die Reproduzierbarkeit, Intensität und Überlappung mit anderen Elementen für jede Wellenlänge und jedes Element überprüft.

Dabei wurden auch die Konzentrationen der s erhöht, um die höchste erreichbare, in der Kalibrierung enthaltene, Intensität für die PV-Module Proben zu erhalten.

#### 8.3.2 Ausgewählte Methode

Es wurde eine Wellenlänge pro Element für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Die Auswahl basiert auf den Wellenlängen, die ohne Überlappung mit anderen Elementen charakteristisch für jedes untersuchtes Element ist, und die zusätzlich auch intensiv genug ist (Tab. 8.1).

Element	Cadmium	Tellur	Gallium	Indium	Selen	
Wellenlänge	228,8 nm	214,2 nm	294,3 nm	325,6 nm	196,0 nm	

Tab. 8.1: Ausgewählte Wellenlängen für die ICP-OES zur Beurteilung der Element-Konzentrationen für die Brandrückstandanalytik

Dabei wurden vor jeder ICP-OES Messung neue Kalibrierstandards hergestellt. Die entsprechenden Konzentrationen liegen bei 0,2 - 0,5 - 1,0 - 1,5 - 2 mg/L für jedes Element.

Von jeder Modulart (CdTe, CIGS jeweils beansprucht und unbeansprucht) wurden jeweils 3 verschiedene Proben von demselben Modul untersucht, um aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen. Und jede dieser Proben wurde in 3 Replikaten mittels ICP-OES gemessen. Die angebenden Ergebnisse basieren auf einen Mittelwert von 9 Messungen. Weiterhin ist die Standardabweichung der 9 Messungen aufgezeigt.

## 8.4 Beurteilung der Schwermetallkonzentration in PV-Modulen

Im Falle der Auswertungen der Brandrückstandsproben aus dem Burning Brand Test ergaben sich nur geringfügige Abweichungen der Schwermetallgehalte nach der Verbrennung im Vergleich zu den Originalproben. Die Aufarbeitung dieser Proben und die Messung der Schwermetallkonzentrationen erfolgten wie in Kapitel 8.2.1.1 beschrieben. Die Messergebnisse sind in Abb. 8.14 zusammengestellt.



Abb. 8.14: Ergebnisse der Rückstandsanalytik von CdTe- und CIGS-Modulproben vor und nach dem Burning Brand Test nach IEC 61730-2/Typ A

Man erkennt dabei deutlich, dass nach der Brandbeanspruchung der Proben noch fast die gesamten Schwermetalle im Modul verblieben sind. Dies deutet darauf hin, dass im untersuchten Brandfall mit einer mechanischen Zerstörung der Module nur ein geringer Anteil der toxischen Metalle in die Umwelt freigesetzt wird. Im Mittelwert enthalten die Proben nach der Verbrennung noch ca. 94% der Schwermetalle der Ausgangsproben. Dies korreliert mit früheren Forschungsergebnissen [47], nach denen die Schwermetalle bei der Erhitzung im Glas des Moduls eingeschlossen bleiben und dadurch immobilisiert werden.

Der Cadmium-Gehalt in den Originalproben (6,9 g/m<sup>2</sup>) stimmt sehr gut überein mit den Untergrenzen für Cadmiumgehalte in der Literatur [48] in Höhe von ca. 7 g/m<sup>2</sup>.

#### 8.4.1 Ergebnisse der Rückstandsanalytik von CdTe-Dünnschicht-Modulen

Die Elementkonzentrationen von Cadmium und Tellur aus den Brandrückständen der Rauchkammerversuche sind im Vergleich zu den unbeanspruchten Modulen in Abb. 8.15 und Tab. 8.2 zusammengefasst.

Tab. 8.2: Ergebnisse der ICP-OES Analyse für die CdTe-Dünnschicht-Module vor und nach Brandbeanspruchung in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme, 20 min Brenndauer) nach ISO 5659-2

Element	Cadmium in mg/kg	Tellur in mg/kg	
Wellenlänge	228,8 nm	214,2 nm	
CdTe-Module unbeansprucht	486 ± 56	534 ± 62	
CdTe-Module beansprucht	487 ± 71	512 ± 81	

Im Diagramm ist ein Vergleich der Elementkonzentrationen vor und nach dem Brandversuch zu erkennen. Dabei handelt es sich um einen Mittelwert aus drei Brandversuchen und drei unbehandelten Proben. Die Standardabweichung der Proben innerhalb eines Materials ist zwischen 12-16%, Ursache dafür kann auch die Inhomogenität der Cd-Verteilung im Modul sein. Die Abweichungen sind in den Brandrückständen etwas größer. Beim Vergleich der Mittelwerte kann man zu dem Schluss kommen, dass bei den durchgeführten Brandversuchen das Cadmium vollständig und das Tellur zu 96% im Rückstand verbleibt. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass die CdTe-Module im Vergleich zu den anderen Modularten, eine geringere Rauchentwicklung und Freisetzung von CO<sub>2</sub> und CO sowie einen späteren Entzündungs-Zeitpunkt aufweisen.



Abb. 8.15: Ergebnisse der Rückstandsanalytik von CdTe-Dünnschicht-Modulproben vor und nach Brandbeanspruchung in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, zusätzliche Flamme) nach ISO 5659-2

Berechnet man dagegen den Extrem-Fall, d.h. die höchste gemessene Cadmiumund Tellur-Konzentration des unbeanspruchten Moduls wird mit der niedrigsten gemessenen Konzentration im verbrannten Modul verglichen, dann ergeben sich durchaus Unterschiede, die eine Freisetzung der Elemente in die Umwelt nahe legen würden. Dabei ergibt sich nach Berücksichtigung der Masse der Probe (90,7 g) und des Volumens der Rauchkammer (0,51 m<sup>3</sup>) eine mögliche Freisetzung von Cadmium und Tellur wie folgend:

Tab. 8.3: Ma	ximale Fre	eisetzung	von C	Cadmium u	nd Tellu	ur (unt	er Berücksichtig	ung d	ler höchs	ten gemesse	enen	Cd-,
und Te-Kon	zentration	en der un	bean	spruchten	Module	e und	der niedrigsten	gem	essenen	Konzentrati	onen	der
verbrannten	Module)	während	der	Brandvers	uche ii	n der	Rauchkammer	(50	kW/m <sup>2</sup> ,	Pilotflamme,	20	min
Brenndauer)	nach ISO	5659-2										

Freisetzung	Cadmium	Tellur		
Maximale freigesetzte Element- konzentration in mg/kg	127 mg/kg	165 mg/kg		
Maximale Masse an freigesetzten Element in mg	12 mg	15 mg		
Maximale Konzentration in der Rauchkammer in mg/m <sup>3</sup>	24 mg/m³	29 mg/m³		

Betrachtet man den Mittelwert der gemessenen Schwermetallkonzentrationen vor und nach dem Brand so sind diese fast gleich. Die Messunsicherheiten sowohl der unbeanspruchten als auch beanspruchten Module sind aber relativ groß. Ursache kann die nicht homogene Verteilung der Schwermetalle sein. Weiterhin können systematische Fehler bei der Aufarbeitung der Proben und bei der analytischen Messung auftreten. Weiterhin sind die ermittelten Elementkonzentrationen unabhängig von der chemischen Verbindung, d.h. sowohl reines Cd als auch CdO gehen in die Konzentrationsbestimmung mit ein. Da die verschiedenen Verbindungen aber unterschiedliche Toxizität aufweisen, ist es schwierig die Toxizität im Einzelnen beurteilen zu können. Auch ist ein direkter Vergleich mit PAC-Werten für Cadmium und Tellur (Kapitel 4, Tab. 4.6) nicht möglich. Somit ist bislang nur eine Abschätzung möglich und weitere systematische Schwermetallbestimmungen im Brandrückstand und eine Verringerung der Abweichungen sind notwendig.

### 8.4.2 Ergebnisse der Rückstandsanalytik von CIGS-Dünnschicht-Modulen

Die Ergebnisse der Elementkonzentrationen der CIGS-Dünnschicht-Module vor und nach den beschriebenen Brandversuchen in der Rauchkammer sind in Abb. 8.16 und Tab. 8.4 pro kg Probenmaterial zusammengefasst.

Tab. 8.4: Ergebnisse der ICP-OES Analyse für CIGS-Dünnschicht-Module vor und nach den Brandversuchen in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, Pilotflamme, 20 min Brenndauer) nach ISO 5659-2

Element	Kupfer in mg/kg	Gallium in mg/kg	Indium in mg/kg	Selen in mg/kg	Cadmium in mg/kg
Wellenlänge	324,7 nm	294,3 nm	325,6 nm	196,0 nm	228,8 nm
CIGS-Module unbeansprucht	95 ± 2	34 ± 3	95 ± 5	203 ± 11	15 ± 2
CIGS-Module beansprucht	78 ± 9	30 ± 3	79 ± 10	174 ± 18	13 ± 2

Es wurden jeweils drei verschiedene Proben untersucht. Es zeigten sich für die CIGS-Modulproben Elementverluste von 12 bis zum 18% nach den Brandversuchen: Kupfer (-18%), Gallium (-12%), Indium (-17%), Selen (-14%) und Cadmium (-13%). Auch hier ist die Standardabweichung von den Rückstandproben relativ groß (10-13%). Ursache ist die Inhomogenität in den Brandrückständen, im Vergleich dazu liegt die normale Standardabweichung der unbeschädigten Proben bei nur ca. 5%. Im Vergleich der untersuchten Dünnschicht-Module schneiden die CIGS-Module im Brandverhalten am schlechtesten ab. Dies spiegelt sich auch in der Rauchgaszusammensetzung und in der Rauchentwicklung wieder. Auch zeigen die Ergebnisse der Rückstandsanalytik, dass die Elemente Kupfer, Indium und Selen sich nicht mehr vollständig in den untersuchten Brandrückständen befinden und möglicherweise in die Umwelt emittiert sind.



Abb. 8.16: Ergebnisse der Rückstandsanalytik von CIGS-Dünnschicht-Modulproben vor und nach Brandbeanspruchung in der Rauchkammer (50 kW/m<sup>2</sup>, zusätzliche Flamme) nach ISO 5659-2

Betrachtet man wieder den worst case und berechnet die Freisetzung der Elementkonzentrationen anhand der höchsten gemessenen Konzentration im unbeanspruchten CIGS-Modul und vergleicht diese mit den niedrigsten gemessenen Elementkonzentrationen im verbrannten Modul, so ergibt sich nach Berücksichtigung der Probenmasse (97,8 g) und des Rauchkammervolumens (0,51 m<sup>3</sup>) eine mögliche Freisetzung der Elemente, wie in Tab. 8.5 zu erkennen ist.

Tab. 8.5: Maximale Freisetzung von Kupfer, Gallium, Indium, Selen und Cadmium (unter Berücksichtigung der
höchsten gemessenen Element-Konzentrationen der unbeanspruchten Module und der niedrigsten gemessenen
Konzentrationen der verbrannten Module) während der Brandversuche in der Rauchkammer (50 kW/m <sup>2</sup> ,
Pilotflamme, 20 min Brenndauer) nach ISO 5659-2

Freisetzung	Kupfer	Gallium	Indium	Selen	Cadmium	
Maximale freigesetzte Element- konzentration in mg/kg	28 mg/kg	10 mg/kg	31 mg/kg	58 mg/kg	6 mg/kg	
Maximale Masse an freigesetzten Element in mg	3 mg	1 mg	3 mg	6 mg	0,6 mg	
Maximale Konzentration in der Rauchkammer in mg/m <sup>3</sup>	6 mg/m³	2 mg/m³	6 mg/m³	12 mg/m³	1,2 mg/m²	

# 9 Zusammenfassung

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 durch Brandbeanspruchung von außen 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 Holzwolle 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 brennendes Abtropfen und zeigten kein 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 verlosch 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, SBI-Brandversuche nach DIN EN 13823 mit unterschiedlichen wurden 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 aemessen werden.

Des weiteren wurde ein Testverfahren entwickelt, um das Brandverhalten der PV-Module in einer einzigen Versuchsapparatur 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. Vorteil 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 Drahtkorbtest 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 dienten 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 ventilierten 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 Kalibriermethode 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 größeren Menaen in 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>, HCI, HCN, HBr, Benzen und Phenol nicht eindeutia 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 **CIGS-Module** Glas/Glas-Aufbaus. Untersuchte zeiaten 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 Normfall auf dem Dach und unter freien Himmel angebracht sind und mit zunehmendem Abstand die Konzentrationen der Gaskomponenten abnehmen [5].

Zur die weiteren Beurteilung der Toxizität der Brandprodukte wurden chemisch-analytisch untersucht, um festzustellen. Brandrückstände ob in Dünnschicht-Modulen enthaltene Schwermetalle im Brandfall in die Umwelt emittiert werden können. Mit Hilfe von atomspektroskopischen Methoden (ICP-OES optische Emissionspektrometrie induktiv gekoppeltem Plasma und AAS mit 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 Dachtest-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.

# 10 Ausblick

Die Messwerte der Rückstandsanalysen weisen z.T. hohe Streuungen auf. Aus diesem Grund sind weitere Testreihen notwendig, um die Ergebnisse zu verifizieren. Möglicherweise kann die Standardabweichung durch eine Optimierung der chemischen Aufarbeitung der Proben weiter verbessert werden.

Ein weiteres Ziel wäre die Ausarbeitung des brandtechnologischen Wissens zur Vereinfachung und Vereinheitlichung der Prüfverfahren. Diese sind im Augenblick z.T. unübersichtlich und nicht miteinander vergleichbar. Die Entwicklung eines einfachen Gasbrenner-Verfahrens zur Beurteilung des Brandverhaltens und der Feuerwiderstandsfähigkeit kann die Performance zwischen verschiedene PV-Materialien zeigen, wie unsere Untersuchungen für verschiedene Brandszenarios bereits verdeutlichen. Dennoch müssen bezüglich der Reproduzierbarkeit und einer umfangreicheren Auswahl an PV-Modultypen weitere Testreihen durchgeführt werden. Als Standardbedingung für die Beanspruchung durch Feuer von innen und außen wird die Gasbrennerleistung von 30 kW, ein Abstand Brenner-Modul von 10 cm und ein Eintrittswinkel von 60° vorgeschlagen. Weitere Brandszenarios können

für diesen Versuchsaufbau angepasst werden. Denkbar wäre zum Beispiel die zusätzliche Nutzung von Wind. Der Flammendurchbruch war das bisherige Abbruchkriterium der Gasbrenner-Versuche, es ist aber auch denkbar eine feste Versuchszeit von 15 min, 20 Minuten oder 30 Minuten anzusetzen. Dazu müssten weitere Versuche gemacht werden.

Weiterhin wäre es wichtig, die Module im Betriebszustand zu testen, um die Gefährdung durch elektrische Defekte zu testen. Eigene Untersuchungen durch einen simulierten Kurzschluss einen Brand zu entzünden, schlugen fehl. Erste Versuche konnten keinen Brand initiieren. Eine Evaluierung von möglichen Schäden entstanden durch elektrische Defekte sollten deshalb weiterhin betrieben werden, um die elektrischen Gefährdungen für z.B. Feuerwehrleute und Brandsanierer besser einschätzen zu können. In durchgeführten Brandversuchen zeigte sich zum Beispiel, dass besonders die Anschlussdose frühzeitig schmolz und zur Brandweiterleitung auf Rückseitenfolie beitrug.

In fast allen Fällen wiesen die verbrannten Module nach Beendigung der Brandversuche eine restliche elektrische Spannung auf, die zu einer elektrischen Gefährdung der Menschen beim Löschvorgang oder bei der Brandsanierung führen könnte. Auch hier sollten weitergehende Untersuchungen gemacht werden, wenn es sich nicht nur um ein Modul, sondern um mehrere in Reihe geschaltete Module handelt.

## **11 Literatur**

- [1] www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/bnetza\_2011\_konsolidiert.pdf
- [2] Bildquelle: Aargauer Feuerwehr, SZ
- [3] H. Laukamp: Schadens- und Brandfallanalyse an PV-Anlagen, 1. Deutsche PV-Sicherheitstagung, Berlin, 19.9.2013
- [4] www.sorlarserver.de
- [5] VDI-Richtlinie 3789 Blatt 2: Umweltmeteorologie Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen
- [6] www.solarserver.de/news/news-7381.html (3.4.12), Buch: Solarer Städtebau Vom Pilotprojekt zum planerischen Leitbild, Dagmar Everding, Hrsg.: Dagmar Everding, 2007
- [7] E. Waffenschmidt: 100% erneuerbare Energien mögliche Beiträge der erneuerbaren Energien, 2007, www.waffenschmidt.homepage.t-online.de/100prozent/100prozent-solar-2007-04-06.pdf
- [8] www.berlinerfeuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/Download/2011/Fw\_in\_Zahlen\_deutsch\_April\_2012
- [9] www.feuerwehrmagazin.de/das-heft/aktuelle-feuerwehr-magazin-ausgabe-32010-3-6938
- [10] www.bayerische-staatszeitung.de/staatszeitung/kommunales/detailansichtkommunales/artikel/lebensgefahr-fuer-feuerwehrmaenner.html
- [11] http://photovoltaikversicherung.wordpress.com/2012/04/03/photovoltaikanlage-verursacht-brand-nur-diesolaranlage-brannte
- [12] Grafik: www.cetechnologie.de
- [13] Grafik: www.volker-quaschning.de
- [14] www.solarfirmen.com (30.4.2012), Photon Europe GmbH
- [15] Grafik: Koyo Thermo Systems: www.koyo-thermos.co.jpg
- [16] Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2011 gemäß §65 EEG, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, S. 190ff.
- [17] www.solarserver.de/service-tools/photovoltaik-preisindex.html
- [18] www.globalsolar.com (CIGS)
- [19] www.solaranlagen-portal.com/solarmodule/systeme/vergleich
- [20] Grafik: www.solarsysteme.mbs-nord.de
- [21] www.solarfirmen.com
- [22] http://de.cts-solar.com/pages/produkte/montagesysteme/flachdach-system

www.energie-loesungen.de/energie-loesungen/uploads/temp/Image/Magazin/ESD/Dachkonstruktion\_1

www.haase-heiztechnik.de/conergy-gestellsysteme.html

www.unisolar-potsdam.de/?p=1701

www.globalsolar.com

www.archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/ims/enlighten/issue2/light-energy.html

www.sesol.de, http://ravinic-prototool.com/ravinic/HP%20Ravinic/PV%2004.html

www.swt.de/swt/Integrale?SID=CRAWLER&MODULE=Frontend&ACTION=ViewPage&Page

- [23] Deutscher Wetterdienst (DWD), Solarstrahlungskarte 1981-2000, www.dwd.de
- [24] BDEW, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)
- [25] www.photovoltaik-web.de/quizfragen/entwicklung-der-einspeiseverguetung-pv.html
- [26] www.solarwirtschaft.de
- [27] http://zws-solar.info/zws-funktionsprinzip-einer-thermischen-solaranlage/
- [28] http://www.archiexpo.de/cat/erneuerbare-energien/solar-thermisch-thermische-solaranlagen-AP-1499-\_2.html
- [29] http://www.sovisa.de/produkte%20-%20flachkollektor.html
- [30] http://www.sovisa.de/produkte%20-%20Vollvakuum.html
- [31] http://www.heiz-tipp.de/modules.php?name=Print&art=Content&sid=590
- [32] http://www.junkers.com/endkunde/produkte/produktkategorie\_704
- [33] http://www.energieforum-karlsruhe.de/index.php?id=66
- [34] B. Messerschmidt: Fire testing of low slope roof assemblies an international review. *Proceedings of the* 13th International conference and exhibition Fire and Materials 2013, San Francisco, USA, 28-30 January 2013, 35-46
- [35] DIN 4102-1. Fire behavior of building materials and elements Classification of building materials requirements and testing, May 1998
- [36] DIN 4102-7. Fire behavior of building materials and elements Roofing; requirements and testing, July 1998
- [37] CEN TS 1187. Test methods for external fire exposure to roofs, January 2012
- [38] UL 790 Underwriters Laboratories Inc.. Standard test methods for fire tests of roof coverings. ISBN 0-7629-0960-9, USA 2004
- [39] German Institute for Civil Engineering, DiBt. Building inspection requirements for PV systems. *Proceedings*, Berlin, Germany, 22 October 2012
- [40] German Institute for Civil Engineering, DiBt. Instructions for production, planning and implementation of solar systems, July 2012
- [41] IEC 61730-2. Photovoltaic (PV) module safety qualification Requirements for testing, 2004
- [42] www.tuv.com
- [43] Brandschutzgerechte Planung, Errichtung und Installation von PV-Anlagen, Hrsg.: BSW, DGS, 2011
- [44] German Fire Service Association, DFV. Recommendations for photovoltaic systems, September 2010
- [45] Krüger S, Teichmann B. Systematical fire tests of PV modules research on fire resistance, toxicology and burning behavior. Proceedings of the 13th International fire science & engineering conference Interflam, ISBN 978-0-9556548-9, Egham, UK, 24-26 July 2013, 105-113
- [46] www.photovoltaik.eu/ (Photovoltaik Magazin Heft 4/2011, Artikel: "Blei bleibt beliebt"

- [47] Vasilis M. Fthenakis: Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production, National Photovoltaic Environmental Health and Safety Assistance Center, Environmental Sciences Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY11973, USA, 2003, S. 327
- [48] Berechnung von Immissionen beim Brand einer Photovoltaik-Anlage aus Cadmiumtellurid-Modulen, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011
- [49] www.atlintl.com/doe/teels/teel/Table2.pdf
- [50] http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/chemlist.htm
- [51] M. Saurat, M. Ritthoff: Appraisal of Laboratory Analyses Conducted on CdTe Photovoltaic, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy
- [52] Hartzell G, Priest D N, Switzer W G. Modelling of Toxicological Effects of Fire Gases: li. Mathematical Modeling of Intoxication of Rats by Carbon Monoxide and Hydrogen ISO 19706. Guidelines for methodology for assessing the fire hazard to people; 2007
- [53] Purser DA, Toxicity Assessment of combustion products. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, National Fire Protection Assoziation, Quincy, Massachusetts (2002), Section two, Chapter 6, 83-171
- [54] vfdb-Richtlinie 10/03. Schadstoffe bei Brände, April 2009
- [55] DIN 53436. Producing thermal decomposition products from materials in an air stream and their toxicological testing—Part 5: Method to calculate the toxicity, 2003.
- [56] ISO 19702: Toxicity testing of fire effluents-guidance for analysis of gases and vapours in fire effluents using FTIR gas analysis, 2006
- [41] DIN EN 13823. Reaction to fire tests for building products –Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning, December 2010.
- [57] Krüger S, Deubel JH, Werrel M, et al. Experimental studies on the effect of fire accelerant during living room fires. *Proceedings of the 13th International conference and exhibition Fire and Materials 2013*, San Francisco, USA, 28-30 January 2013, 729-743
- [58] Krüger S, Hofmann A, Berger A, Krause U. Investigations of smoke emission during a car fire. Proceedings of the 12th International fire science & engineering conference Interflam, ISBN 978-0-9541216-6-2, Nottingham, UK, 5-7 July 2010, 1755-1760
- [59] Krüger S, Hofmann A. Analysis of toxic smoke gases using FTIR spectroscopy. *Proceedings of the 9th IAFSS Symposium*, Karlsruhe, Germany, 21-26 September 2008
- [60] Krüger S, Hofmann A. Smoke gas analysis by Fourier transform infrared spectroscopy. Proceedings of the 14th International conference on automatic fire detection AUBE, ISBN: 978-3-940402-01-1, Duisburg, Germany, 8-10 September 2009, 165-172
- [61] Krüger S, Hofmann A, Krause U. Chemical Analysis of combustion products of polymeric materials. MP Materials Testing 2010; 52 (3):124-132
- [62] Krüger S, Hofmann A, Krause U. Chemical analysis of smoke of burning upholstered bus seats. Proceedings of the German Fire Protection Association, ISBN: 978-3-00-03966-2, Leipzig, Germany, 6-8 June 2010, 1-12
- [63] Krüger S, Berger A, Krause U. Chemical-analytical investigation of fire products in intermediate storages of recycling materials, *Fire and Materials* 2012; **36** (3): 165-175