

Schlussbericht

## **Verbundvorhaben:**

**SOLARES BAUEN: PV-HOWOSAN - ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION EINES KOSTENREDUZIERTEN, INDUSTRIELL PRODUZIERTEN PV-EINHÄNGE-FASSADEN-SYSTEMS ZUR SANIERUNG MEHRGESCHOSSIGER WOHNHOCHHÄUSER**

**Teilvorhaben: Entwicklung von maßgeschneiderten Modulen für das RGI System**

Förderkennzeichen: 03SBE0003E

Aschaffenburg, 22.08.2022

Verfasser: Dipl. Ing. Christof Erban – Projektleiter HoWoSan

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren

(Teile dieses Berichts wurden dem Schlussbericht des Verbundkoordinators Fraunhofer IEE Kassel – Autor: Dr. Michael Krause et. al. entlehnt und soweit nötig um die Arbeiten/ Einschätzungen von SUNOVATION ergänzt)



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

<p><b>Zuwendungsempfänger</b></p> <p>SUNOVATION Produktion GmbH          Glanzstoffstrasse 21          63820 Elsenfeld</p>	<p><b>Förderkennzeichen</b></p> <p>03SBE0003E</p>
<p><b>Vorhabenbezeichnung:</b></p> <p>Verbundvorhaben: HoWoSan -</p> <p>ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION EINES KOSTENREDUZIERTEN, INDUSTRIELL          PRODUZIERTEN PV-EINHÄNGE-FASSADEN-SYSTEMS ZUR SANIERUNG MEHRGE-          SCHOSSIGER WOHNHOCHHÄUSER</p> <p>Teilvorhaben: Entwicklung von maßgeschneiderten Modulen für das RGI System</p>	
<p><b>Projektleiter</b></p> <p>Christof Erban  <a href="mailto:Christof.Erb@Sunovation.de">Christof.Erb@Sunovation.de</a></p>	<p><b>Laufzeit des Vorhabens</b></p> <p>01.11.2017 – 31.12.2021</p>
	<p><b>Berichtszeitraum</b></p> <p>01.11.2017 – 31.12.2021</p>

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Einleitung	5
1.2	Projektziele	5
1.3	Ziele im Einzelnen	6
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
<b>2</b>	<b>Normative Anforderungen und Genehmigungsprozess</b>	<b>8</b>
2.1	Allgemeiner Genehmigungsprozess	8
2.2	Generelle Anforderungen an „Photovoltaics in buildings“	10
2.3	Brandschutztechnische Anforderungen	12
2.3.1	Horizontale Brandsperrern	16
2.3.2	SBI-Test und schutzzielorientierte Brandschutzkonzepte	16
2.4	Statische Anforderungen	18
2.5	Elektro- und sicherheitstechnische Aspekte von PV-Fassaden in Hochhäusern	19
	Rahmenbedingungen für die elektrische Installation von PV	20
2.6	Blitzschutz	22
2.7	Wärmeschutz	24
2.7.1	Bauteilnachweis Gebäudesanierung	25
2.7.2	Gesamtbilanzierung Gebäudesanierung und Neubau	26
2.7.3	Mindestwärmeschutz und Wärmebrücken	26
<b>3</b>	<b>Modulares Einhängesystem für industriell vorgefertigte PV-Fassaden</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Realisierungsprozess am Demonstrationsgebäude</b>	<b>29</b>
4.1	Genehmigungsprozess	29
4.2	Brandprüfungen	30
4.2.1	SBI Brandversuch	30
4.2.2	Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10	32
<b>5</b>	<b>Testinstallation am Fraunhofer IEE</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>46</b>
7.1	Zentrale Projektergebnisse	46
7.2	Übertragbarkeit und Ausblick	48
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis (in alphabetischer Reihenfolge)</b>	<b>51</b>

## Verzeichnis der Tabellen

TABELLE 1: DEFINITION DER GEBÄUDEKLASSEN NACH MBO .....	8
TABELLE 2: MÖGLICHKEITEN DES GENEHMIGUNGSPROZESSES FÜR SONDERBAUTEN .....	9
TABELLE 3: ARTEN DER INTEGRATION VON PHOTOVOLTAIK AN GEBÄUDEN .....	12
TABELLE 4: BAUTEIL- UND BAUSTOFFANFORDERUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT DER GEBÄUDEKLASSE NACH HBO .....	14
TABELLE 5: HÖCHSTWERTE DER WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN VON AUßENBAUTEILEN BEI ÄNDERUNG AN BESTEHENDEN GEBÄUDEN [GEG 2020].....	26

## Verzeichnis der Abbildungen

ABBILDUNG 1: BEISPIELHAFTE DARSTELLUNG DES GENEHMIGUNGSPROZESSES FÜR EINE PV- FASSADENKONSTRUKTION .....	9
ABBILDUNG 2: VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG DER NOTWENDIGEN GLASDICKEN .....	11
ABBILDUNG 3: ANFORDERUNG DES NACHWEISVERFAHRENS NACH ENEC IM SANIERUNGSFALL .....	25
ABBILDUNG 4: AUFBAU DES PV-MODULS DER FA. SUNOVATION .....	27
ABBILDUNG 5: ZELLENDISIGN BEI VORGEGEBENEN FLÄCHENMAßEN .....	28
ABBILDUNG 6: SBI BRANDVERSUCH NACH DIN EN 13823. LINKS WÄHREND DER BEFLAMMUNG. RECHTS NACH VERSUCHSENDE .....	31
ABBILDUNG 7: DETAIL SBI BRANDVERSUCH NACH DIN EN 13823 NACH VERSUCHSENDE. ....	32
ABBILDUNG 8: BRANDVERSUCH NACH DIN 4102:20:2017-10. BEI DER MFPA LEIPZIG: VOR VERSUCHSBEGINN .....	34
ABBILDUNG 9: BRANDVERSUCH NACH DIN 4102:20:2017-10. BEI DER MFPA LEIPZIG: WÄHREND DES BRANDVERSUCHS. ....	35
ABBILDUNG 10: BRANDVERSUCH NACH DIN 4102:20:2017-10. BEI DER MFPA LEIPZIG: NACH LÖSCHEN DER PRIMÄRFLAMME. ....	36
ABBILDUNG 11: 3-D-MODELL DER PV-INSTALLATION AM TESTSTAND (QUELLE: RGI).....	38
ABBILDUNG 12: TEILKOMponentEN DER TESTFASSADE .....	39
ABBILDUNG 13: TESTFASSADE AM FRAUNHOFER IEE WÄHREND DER MONTAGE .....	39
ABBILDUNG 14: TESTFASSADE NACH FERTIGSTELLUNG .....	40
ABBILDUNG 15: FERTIGUNGSZEICHNUNG DER PV MODULE FÜR DIE TESTFASSADE IN KASSEL: POSITION 1.....	41
ABBILDUNG 16: FERTIGUNGSZEICHNUNG DER PV MODULE FÜR DIE TESTFASSADE IN KASSEL: POSITION 2.....	41
ABBILDUNG 17: FERTIGUNGSZEICHNUNG DER PV MODULE FÜR DIE TESTFASSADE IN KASSEL: POSITION 3.....	42
ABBILDUNG 18: FERTIGUNGSZEICHNUNG DER PV MODULE FÜR DIE TESTFASSADE IN KASSEL: POSITION 4.....	42
ABBILDUNG 19: POSITION DER MESSFÜHLER IN DER SÜDFASSADE DER TESTFASSADE IN KASSEL.....	43
ABBILDUNG 20: POSITION DER MESSFÜHLER IN DER OSTFASSADE DER TESTFASSADE IN KASSEL.....	43
ABBILDUNG 21: DETAIL DES PV MODULES TYP B6 MIT 3 PT TEMPERATURFÜHLERN ZUR MESSUNG DER DIODENTEMPERATUR UND DEREN UMGEBUNG.....	44
ABBILDUNG 21: DETAIL DES PV MODULES TYP A6 MIT 5 PT TEMPERATURFÜHLERN ZUR MESSUNG DER GLASTEMPERATUR IM GLASRANDBEREICH.....	44
ABBILDUNG 23: SCREENSHOT DES SCHULUNGS- UND MARKETINGFILMES: SBI BRANDVERSUCH NACH DIN EN 13823. ....	45
ABBILDUNG 24: SCREENSHOT DES SCHULUNGS- UND MARKETINGFILMES: BRANDVERSUCH NACH DIN 4102:20:2017-10. <sup>2</sup> .....	46

# 1 Einleitung

## 1.1 Einleitung

Der nachfolgende Schlussbericht beschreibt die von der SUNOVATION Produktion GmbH (SUNOVATION) erarbeiteten Ergebnisse des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts „HOWOSAN - ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION EINES KOSTENREDUZIERTEN, INDUSTRIELL PRODUZIERTEN PV-EINHÄNGE-FASSADENSYSTEMS ZUR SANIERUNG MEHRGESCHOSSIGER WOHNHOCHHÄUSER.

Teilvorhaben: Entwicklung von maßgeschneiderten Modulen für das RGI System“. In dem Projekt soll die technologische Machbarkeit eines PV-Fassadensystems, das den speziellen Belangen eines Wohnhochhauses Rechnung trägt, bestätigt werden.

## 1.2 Projektziele

Das Forschungsprojekt PV-HoWoSan hat die Herausforderungen, die bei der Integration von Photovoltaik in Fassaden von Wohnhochhäusern bestehen aufgegriffen und sich zum Ziel gesetzt, ein kostengünstiges, bauphysikalisch funktionierendes, energetisch und wirtschaftlich optimiertes und in mehrfacher Sicht sicheres PV-Fassadensanierungs-Konzept für ein Wohnhochhaus in Frankfurt zu entwickeln und zu realisieren. Damit sollten die Grundlagen für weitere Projekte zur energetischen Sanierung mit aktivierten Fassaden geschaffen werden. An einem konkreten Wohnhochhaus aus dem Bestand der ABG FRANKFURT HOLDING in Frankfurt a.M., Standort „Im Mainfeld“, sollten die aus Sicht des Bauherrn wichtigsten Fragen – Statik, Brandschutz, gesicherter Vertrieb des erzeugten Stroms, Lichtbogenefahre - untersucht und das System im Rahmen der sowieso anstehenden Sanierungsarbeiten der Fassade am Gebäude installiert werden.

Der Lösungsansatz ist die Integration von PV-Elementen in ein Fassadensystem, das den Übergang zum industriellen Bauen darstellt. Die Bauteile werden industriell gebrauchsfertig und hochpräzise vorproduziert und an der Fassade eingehängt („Einhängen und Fertig“). So werden sehr kurze Bauzeiten erreicht, Gerüste und handwerkliche Fehler weitestgehend vermieden. Durch parametrische Planungsmethoden und BIM (Building Information Modeling) sollen dynamische Skalierungseffekte für zukünftige Projekte erzielt werden, die Unsicherheiten, Planungszeiten- und kosten erheblich senken sowie komplexe Wirtschaftlichkeitsberechnungen ermöglichen („Virtuelles Bauen“). Damit können den beteiligten Akteuren - Fachplaner, Investoren, Behörden, Feuerwehr, etc. - belastbare Lösungen im komplexen Planungsprozess dargestellt werden, die zeitnah aktualisiert und rückgekoppelt werden können. Die statischen

Anforderungen werden unter Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Effekte der PV-Elemente untersucht und konstruktiv gelöst („Dicht aber beweglich“). Lebenszyklusfragen und Rückbau werden adressiert und das System über eine Lebenszyklusanalyse (LCA) ökologisch bewertet. Zur Erfüllung der hohen Brandschutzanforderungen bei Hochhäusern werden diese gebäudespezifisch systematisch in einer Datenbank erfasst, um daraus übertragbare, schutzzielorientierte Brandschutzkonzepte auf Basis der Musterbauordnung (MBO) zu entwickeln. Das elektrische System wird hinsichtlich des hohen Vorfertigungsgrads, der Praktikabilität bei der Installation sowie elektrischer Sicherheitsaspekte (Prüfung von Schutzkleinspannungskonzepten) ausgelegt, so dass von der PV-Fassade keine Gefährdung ausgeht („Sichere PV-Fassade“).

### **1.3 Ziele im Einzelnen**

Die hierbei verfolgten Einzelziele lauten:

- Entwicklung eines kostengünstigen, bauphysikalisch funktionierenden, energetisch und wirtschaftlich optimierten und in mehrfacher Sicht sicheren PV-Fassadenanierungs-Konzeptes für ein Wohnhochhaus
- Kurze Bauzeiten ohne Gerüste durch konstruktive Integration der PV-Fassadenkomponenten in das RGI-Fassadensystem (Einhängen und Fertig)
- Kurze Planungszeiten durch Einbindung in moderne Planungstools, um Planungszeiten und den Planungsprozess zu verkürzen (Virtuelles Bauen, 3-D-CAD-Module, BIM)
- Hohe Qualität durch höchste Genauigkeit (CNC-Fertigung) und Prüfung des bauphysikalischen Verhaltens der PV-Module in der Fassade
- Parametrisches Planen auch für die PV-Systemkomponenten
- Systematische Erfassung der Brandschutzanforderungen bei Hochhäusern unterschiedlicher Nutzung, Ausstattung, Höhe, etc. nach Musterbauordnung MBO und den Landesbauordnungen LBO in einer open-source-Datenbank.
- Erarbeitung von übertragbaren Brandschutzkonzepten beim Einsatz von PV in der Hochhausfassade für mehrere typische Hochhäuser zur Erfüllung der Musterbauordnung (MBO) und Bereitstellung in einer Datenbank
- Optimierung des Verschaltungskonzepts im Hinblick auf die elektrische Sicherheit, Ertrag, Integration ins Hausnetz und den Ressourcen- und Kostenaufwand
- Ökologische Bewertung der PV-Fassade durch LCA und Bereitstellung von aktualisierten Datensätzen

- Bewertung der System- und Netzdienlichkeit von PV-Fassaden im Vergleich zu Aufdachanlagen
- Techno-ökonomische Modelle auf Basis von BIM unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflüsse auf den Wert einer PV-Fassade (Unsicherheiten in der Lastentwicklung, Änderungen des Nachfrageverhaltens durch andere Lastgruppen, unterschiedliche Komponentenlebensdauer, etc.)
- Einbindung in die Entwurfs- und Genehmigungsplanung für das Sanierungsobjekt „Im Mainfeld“ und Umsetzung im Rahmen der Sanierungsmaßnahme
- Wissenschaftliches Monitoring zur Bewertung der Sanierung mit der PV-Fassade unter Berücksichtigung thermischer, elektrischer und raumklimatischer sowie ökonomischer Aspekte
- Sicherung des Vertriebs des erzeugten PV-Stroms im Gebäude
- Einbindung der Mieter in den Planungsprozess und Nutzerschulung
- Leitfaden zur Darstellung der komplexen Planungsprozesse

## 1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektpartner des Projekts HoWoSan sind:

- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
- Universität Kassel
- ABG FRANKFURT HOLDING ,GmbH
- SUNOVATION Produktion GmbH

Assoziierte Partner:

- Phoenix Contact GmbH & Co. KG
- Stäubli Electrical Connectors.

Darüber hinaus war eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen nicht vorgesehen und ist nicht erfolgt.

## 2 Normative Anforderungen und Genehmigungsprozess

### 2.1 Allgemeiner Genehmigungsprozess

Neben der Art der geplanten Baumaßnahme und des zu verwendenden Bauprodukts ist für die Identifikation des notwendigen Ablaufs des Genehmigungsprozesses für Baumaßnahmen die Einordnung des Gebäudes in die entsprechende Gebäudeklasse eine zentrale Randbedingung. Die Einordnung ist hierbei innerhalb der Musterbauordnung MBO geregelt und richtet sich, wie in Tabelle 1 dargestellt, in erster Linie nach der Gebäudehöhe. Als Höhe ist das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses definiert, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist. Die Grundflächen der Nutzungseinheiten als weitere Zuordnungsgröße sind die Brutto-Grundflächen, bei denen Flächen in Kellergeschossen nicht berücksichtigt werden.

Klasse		Gebäudehöhe	Brutto-Grundflächen
1	a. Freistehende Gebäude	$H \leq 7 \text{ m}$	Max. 2 Nutzungseinheiten $\leq 400 \text{ m}^2$
	b. Freistehende land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude		
2	Nicht freistehende Gebäude	$H \leq 7 \text{ m}$	Max. 2 Nutzungseinheiten $\leq 400 \text{ m}^2$
3	Sonstige Gebäude	$H \leq 7 \text{ m}$	
4	Gebäude	$H \leq 13 \text{ m}$	Nutzungseinheiten $\leq 400 \text{ m}^2$
5	sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude mit $H \leq 22 \text{ m}$		
Hochhäuser (Sonderbauten)		$H > 22 \text{ m}$	

Tabelle 1: Definition der Gebäudeklassen nach MBO

Konstruktive Gebäude mit mehr als 22 m Höhe gehören zu den Sonderbauten. An Sonderbauten können erhöhte Anforderungen gestellt, aber auch Erleichterungen zugelassen werden. Für Hochhäuser gilt in Ergänzung zur Musterbauordnung die Muster-Hochhausrichtlinie (MHRR) (Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern), für die im Falle des Demonstrationsgebäudes in PV-HoWoSan das Land Hessen eine eigene Hessische-Hochhaus-Richtlinie (H-HHR) formuliert hat. Im Gegensatz zu sonstigen Bauvorhaben werden bei Sonderbauten der Brandschutz und die Standsicherheit von der Bauaufsicht oder einem von ihr beauftragten Sachverständigen geprüft. Beispielhaft für den Genehmigungsprozess für Standsicherheit und Brandschutz sind die Möglichkeiten für Sonderbauten in Tabelle 2 dargestellt. Ergänzend hierzu zeigt Abbildung 1 beispielhaft den vollständigen Genehmigungsprozess im Spannungsfeld Bauherr, Nachweisberechtigter und der Bauaufsichtsbehörde.

		Bauvorlagen	Prüfung / Bescheinigung	Überwachung Bauausführung
Standsicherheit	entweder	<u>Fachplaner</u> (§49 Abs. 2 HBO)	Bauaufsichts- behörde	Bauaufsichtsbe- hörde
	oder	Entwurfsverfas- ser mit Bauvorlagebe- rechtigung	Prüfingenieur im Auftrag der Bauaufsichtsbehör- de	Prüfingenieur im Auftrag der Bauaufsichtsbehör- de
Brandschutz	entweder	Nachweisbe- rechtigter <u>Brandschutz</u> <u>Fachplaner</u> (§49 Abs. 2 HBO)	Bauaufsichts- behörde	Bauaufsichts- behörde
	oder	Entwurfsverfas- ser mit Bauvorlagebe- rechtigung		

Tabelle 2: Möglichkeiten des Genehmigungsprozesses für Sonderbauten

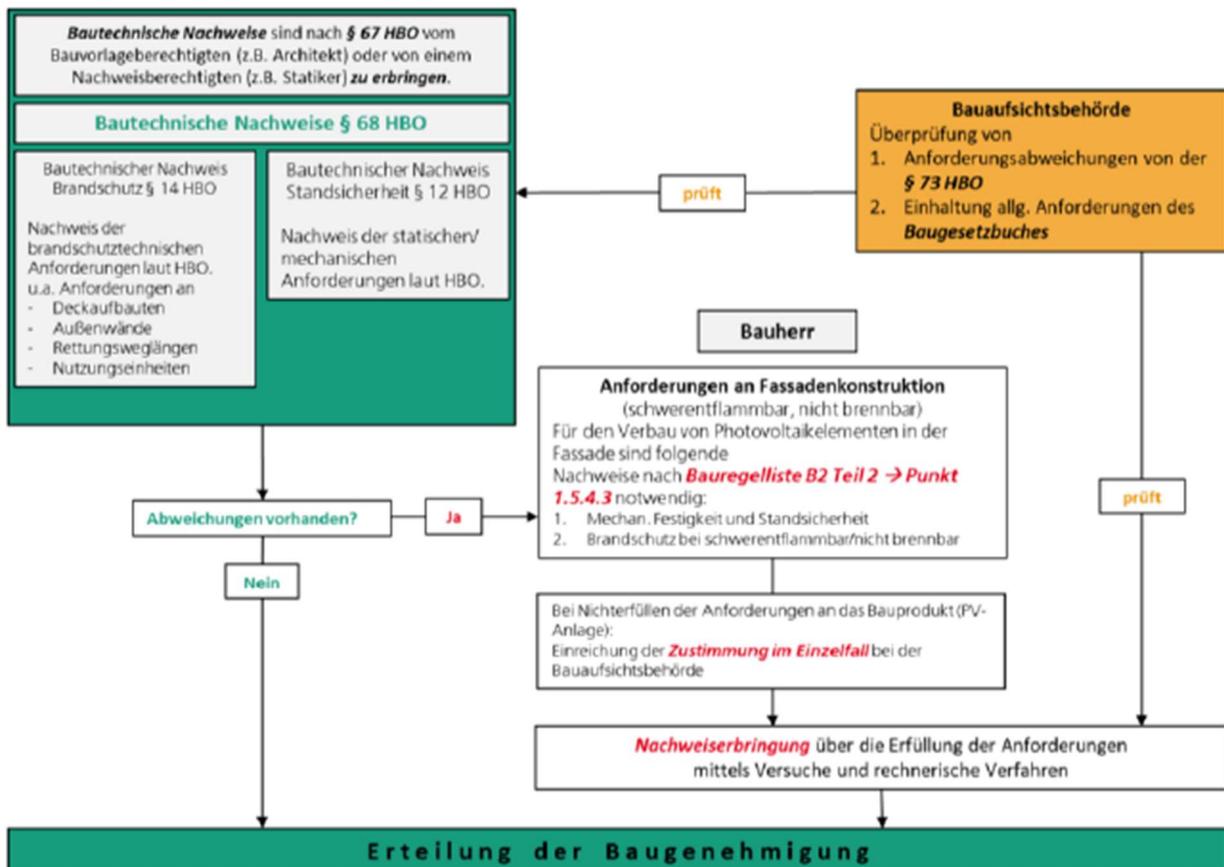


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung des Genehmigungsprozesses für eine PV-Fassadenkonstruktion

## 2.2 Generelle Anforderungen an „Photovoltaics in buildings“

Stellt ein Photovoltaikmodul ein Bauprodukt im Sinne des Deutschen Baurechts dar, so wird von Gebäudeintegrierter oder Bauwerksintegrierter Photovoltaik (BIPV) gesprochen. Im Gegensatz zu z.B. PV-Freiflächenanlagen – für die gemäß B 3.2.1.25 der MVVTB eine Ausnahmeregelung gilt – unterliegen die PV-Systeme dem Bauordnungsrecht, welches sich mit den baulich-technischen Anforderungen an Bauvorhaben befasst und in erster Linie die Abwehr von Gefahren, die von der Errichtung, dem Bestand und der Nutzung baulicher Anlagen ausgehen, regelt. Die Anforderungen sind dabei in den Landesbauordnungen definiert. Die für BIPV relevanten Abschnitte in der Musterbauordnung (MBO) sind:

- MBO § 14: Brandschutz
- MBO §§ 16b bis 25: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten. Prüfprotokoll gem. MVV TB beachten
- MBO § 28 (3): Brandverhalten PV-Module in/an Fassaden
- MBO § 32 (1): harte Bedachung MBO § 32 (5): 2.a) Abstände von PV-Modulen auf Dächern
- MBO § 40: Leitungsanlagen, Installationsschächte und –kanäle.

Neben den Aspekten des Bauordnungsrechts sind energierelevante Anforderungen zu beachten. Diese beinhalten:

- EnWG § 49 (1): Anforderungen an Energieanlagen –Gewährleistung technischer Sicherheit
- EEG: Anforderungen an Messtechnik und Netzanschluss
- DIN 18234, Teile 1–4: Baulicher Brandschutz großflächiger Dächer
- DIN 18516-1, MVV TB, B 2.2.1: für hinterlüftete Außenwandbekleidungen und Unterkonstruktionen
- IEC 61730-2, PV-Module: Gemäß MVV TB als Grundlage für die CE-Kennzeichnung nach Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU
- DIN VDE 0100-712: Errichten von Niederspannungsanlagen
- DIN EN 50618 (VDE 0283-618): Kabel und Leitungen.

Als elektrisches Betriebsmittel unterliegen BIPV-Systeme der Niederspannungsdirektive LVD (low voltage directive) 2014/35/EU. Als Teil eines elektrischen Systems mit schnell schaltenden Schaltelementen sind die Anforderungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit EMC Directive 2014/30/EU (electro magnetic compatibility) einzuhalten. Als Gebäudekomponente ist die

Einhaltung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten CPR (construction product regulation) relevant. Als Beitrag zur Gebäude-Performance formuliert auf Europäischer Ebene die EPBD (European Performance Directive For Buildings ) sowie auf deutscher Ebene das Gebäudeenergiegesetz die Anforderungen an die Energieeffizienz. Als elektrisches Betriebsmittel definiert die WEEE (European Directive on waste electrical and electronic equipment) Anforderungen. Neben den Anforderungen der Musterbauordnung MBO ist zusätzlich die Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen MVVTB zu beachten. Diese ist eine bauordnungsrechtliche relevante Veröffentlichung des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt. Innerhalb der MVVTB werden PV-Module als Bauprodukt kategorisiert und dem Glasbereich zugeordnet. Das hat zur Folge, dass für die Bemessung der Glasdicken die MVV-TB: Bemessungs- und Anwendungsregeln, DIN 18008, Teile 1-5 anzuwenden sind. Dies führt einerseits zu – gegenüber Standardsolarmodulen – deutlich stärkeren Glasdicken. Andererseits kann Glas berechnet werden. → Für das Produkt gelten die Produktnormen als Leistungsbeschreibung in harmonisierten Normen – also in Deutschland ausschließlich die EN 61730. Daneben können Verwendbarkeitsnachweise erstellt werden. Abbildung 2 stellt die beiden Verfahren – als Bauprodukt resp. als elektrisches Produkt – zur Ermittlung der notwendigen Glasdicken gegenüber.

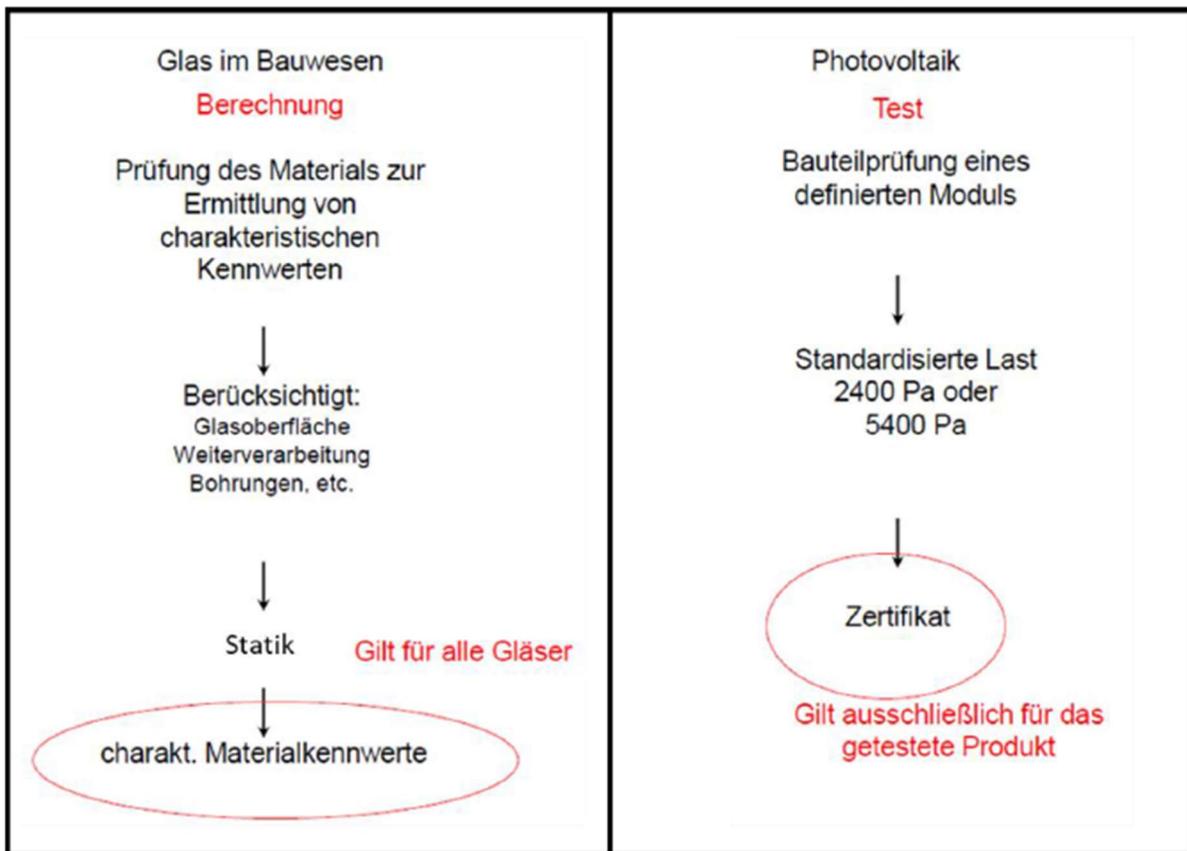


Abbildung 2: Verfahren zur Ermittlung der notwendigen Glasdicken

Im Bereich der Gebäude wird die Glasdicke für jedes benötigte PV-Modul unter Berücksichtigung des verwendeten Materials und dessen Weiterverarbeitung berechnet. Im Bereich der Photovoltaik muss jedes Produkt mechanisch geprüft werden, das gemäß Retesting Guideline IEC TS 62915 vom ursprünglich geprüften Modul abweicht. Für BIPV Module werden in Europa Anforderungen in der Norm EN 50583 „Photovoltaics in buildings“ in Abhängigkeit der

Einbaugegebenheiten formuliert. Hierbei werden die nachfolgenden 5 Kategorien eines möglichen Einbaus unterschieden.

Kategorie	Name
A: Sloped, roof-integrated, not accessible from within the building	
B: Sloped, roof-integrated, accessible from within the building	
C: Non-sloped (vertically) mounted, not accessible from within the building	
D: Non-sloped (vertically) mounted accessible from within the building	
E: Externally integrated, accessible or not accessible from within the building	

Tabelle 3: Arten der Integration von Photovoltaik an Gebäuden

Außerhalb von Europa ist die IEC 62093 „Photovoltaics in buildings“ für BIPV maßgebend. In der bisherigen Praxis basiert das CE Kennzeichen auf PV Modulen auf der „low voltage directive“ und nicht der „construction product directive“ der EU, da lediglich die elektrische Norm EN 61730 als harmonisierte Norm vorliegt. Die Überarbeitung der EN 50583 erfolgt seit Sommer 2021. Eine allgemeine Zusammenstellung zu bauordnungsrechtlichen Vorgaben zu Produkt und Anwendungsregeln für BIPV ist in [Allianz BIPV\_2 2021] zu finden.

### 2.3 Brandschutztechnische Anforderungen

Gemäß § 3 der Musterbauordnung (MBO) sind „Anlagen [...] so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden“. Auf bauliche Anlagen bezogen spezifiziert § 14 der MBO diesbezüglich, dass diese so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind. Bezüglich Baustoffe und Bauteile wird entsprechend § 29 der Hessischen Bauordnung HBO hinsichtlich ihres Brandverhaltens unterschieden in:

Brandverhalten von Baustoffen:

- nichtbrennbar
- schwerentflammbar
- normalentflammbar

Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen:

- feuerbeständig
- hochfeuerhemmend
- feuerhemmend

Die Feuerwiderstandsfähigkeit bezieht sich bei tragenden und aussteifenden Bauteilen auf deren Standsicherheit im Brandfall, bei raumabschließenden Bauteilen auf deren Widerstand gegen die Brandausbreitung. Bauteile werden zusätzlich nach dem Brandverhalten ihrer Baustoffe unterschieden in:

- Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen,
- Bauteile, deren tragende und aussteifende Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und die bei raumabschließenden Bauteilen zusätzlich eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nicht brennbaren Baustoffen haben,
- Bauteile, deren tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen und die allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen haben,
- Bauteile aus brennbaren Baustoffen.
- 

**§ 28 MBO regelt die Ausführung von Außenwänden wie folgt:**

1. Außenwände und Außenwandteile wie Brüstungen und Schürzen sind so auszubilden, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist.
2. Nichttragende Außenwände und nichttragende Teile tragender Außenwände müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen; sie sind unterhalb der Hochhausgrenze aus brennbaren Baustoffen zulässig, wenn sie als raumabschließende Bauteile feuerhemmend sind. Satz 1 gilt nicht für brennbare Fensterprofile und Fugendichtungen sowie brennbare Dämmstoffe in nichtbrennbaren geschlossenen Profilen der Außenwandkonstruktion.
3. Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein;

Unterkonstruktionen aus normalentflammbaren Baustoffen sind zulässig, wenn die Anforderungen nach Absatz 1 erfüllt sind. Balkonbekleidungen, die über die erforderliche Umwehrungshöhe hinaus hochgeführt werden, müssen schwerentflammbar sein.

4. Bei Außenwandkonstruktionen mit geschossübergreifenden Hohl- oder Lufträumen wie Doppelfassaden und hinterlüfteten Außenwandbekleidungen sind gegen die Brandausbreitung besondere Vorkehrungen zu treffen.
5. Die Absätze 2 und 3 gelten nicht für Gebäude der Gebäudeklassen 1 bis 3.

Maßgebend für die Mindestanforderungen an Bauteile und Baustoffe ist die jeweilige Gebäudeklasse des Objekts (vgl. Tabelle 4), an dem PV installiert werden soll sowie an das Bauteil, auf das sich die Baumaßnahme bezieht. Für BIPV relevante Gebäudeteile sind Dächer und Fassaden.

Bezogen auf tragende Bauteile sowie Außenwände und Außenwandteile gelten nach Anlage 1 der Hessischen Bauordnung HBO folgende Bauteil- und Baustoffanforderungen (§13 Abs. 2 Satz 1).

	Gebäudeklassen	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
	<b>Bauteile- und Baustoffe</b>					
<b>1</b>	<b>tragende und aussteifende Wände, Pfeiler und Stützen ( § 25 Abs. 1 ) <sup>1</sup></b>					
1.1	in Geschossen, ausgenommen Keller- und Dachgeschosse	B 2	F30-B	F30-B	F60-A oder F90-BA	F90-A
1.2	in Kellergeschossen	F30-B	F30-B	F30-B	F90-A	F90-A
1.3	in Dachgeschossen,					
1.3.1	wenn darüber Aufenthaltsräume möglich sind	B 2	F30-B	F30-B	F60-A oder F90-B	F90-BA
1.3.2	wenn darüber keine Aufenthaltsräume möglich sind	B 2	B 2	B 2	B 2	B 2
<b>2</b>	<b>Außenwände, Außenwandteile ( § 25 Abs. 2 )</b>					
2.1	nichttragende Außenwände und nichttragende Teile tragender Außenwände	B 2	B 2	B 2	A oder W30-B <sup>2</sup>	A oder W30-B <sup>2</sup>
2.2	Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen einschließlich Dämmstoffe und Unterkonstruktionen	B 2	B 2	B 2	B 1 <sup>3</sup>	B 1 <sup>3</sup>
2.3	Balkonbekleidungen, die über die erforderliche Umwehrungshöhe hinaus hochgeführt werden	B 2	B 2	B 2	B 1	B 1

Tabelle 4: Bauteil- und Baustoffanforderungen in Abhängigkeit der Gebäudeklasse nach HBO

Die Feuerwiderstandsfähigkeit bezieht sich bei tragenden Bauteilen auf deren Standsicherheit im Brandfall, bei trennenden Bauteilen auf deren Widerstand gegen die Ausbreitung von Feuer und Rauch. Folgende Bezeichnungen sind hierfür relevant:

- F30/W30/F60/T30: Feuerwiderstandsklasse des jeweiligen Bauteils nach seiner Feuerwiderstandsdauer in Minuten (feuerhemmend)
- F90/T90: Feuerwiderstandsklasse des jeweiligen Bauteils nach seiner Feuerwiderstandsdauer in Minuten (feuerbeständig)
- A: nichtbrennbare Baustoffe (A 1) und nichtbrennbare Baustoffe mit brennbaren Bestandteilen (A 2)
  - AB: in wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen
  - BA: Bauteile, deren tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen und die allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen haben.
- B brennbare Baustoffe
  - B 1 schwerentflammbare Baustoffe
  - B2 normalentflammbare Baustoffe

Für die als Sonderbau klassifizierte Hochhäuser gilt die Muster-Hochhaus-Richtlinie, auf deren Basis in Hessen eine eigene Hochhausrichtlinie (H-HHR) als Anlage 26 der Hessischen Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (H-VVTB) definiert wurde. In der H-HHR wurden abweichende Anforderungsniveaus speziell im Hinblick auf den Brandschutz definiert. Beispielsweise müssen nichttragende Außenwände und nichttragende Teile tragender Außenwände in allen ihren Bestandteilen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen<sup>1</sup>. Dies beinhaltet auch, dass durch eine gegebenenfalls geplante Integration von Solaranlagen diese Anforderung nicht aufgeweicht werden darf. Das zugrundeliegende Ziel hierbei muss immer die Gewährleistung der Standsicherheit im Brandfall sein.

Hinsichtlich der Integration von Solaranlagen auf Dächern legt § 32 der MBO zu Abständen von Brandwänden fest: „Solaranlagen sind so anzuordnen und herzustellen, dass Feuer nicht auf andere Gebäudeteile und Nachbargrundstücke übertragen werden kann. Von Brandwänden und von Wänden, die anstelle von Brandwänden zulässig sind, müssen Solaranlagen mindestens 1,25 m entfernt sein, wenn sie nicht durch diese Wände gegen Brandübertragung

<sup>1</sup> Dies gilt nicht für Fensterprofile, Dämmstoffe in nichtbrennbaren geschlossenen Profilen, Dichtstoffe zur Abdichtung zwischen Verglasungen und Traggerippen, Kleinteile ohne Tragende Funktion, die nicht zur Brandausbreitung beitragen.

geschützt sind.“ Gemäß Musterbauordnung §28 MBO muss die Außenwandbekleidung in den Gebäudeklassen 1-3 mindestens „normalentflammbar“ sein, während in den Gebäudeklassen 4 und 5 mindestens „schwerentflammbar“ gefordert wird (demnach ist Holz als Unterkonstruktion zulässig). Die Klassifizierung des Brandverhaltens des Bekleidungsmaterials gemäß DIN EN 13501-1 beinhaltet die Interaktion aller Systemkomponenten Dämmung/ Unterkonstruktion oder der Fassadentafeln. Es wird also das Zusammenspiel des Systems betrachtet und nicht das Brandverhalten einzelner Komponenten. Der Nachweis muss seit 2006 durch eine Bauteilprüfung belegt werden.

### **2.3.1 Horizontale Brandsperren**

Gemäß § 28 Abs. 4 der Musterbauordnung 2012 (MBO) sind bei Außenwandkonstruktionen mit geschossübergreifenden Hohl- oder Lufträumen, wie z. B. vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (VHF), gegen die Brandausbreitung besondere Vorkehrungen zu treffen. Nach [FVHF 2016] sind in jedem zweiten Geschoss horizontale Brandsperren im Hinterlüftungsraum anzuordnen. Die Brandsperren sind zwischen der Wand und der Bekleidung einzubauen. Die Größe der Öffnungen in den horizontalen Brandsperren ist insgesamt auf 100 cm<sup>2</sup>/lfm Wand zu begrenzen. Die Öffnungen können dabei als gleichmäßig verteilte Einzelöffnungen oder als durchgehender Spalt angeordnet sein. Bei einer außenliegenden Wärmedämmung genügt der Einbau zwischen dem Dämmstoff und der Bekleidung, wenn der Dämmstoff im Brandfall formstabil ist und einen Schmelzpunkt von > 1.000 °C aufweist. Horizontale Brandsperren müssen über mindestens 30 Minuten hinreichend formstabil sein. Ohne weiteren Nachweis gilt dies für Stahlbleche mit einer Dicke von  $d \geq 1$  mm, wenn sie in Abständen von  $\leq 0,6$  m verankert sind. Verankerungsabstände von bis zu 0,9 m sind zulässig, bei mindestens 2-fach gekanteten Stahlblechen mit einer Dicke von  $d \geq 1$  mm. Die Stahlbleche als Brandsperre sind an den Stößen mindestens 30 mm zu überlappen. Die eingesetzten Verbindungsmittel müssen aus Stahl sein. Auf die Verwendung von horizontalen Brandsperren kann bei hinterlüfteten Außenwandverkleidungen verzichtet werden, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist: 1. bei öffnungslosen Außenwänden, 2. wenn durch die Art der Fensteranordnung eine Brandausbreitung im Hinterlüftungsspalt ausgeschlossen ist (z. B. durchgehende Fensterbänder, geschossübergreifende Fensterelemente) und 3. bei Außenwänden mit hinterlüfteten Bekleidungen, die einschließlich ihrer Unterkonstruktionen, Wärmedämmung und Halterungen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen, wenn der Hinterlüftungsspalt im Bereich der Laibung von Öffnungen umlaufend im Brandfall über mindestens 30 Minuten formstabil (z. B. durch Stahlblech mit einer Dicke von  $d \geq 1$  mm) verschlossen ist. Eine Darstellung der wesentlichen brandschutztechnischen Anforderungen für BIPV ist in der Checkliste Brandschutz der Allianz Bauwerksintegrierte Photovoltaik zu finden [Allianz BIPV 2021].

### **2.3.2 SBI-Test und schutzzielorientierte Brandschutzkonzepte**

Die Verwendung von Photovoltaik an Hochhäusern stellt brandschutztechnisch i. d. R. eine Abweichung von den Anforderungen der Musterbauordnungen sowie insbesondere den Hochhausrichtlinien dar, da die in PV-Modulen verwendeten Kleber und Folien sowie die Kabelführungen die Anforderung „nicht brennbarer Baustoffe“ im ersten Ansatz nicht einhalten können. Um die Verwendung von PV auch in Hochhäusern zu ermöglichen, stehen daher zwei (auch kombinierbare) Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Nachweis, dass sich das Bauprodukt wie ein „nichtbrennbares“ Produkt verhält
2. Die Entwicklung eines schutzzielorientierten Brandschutzkonzepts

Für den Nachweis der „Nicht-Brennbarkeit“ definiert die EN 13501-1 als paralleles Klassifizierungssystem zur deutschen DIN 1402-1, dass Baustoffe, die der Baustoffklasse A zugeordnet werden können, keinen eigenen Beitrag zum Brand leisten. Ein wichtiges Hilfsmittel dieser Klassifizierung stellt der Single Burning Item-Test (SBI-Test) dar, welcher den Beginn eines Brandes simuliert, um das Brandverhalten von Bauprodukten zu beurteilen. Die zentralen, beim SBI-Test ermittelten Parameter sind die Flammenausbreitung, die Entzündbarkeit, die Menge an Hitze, Rauch und giftigen Gasen und ob ein Produkt schmilzt, abtropft oder verkohlt. Bei einem SBI-Test wird eine bestimmte Kombination von Baustoffen getestet, die im umzusetzenden System zur Endanwendung kommt. Die Prüfergebnisse sind daher nur für diesen spezifischen Konstruktionsaufbau gültig. Eine Übertragung der Prüfergebnisse auf andere Konstruktionsaufbauten ist möglich, wenn die Klassifizierung des Brandverhaltens nachweislich unverändert ist. Hierfür sind in der EN 13501-1 vordefinierte enge Regeln für den Anwendungsbereich als Teil der Harmonisierten Technischen Spezifikation eines Bauproduktes beschrieben. Alternativ bzw. ergänzend zu einem SBI-Test besteht auch bei Sonderbauten die Möglichkeit, das Instrument der schutzzielorientierten Brandschutzkonzepte einzusetzen. Hierzu definiert §17 MBO, dass bauliche Anlagen so beschaffen sein müssen, dass

- der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorgebeugt werden muss,
- die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

Daneben lassen sich nach [Schneider 2000] aus der MBO weitere Schutzziele ableiten:

Die Gebäudenutzer sollen das Gebäude, ohne in gefährliche Situationen zu geraten, verlassen können.

- Die Feuerwehr muss durch vorbeugende Brandschutzmaßnahmen in der Lage sein,
  - wirksam zu retten,
  - die Ausbreitung eines Brandes zu verhindern,
- einen Großbrand zu vermeiden,
- schädliche Auswirkungen auf die Nachbarschaft zu vermeiden.

Auf Basis einer Nutzungsanalyse, der Schutzzieldefinition und der Brandgefahrenermittlung resultieren Planungskriterien, aus denen Maßnahmen zum vorbeugenden Brandschutz ermittelt werden können. Diese beziehen sich auf

- Baulichen Brandschutz
- Anlagentechnischen Brandschutz.

Unter baulichem Brandschutz sind beispielsweise die Zugänglichkeit der baulichen Anlage vom öffentlichen Straßenraum, Rettungswege, Anordnungen von Brandabschnitten, Abschluss von Öffnungen in abschnittsbildenden Bauteilen und die Feuerwiderstandsklasse von Bauteilen und die Brennbarkeit von Baustoffen zu verstehen. Dem anlagentechnischen Brandschutz sind Brandmeldeanlagen, automatische Löschanlagen, Entrauchungsanlagen, Blitz- und Überspannungsschutzanlagen oder auch die Sicherheits- und Notbeleuchtung.

Innovationen in diesem Bereich arbeiten beispielsweise bei Geschossdeckenöffnungen mit einer Kombination aus Hochdruck-Wasserdampf und gezielter Luftführung, so dass diese Öffnungen für die Weiterleitung von Temperatur und Brandgasen geschlossen werden kann [Flock 2013]. Solche Systeme wären beispielsweise übertragbar auf Hinterlüftungsbereiche von vorgehängten PV-Fassadensystemen und könnten dadurch ein schutzzielorientiertes Brandschutzkonzept unterstützen. Zentraler Punkt für die Erarbeitung eines schutzzielorientierten Brandschutzkonzepts ist eine enge Abstimmung mit den zentralen Stakeholdern der Baumaßnahme. Hierzu zählen insbesondere die Untere Bauaufsicht, die Feuerwehr, der Brandschutzbeauftragte, das Bauunternehmen / der Gebäudeeigentümer, der mit der Baumaßnahme beauftragte Architekt, ein Tragwerksplaner sowie der Modul- bzw. PV-Fassadenhersteller. Ein Ergebnis dieser frühen Abstimmungen kann dabei z.B. sein, dass spezielle Prüfleistungen vor Fertigstellung und Einreichung des Brandschutzkonzepts gefordert werden. Hierzu zählen z.B. Produkttests, z.B. SBI-Tests, aber insbesondere auch Großbrandversuche, in denen die Fassadensituation inklusive der anzubringenden PV-Anlage möglichst detailgetreu in einem größeren, z.B. geschossübergreifenden, Maßstab nachgebildet wird. Je nach Situation am Gebäude können für Großbrandversuche unterschiedliche Prüfzenarien mit unterschiedlichen Beflammungssituationen gefordert werden. Typische Situationen variieren hier von einem einfachen Zimmerbrand bis zu einem Containerbrand vor der Fassade, die sich insbesondere in der auf das Bauteil einwirkenden Energiemenge des Primärbrandes unterscheiden.

## **2.4 Statische Anforderungen**

Neben den brandschutztechnischen Anforderungen verfolgen die statischen Anforderungen ein weiteres wichtiges Schutzziel bei Baumaßnahmen. Nach § 12 der MBO muss jede bauliche Anlage im Ganzen und in ihren einzelnen Teilen für sich allein standsicher sein. Darüber hinaus darf die Standsicherheit anderer baulicher Anlagen und die Tragfähigkeit des Baugrundes der Nachbargrundstücke nicht gefährdet werden. Der Standsicherheitsnachweis für ein zu verbauendes Fassadensystem ist, inklusive aller Einzelnachweise, in einer prüffähigen Form auf Grundlage der geltenden Normen und Richtlinien vom Fachplaner zu erbringen. Der Standsicherheitsnachweis für Fassadenbekleidungen hat insbesondere die statische Berechnung der Unterkonstruktion, der Bekleidungs-elemente und deren Befestigung sowie der Verankerungs- und Verbindungselemente zu beinhalten. Für Maßabweichungen der raumabschließenden Wand ist ein Zuschlag von mindestens 20 mm zur geplanten Ausladung der Unterkonstruktion (Wärmedämmung + Hinterlüftungsraum) anzusetzen. Werden größere Ebenheitsabweichungen festgestellt, müssen diese beim Standsicherheitsnachweis berücksichtigt werden. Die Randabstände der Verankerungs-, Verbindungs- und Befestigungselemente sind einzuhalten.

- Folgende Einwirkungen sind zu berücksichtigen:
- Eigenlasten nach DIN EN 1991-1-1,
- Windlasten nach DIN EN 1991-1-4,
- Schnee- und Eislasten in besonders beanspruchten Teilbereichen,
- behinderte Formänderungen/Zwängungen,
- Sonderlasten, z. B. Anbauteile.

Bei einer durchlässigen Außenwandbekleidung kann, unter Berücksichtigung der DIN 18516-1, Abschnitt 5 in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4 mit dem nationalen Anhang für Deutschland, der im Hinterlüftungsraum entstehende Staudruck bei der Windlastermittlung berücksichtigt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die folgenden Punkte eingehalten werden:

- Tiefe Hinterlüftungsraum < 100 mm,
- Fugenanteil  $\geq 0,75$  % (Fläche der offenen Fugen/Fläche der Außenwandbekleidung),
- mit einer Windsperre an den vertikalen Gebäudeecken reduziert sich die zu berücksichtigende Windlast.

Für den Fall, dass die Fassadenkonstruktion im eigentlichen Sinne nicht Bestandteil des Tragwerks des Gebäudes ist, muss nicht zwingend ein Standsicherheitsnachweis geführt werden. Für PV-Fassaden (insbesondere in Hochhausanwendungen) muss jedoch dafür gesorgt werden, dass sich keine Bauteile ablösen (gerade auch im Brandfall), so dass die statische Begutachtung daher hierauf ein besonderes Augenmerk legen muss und somit wieder Bestandteil der Baugenehmigung wird.

## **2.5 Elektro- und sicherheitstechnische Aspekte von PV-Fassaden in Hochhäusern**

Beim Bauen im Bestand stellt die sorgfältige Analyse und Bewertung der Bestandssituation und der bestehenden Nutzung eine wesentliche Voraussetzung für die Konzeption, Genehmigung und Ausführung einer Photovoltaik-Fassade dar. Eine Photovoltaik-Fassade gilt üblicherweise als ergänzende Baumaßnahme, die einer Neubewertung der Gesamtsituation bedarf und unter Umständen den Bestandsschutz, z.B. hinsichtlich Brandschutzanforderungen, aushebelt. Hier stehen sicherheitstechnische Aspekte im Vordergrund, wobei der Brandschutz eine herausragende Rolle für das elektrotechnische Installationskonzept einer PV-Fassade spielt. Auf Basis einer Bestandsanalyse erfolgt eine ganzheitliche, risiko- bzw. schutzzielorientierte brandschutztechnische Neubewertung unter Berücksichtigung der neuen Gesetzeslage. Neben der Beschreibung der Schutzziele werden brandschutztechnischen Risikomerkmale bestimmt, die in eine Risikobewertung einfließen.

Die Herausforderung im Sanierungsfall eines Hochhauses besteht u. a. darin, dass die Geometrie des Gebäudes im Wesentlichen vorgegeben ist. Eingangsbereiche, Fenster, Balkone oder andere horizontale oder vertikale Fassadenvorsprünge stellen weitere Ansprüche an die photovoltaische Nutzung in Fassaden. Energetisch nicht sinnvoll nutzbare Flächen werden in der Regel nicht mit PV-Elementen belegt bzw. allenfalls aus ästhetischen Gründen mit Dummy-Modulen. Dennoch soll das Gebäude dem Betrachter eine harmonische Ansicht darbieten. Dabei spielt die Geometrie der PV-Fassadenelemente eine bedeutende Rolle. PV-Elemente können heutzutage in allen geometrischen Formen und Farben produziert werden. Kleinste Einheiten von unter einem Quadratmeter bis hin zu etagenhohen Fassadenelementen werden u.a. über die Wahl der Glasstärken definiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass sehr kleinflächige Elemente eher die Ausnahme sind, da der elektrische Installationsaufwand sehr hoch ist. Zudem nimmt bei kleineren Einheiten der Aufwand für die Fassadenkonstruktion zu. Sehr große Fassadenelemente lassen sich durch entsprechenden Technikeinsatz bei der Errichtung zwar gut handhaben, sind in einem späteren Schadenfall jedoch nur mit größerem Aufwand austauschbar.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sowohl bei sehr großen Solarelementen als auch bei sehr kleinen die Gesamtkosten der Fassade ansteigend. Dies hat folgende Ursachen.

**Preisanstieg bei sehr kleinen Solarelementen:**

Bei sehr kleinen PV Elementen, z.B. kleiner als ein Quadratmeter, nimmt zwar die Glasdicke ab und der Preis pro m<sup>2</sup> PV-Modul sinkt. Allerdings nimmt gleichermaßen die Belegungsdichte mit Solarzellen ab, da häufig die Glasabmessungen nicht mehr zum Zellraster passen und daher die Randbereiche unbelegt bleiben. Die Konsequenz: der Preis pro installiertem Wp steigt. Des Weiteren nehmen die Kosten für Unterkonstruktion – mehr Materialbedarf - und Montage – höherer Personalbedarf – zu.

**Preisanstieg bei sehr großen Solarelementen:**

Bei sehr großen Solarelementen – typischerweise ab einer Fläche von mehr als 5 m<sup>2</sup> - können die PV Module nicht mehr manuell montiert werden. Es wird ein Kran benötigt. Da zum Zeitpunkt der Glasmontage vor der Fassade im Regelfall ein Gerüst steht, ist die Montage sehr aufwändig, da die am Kran hängenden Solarmodule zwischen Gerüst und Unterkonstruktion an die gewünschte Position gebracht werden müssen. Dies ist nicht nur zeitaufwändig, sondern auch mit großem Bruchrisiko verbunden. Vorteile bieten hier Montagesysteme, die ohne Gerüst auskommen. Bereits zu diesem frühen Zeitpunkt entscheidet sich, wie die einzelnen PV-Fassaden-Elemente bzgl. der gewählten Anschlusstechnik ausgeführt sind. Anders als bei der konventionellen Nutzung von Photovoltaik mit standardmäßig ausgeführten Solarmodulen, kann im Fassadenbau von individuell produzierten PV-Elementen ausgegangen werden. Die Anzahl der Zellen eines Fassadenelementes wird in horizontaler wie vertikaler Richtung durch Zellenabstände und erforderliche Randabstände bestimmt. Die Außenmaße eines jeden Elementes werden durch die Fassadenkonstruktion vorgegeben. Soweit möglich sollte die Anzahl der Fassadenelemente mit abweichenden Abmessungen geringgehalten werden. Um ein einheitliches Erscheinungsbild sicherzustellen, werden in der Regel die vertikalen und horizontalen Zellabstände von allen PV-Modulen identisch gewählt, so dass notwendige Anpassungen der Glasgröße sich in variierenden Randabständen manifestieren. Ziel ist es, dass die Zellen von aneinander angrenzende PV-Modulen zueinander in einer Flucht liegen.

**Rahmenbedingungen für die elektrische Installation von PV**

Bei der elektrischen Planung und Auslegung einer PV-Fassade müssen viele Aspekte berücksichtigt werden, die sich nicht nur auf die serielle Verschaltung der einzelnen PV-Elemente beschränken. Die Hochhausgeometrie, die Kennwerte und Ausführung der einzelnen PV-Fassadenelemente, die Auswahl des Energieaufbereitungskonzeptes, der Brandschutz, die Ausführung der Fassadenkonstruktion selbst und alle relevanten normativen Vorgaben zur Installation müssen beachtet werden. Eine allgemeingültige Behandlung des Themas ist nicht möglich, da speziell auch die Ausführung der Fassadenkonstruktion ausschlaggebend ist.

Prinzipiell kann zwischen einer horizontalen und einer vertikalen elektrischen Installation unterschieden werden. Ausgehend vom Hochhauscharakter bietet sich natürlich eine Leitungsverlegung in vertikaler Weise an. Bezüglich des Brandschutzes ist dies aber zugleich die Variante, bei der die behördlichen brandschutztechnischen Vorgaben im besonderen Maße im Vordergrund stehen. Jede Etage stellt für sich einen Brandabschnitt dar, der jeweils mit einem gebäudeumlaufenden Brandriegel nach oben wie unten abgeschottet werden muss. Die Leitungsdurchdringung eines Brandriegels ist nur dann zulässig, wenn eine Brandweiterleitung in

den nächsten Brandabschnitt durch entsprechende konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen werden kann. Eine Umgehung des Brandriegels ist z.B. dann zulässig, wenn die Leitungsverlegung in einem brandschutztechnisch unbedenklichen Kabelkanal (z. B. aus Edelstahl) erfolgt und zusätzlich eine Abschottung mittels Brandschutzstein im Umgebungsbereich sichergestellt wird (Vorgabe im Rahmen des Forschungsvorhabens PV-HoWoSan). Die Fassadenkonstruktion selbst kann den Kabelkanal bilden. Um zu verhindern, dass die vertikal verlaufenden Leitungen durch das eigene Gewicht über Gebühr beansprucht und ggf. geschädigt werden, ist eine entsprechende Befestigung der Kabel vorzusehen.

Eine horizontale Verlegung von Leitungen innerhalb eines Brandabschnittes ist jederzeit möglich. Um ein Abrutschen dieser horizontal laufenden Leitungen zu vermeiden, sollte die Vorrichtung zur Leitungsführung die Funktionsfähigkeit von Kabelpritschen aufweisen. Werden horizontal gebildete Stränge vertikal in der Fassadenkonstruktion nach unten oder oben geführt, gelten wiederum alle Bestimmungen für eine vertikale Verlegung von Leitungen.

Die Durchführung der Kabel in das Gebäudeinnere muss in beiden Fällen – horizontale wie vertikale Verlegung der Kabel in der Fassade – unter Beachtung der geltenden Brandschutzvorschriften geschehen. Sollten im Gebäudeinneren besondere brandschutztechnische Vorschriften für die Verlegung von DC-Leitungen vorliegen, so ist es wünschenswert, wenn der Wechselrichter direkt in der Nähe des Wanddurchgangs installiert ist, um lange DC-Leitungen im Gebäude zu vermeiden. Gibt es keine besonderen brandschutztechnischen Vorschriften für die Verlegung von DC-Leitungen im Gebäudeinneren, so ist es zur Reduzierung der Leitungsverluste wünschenswert, möglichst lange DC Leitungen vorzusehen, da das DC-Spannungsniveau im Regelfall höher ist als auf der AC Seite.

Bei einer vertikalen Verlegung von Leitungen ist es unabdingbar, dass sie in einem geschotteten Bereich verlegt werden, um eine Brandausbreitung zu vermeiden. Dazu wird in der Regel die Fassadenkonstruktion selbst genutzt. Solarleitungen selbst werden als Brandlast eingestuft. Die normativ beschriebenen Leitungen (EN 50618, Leitungen für Photovoltaik Systeme) zur Verwendung in Photovoltaik-Systemen, insbesondere zur Installation auf deren Gleichspannungsseite, sind für die dauerhafte Verwendung im Außenbereich über viele Jahre unter wechselnden Klimabeanspruchungen geeignet.

Solarleitungen bestehen aus verzinnnten Einzeldrähten aus Kupfer und einer Isolierhülle, die aus vernetzten Kunststoffen ausgeführt sein muss. Der umgebende Mantel ist ebenfalls vernetzt ausgeführt. Die Verwendung von halogenfreien Werkstoffen ist eine normative Anforderung nach EN 50525-1 Anhang B. Zusätzlich muss die verwendete Solarleitung in Bezug auf die Rauchentwicklung in Übereinstimmung mit EN 61034-2 unter Verwendung der Prüfeinrichtung nach EN 61034-1 geprüft werden.

Bezüglich der vertikalen Flammausbreitung muss die Leitung in Übereinstimmung mit EN 60332-1-2 zertifiziert werden. Die vollständige Leitung muss den Flammausbreitungs-Anforderungen nach EN 60332-1-2 Anhang A erfüllen.

In die Fassadenkonstruktion eingebracht, spricht man von einer festen Verlegung. Die gewählte Verlegung in einem Kabelkanal ist als geschützte Verlegung anzusehen. Witterungseinflüsse auf die Leitungen sind deshalb als gering anzunehmen. Die Leitungen sind ausgelegt für den Betrieb bis zu einer maximalen Leitertemperatur von 90 °C. Eine derartige Grenztemperatur wird selbst bei einer Häufung von Leitungen bei weitem nicht erreicht werden.

Wie viele Leitungen in einem Abschnitt des Kabelkanals gemeinsam geführt werden (Häufung) ist von der Höhe des Gebäudes und von der Eingangsspannung des verwendeten Wechselrichters abhängig. DC-Eingangsspannungen von 600 bis max. 1000 V für Strang-Wechselrichter können als üblich angenommen werden. Innerhalb eines vertikal durchlaufenden Kabelkanals können deshalb mehrere Stränge eingebracht werden – ein Umstand, der bei der Planung unbedingt berücksichtigt werden muss. Die größte Häufung von Leitungen wird immer in Wechselrichternähe auftreten.

Wegen der möglicherweise längeren Leitungslängen in Hochhausgebäuden sind Leistungsverluste zu berücksichtigen. Die üblichen Berechnungsverfahren sind hier nur bedingt anwendbar, weil durch die vertikale Anordnung und Ausrichtung der PV-Elemente nicht zwingend auf maximale DC-Ströme ausgelegt werden muss, zumal deren Häufigkeit auch anders verteilt ist als bei Dachanlagen. Die Wahl eines Leiterquerschnitts von 4 oder 6 mm<sup>2</sup> erscheint in der Regel ausreichend. Die höchsten Ströme sind bei Süd/Ost- und Süd/West-Ausrichtungen der Fassade zu erwarten.

Beschädigungen an Modulen oder Wechselrichtern durch Überspannungseinwirkung durch atmosphärische Entladungen können eintreten. Im Hochhausbereich ist das durch die exponierten Installationsorte der PV-Elemente von besonderer Bedeutung. Einkopplungen können durch Schleifenbildung ins Leitungssystem begünstigt werden. Durch die sich zwangsläufig ergebende enge Führung der Leitungen in einem Kabelkanal ist dieser Fehler auf ein aus technischer Sicht mögliches Minimum reduziert.

## 2.6 Blitzschutz

Vorhangfassaden als äußere Gebäudehülle unterliegen vielfachen Beanspruchungen. Dazu gehören auch elektrische Vorgänge, die bei Nichtbeachtung zu gefährlichen Berührungsspannungen (elektrischer Schlag) oder Funkenbildung und damit zu Schäden an Personen oder dem Gebäude führen können. In Vorhangfassaden müssen sofern, nach DIN EN 13830 [DIN EN 13830] gefordert zur Erfüllung eines Potentialausgleichs für den Personenschutz, die Metallrahmenteile elektrisch miteinander verbunden sein, so dass für alle vertikalen und horizontalen Rahmenteile eine Potentialausgleichsverbindung gegeben ist, die wiederum mit dem Potentialausgleichssystem des Gebäudes verbunden wird. Darüber hinaus können sich auch lokale Gewitter auf das Gebäude und damit die Vorhangfassade auswirken. Gegen solche Bedrohungen schützen Blitzschutzsysteme nach DIN EN 62305 [DIN EN 62305]. Hierfür ist eine umfangreiche Fachplanung erforderlich. Zu diesem Normenkomplex existieren noch diverse Beiblätter und entsprechend neue Normenentwürfe liegen vor.

In Bezug auf den Blitzschutz sind Gebäude durch Fangeinrichtungen, Ableiteinrichtungen, Maßnahmen der Erdung und des Blitzschutzpotenzialausgleiches so zu schützen, dass durch die direkte Einwirkung atmosphärischer Entladungen folgende Schutzziele erreicht werden:

- Schutz der Personen im Gebäude
- Brandschutz durch Vermeidung gefährlicher Funken
- Schutz der Gebäudestruktur vor mechanischer Beschädigung und Herabfallen von Konstruktionsteilen

Damit diese Schutzziele erreicht werden, sind die zu Grunde liegenden Blitzschutzvorschriften gemäß DIN EN 62305-2 zu berücksichtigen [DIN EN 62305-2]. Für Fassaden gilt oftmals, dass sie als „natürliche“ Bestandteile des Blitzschutzsystems wirken und somit auch den technischen Anforderungen für Fang- und Ableiteinrichtungen entsprechen müssen.

## **Definition „Natürliche Bestandteile“ des Blitzschutzsystems:**

„Natürliche Bestandteile“ sind elektrisch leitende Werkstoffe, die immer in der baulichen Anlage verbleiben und nicht geändert werden. Dies können Metallfassaden, metallene Installationen, die Stahlkonstruktion oder das bewehrte Betonskelett einer baulichen Anlage sein.

Voraussetzung für die Nutzung „natürlicher Bestandteile“ als Ableitungseinrichtung sind folgende Bedingungen:

- Die elektrische Durchgängigkeit zwischen den verschiedenen Teilen muss dauerhaft bestehen. Die zuverlässige elektrische Verbindung kann z. B. durch Hartlöten, Schweißen, Pressen, Schrauben oder Nieten erfolgen. Als nicht zulässig werden Steckverbindungen angesehen
- Die Werkstoffe der genutzten „natürlichen Bestandteile“ müssen den elektrischen und elektrodynamischen Einwirkungen des Blitzstroms und den vorhersehbaren zufälligen Beanspruchungen standhalten, ohne beschädigt zu werden
- Die Abmessungen müssen mindestens denen der genormten Ableitungen entsprechen.

Hochhäuser ragen üblicherweise über die sie umgebende Bebauung heraus und sind deshalb gegenüber Blitzeinschlägen als empfänglicher anzusehen. Es wird angenommen, dass das Gebäude nach Fertigstellung über eine Blitzschutzeinrichtung entsprechend dem aktuellen Stand der Technik verfügt.

Das Prinzip der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF) beinhaltet eine konsequente Trennung der Funktion der Wärmedämmung und der Funktion der Bekleidung der Fassade gegenüber direkten Witterungseinflüssen. Bezogen auf das Demo-Vorhaben waren ursprünglich zwei separate PV-Felder geplant, die zunächst als elektrisch isoliert betrachtet werden können. Eine tragende Unterkonstruktion aus Metall bietet aber die Möglichkeit einen Gebäude-Blitzschutz nach DIN EN 62305-3 zu realisieren [DIN EN 62305-3]. Die Konstruktion selbst kann im eintretenden Falle eines Blitzeinschlages als blitzstromführendes Element angesehen werden.

Bei einem Gebäude mit Blitzschutzsystem wird der Blitz eingefangen und sicher zur Erde abgeleitet. Brände oder Personenschäden können somit weitestgehend ausgeschlossen werden. Im geplanten Fall des Demogebäudes kann wegen des Trennungsabstandes zu Fenstern eine Gefährdung von Personen ausgeschlossen werden.

Kleinere Schäden an elektrischen oder elektronischen Einrichtungen des Gebäudes können auf Grund der elektromagnetischen Wirkungen des fließenden Blitz-Ableitstroms aber durchaus verursacht werden. In Bezug auf die Photovoltaikanlage können dies Wechselrichter, Bypassdioden oder messtechnische Einrichtungen sein. Ein direkter Blitzeinschlag in die Fassadenkonstruktion kann zu Schädigungen der Konstruktion selbst oder der PV-Module führen.

Bei durchgängig das Gebäude umspannenden, vorgehängten Fassaden würde man diese in ein bestehendes Blitzschutzsystem integrieren. Wird die Fassadenkonstruktion im Dachbereich an die Fangeinrichtungen angebunden und an der Unterseite an die Erdungsanlage angeschlossen, wird die Fassade zum festen Bestandteil des Blitzschutzkonzeptes.

Im Fall der geplanten Demo-Fassade wären jedoch folgende Problemstellungen zu beachten:

- Die beiden getrennten Fassadenkonstruktionen werden im Attikabereich fest mit dem Gebäude verbunden
- Es ist nicht davon auszugehen, dass ein ausreichender Trennungsabstand zu den auf dem Dach befindlichen Elemente eingehalten werden kann (Attika)
- Die Fassadenkonstruktion wäre somit in das Blitzschutzkonzept zu integrieren
- Die Fassadenkonstruktion im unteren Bereich muss an die Erdungsanlage angeschlossen werden (jede Lisene vermutlich separat). Es sollte geprüft werden, ob ein Anschluss direkt an eine Bewehrung im Wand- oder Deckenbereich möglich ist oder ob andere Möglichkeiten bestehen.

Die elektrisch leitende Unterkonstruktion kann also für die Belange des Blitzschutzes verwendet werden, wenn sie von der Dachkante bis zur Unterkante der Fassade leitend durchverbunden ist. Die Unterkonstruktion übernimmt in diesem Fall zunächst nur die Funktion der Ableitungen. Die horizontal eingebrachten Brandschutzriegel und die Montagehilfen können zur Vergleichmäßigung des Stromflusses führen und damit zu einer Verbesserung des Gebäude-Blitzschutzes.

Eine Anforderung der DIN EN 13830 lautet offensichtlich, dass aus Sicht der Blitzschutztechnik auch Anforderungen zum Potenzialausgleich ausgesprochen werden. Explizit wird die Leitfähigkeit der metallischen Fassadenkonstruktion benannt. Demnach müssen Produkte, die in diese Norm fallen, bezüglich des Potenzialausgleichs eine durchgängige elektrische Verbindung aufweisen. Der maximal zulässige Widerstandsbetrag über die gesamte Fassade darf 10 Ohm nicht überschreiten.

Durch den modularen Aufbau des Fassadensystems sind zahlreiche Schraubverbindungen vorgesehen, die in Summe zur Widerstandserhöhung beitragen können. Bei den Betrachtungen ist weiterhin zu berücksichtigen, dass Edelstahl nicht über die Leitfähigkeit wie Kupfer, Aluminium oder Stahl verfügt. Als positiv kann der große Querschnitt der Fassadenkonstruktion angesehen werden.

Es wird empfohlen, die Thematik in den Planungsprozess des Gebäudes mit einzubinden. Eine Zusammenarbeit zwischen den Errichtern der Fassade und des Blitzschutzsystems sollte schon im Planungsstadium der Sanierungsmaßnahme erfolgen. Nur dann kann der optimale Schutz zu relativ niedrigen Kosten erreicht werden. Dabei muss festgelegt werden, wie die elektrisch leitende Fassadenbekleidung oder deren Unterkonstruktion durchverbunden werden soll, wo Anschlussstellen an Fassade, Attika und Erdungsanlage vorgesehen werden müssen und wie die Verbindungen auszuführen sind.

## **2.7 Wärmeschutz**

BIPV als fassaden- oder dachintegrierte Systeme verändert den Wärmedurchgangswert des betreffenden Bauteils und unterliegt damit der Energieeinsparverordnung (EnEV) als Teil des deutschen Wirtschaftsverwaltungsrechtes bzw. dem integrierten Gebäudeenergiegesetz (GEG). Darin schreibt der Ordnungsgeber bautechnische Mindestanforderungen zum effizienten Betrieb (Heizen und Kühlen) von Gebäuden vor, welche bei Neubau oder Umbau/Erweiterung eingehalten werden müssen.

Als Rechenverfahren für die Nachweisführung wird hierbei auf die Normenreihe der DIN V 18599 und DIN 4108 verwiesen. Dabei wird zwischen Anforderungen an den Neubau und an den Sanierungsfall unterschieden.

**2.7.1 Bauteilnachweis Gebäudesanierung**

Im Sanierungsfall kann über das gesamte Gebäude bilanziert werden oder aber es werden die Anforderungswerte für die Wärmedurchgangswerte der einzelnen Bauteile eingehalten. Bei Erweiterung bzw. Ausbau eines Gebäudes ohne Einbau eines neuen Wärmeerzeugers gilt dies ebenfalls.

Maßnahme	Änderungen, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen	Erweiterung um beheizte oder gekühlte Räume (kein neuer Wärmeerzeuger)	Erweiterung um beheizte oder gekühlte Räume (mit neuem Wärmeerzeuger)
Anforderung	Max. Wärmedurchgangskoeffizienten nach Anlage 3 Tab. 1 Oder Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust / bzw. mittlere U-Werte (1,4fache des EnEV <sub>2014</sub> Neubau-Wertes)	Max. Wärmedurchgangskoeffizienten nach Anlage 3 Tab. 1  ≥ 50 m <sup>2</sup> Sommerlicher Wärmeschutz	Anforderungen wie bei Neubau Nur an den zu erweiternden Gebäudeteil (keine Verschärfung 2016)

Abbildung 3: Anforderung des Nachweisverfahrens nach EnEV im Sanierungsfall

Erst bei Erweiterung bzw. Ausbau eines Gebäudes mit Einbau eines neuen Wärmeerzeugers muss der Nachweis gemäß den Neubauanforderungen (für den Neubau) erfolgen.

<b>Bauteil</b>	<b>Einzuhaltende U-Werte für Wohngebäude (Innentemperaturen <math>\geq 19^{\circ}\text{C}</math>) in <math>\text{W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b>
Außenwand (Ersatz, erstmaliger Einbau, Anbringen von Bekleidungen, Verschalungen, Mauervorsatzschalen oder Dämmschichten auf der Außenseite einer bestehenden Wand oder Erneuerung des Außenputzes einer bestehenden Wand)	0,24
Fenster, Fenstertüren	1,3
Verglasungen	1,1
Vorhangfassade	1,5
Sonderverglasungen	1,6
Außentüren	1,8

Tabelle 5: Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen bei Änderung an bestehenden Gebäuden [GEG 2020]

### 2.7.2 Gesamtbilanzierung Gebäudesanierung und Neubau

Bei Neubauten wird über das gesamte Gebäude bilanziert, wobei zwei Anforderungswerte zu erfüllen sind:

1. Der Primärenergiebedarf und
2. der Wärmeschutz der wärmeübertragenden Hüllfläche ( $H'_{T}$ -Wert) als Mittelwert der Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Bauteilgruppen.

Als Nachweis des eingehaltenen baulichen Wärmeschutzes darf der  $H'_{T}$ -Wert als mittlerer U-Wert nicht über dem des entsprechenden Referenzgebäudes liegen.

### 2.7.3 Mindestwärmeschutz und Wärmebrücken

Unabhängig von diesen Anforderungswerten der EnEV ist der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2:2013 einzuhalten. Diese Mindestanforderungen sind in den Tabellen 2 und 3 der DIN 4108-2 zu finden; hierbei wird für den Wärmedurchgangswiderstand hinsichtlich der Bauteilart u.a. unterschieden in:

- Ein und mehrschalige, homogene Bauteile
  - mit mehr als  $100 \text{ kg}/\text{m}^2 \rightarrow R = 1,2 \text{ (m}^2\text{K)}/\text{W}$
  - mit weniger als  $100 \text{ kg}/\text{m}^2 \rightarrow R \geq 1,75 \text{ (m}^2\text{K)}/\text{W}$

- Inhomogene, nichttransparente Bauteile →  $RG \geq 1,75 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  sowie zusätzlich für das gesamte Bauteil im Mittel  $R_m \geq 1,0 \text{ (m}^2\text{K)/W}$
- Transparente und teiltransparente

### 3 Modulares Einhängesystem für industriell vorgefertigte PV-Fassaden

Bei der Beschreibung des modularen Einhängesystems sei auf den Schlussbericht des Verbundkoordinators – Fraunhofer IEE verwiesen. Im Folgenden wird auf die Ausgestaltung der PV-Elemente eingegangen werden.

Hinsichtlich der PV-Technologie fiel im Projekt PV-HoWoSan die Wahl auf frei konfigurierbare polykristalline Glas-Glas-Module (als rahmenloses Panel) des Projektpartners SUNOVATION. Wie in Abbildung 4 dargestellt, sind die Zellen über ein Silikon-Gel in die Gläser eingebettet. Das verwendete Gel ist dabei kristallklar, haftet sehr gut auf Glas, ist dauerhaft UV-stabil, temperatur- und flammbeständig und ermöglicht eine exakte Kontrolle des Einbettungsprozesses.

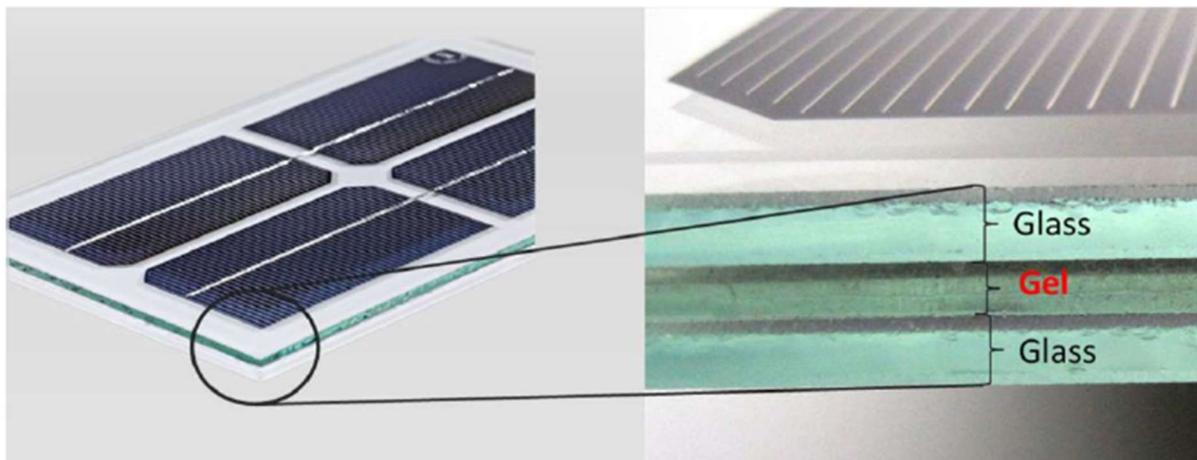


Abbildung 4: Aufbau des PV-Moduls der Fa. SUNOVATION

Beim Design der Fassadenelemente ist die Verteilung der Zellen von Bedeutung. Zellen und Randabstände müssen so gewählt werden, dass zum einen das einheitliche Erscheinungsbild aller Fassadenelemente, auch bei abweichenden Abmessungen gewahrt bleibt und Abschattungseffekte durch die Fassadenkonstruktion vermieden werden.

Die Abmessungen des Glasverbundes geben die grobe Zellenanordnung in beiden Achsen des Fassadenelementes vor. Einzig Zellen- oder Randabstände können als Variationsmöglichkeit für die Zellenbelegung angesehen werden. Angaben zur maximal möglichen Glasgröße

und dem erforderlichen Glaseinstand reichen aus, um das Zellendesign durchzuführen. Im ungünstigen Fall kann eine abschließende Zellenreihe nicht mehr berücksichtigt werden (Abbildung 5). Um die Zellen gleichmäßig verteilen zu können, muss im beispielhaft dargestellten Fall auf die untere Zellenreihe verzichtet werden. Der freiwerdende Bereich muss dann durch größere Zellen- bzw. Randabstände ausgeglichen werden. Alternativ kann auch eine Bestückung mit Halbzellen in Betracht gezogen werden.

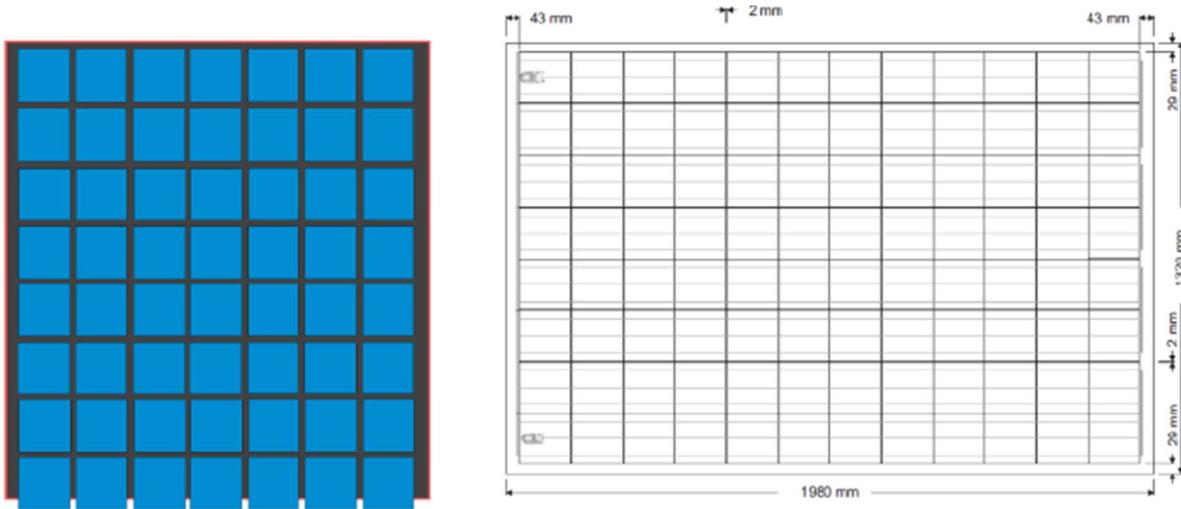


Abbildung 5: Zellendesign bei vorgegebenen Flächenmaßen

Letztendlich ergeben sich Zellenreihen mit gerader oder ungerader Anzahl, was wiederum Einfluss auf die Anschlusstechnik der PV-Elemente und dabei insbesondere auf deren Positionierung hat. Eine gerade Anzahl von Zellen ist dabei wegen der günstigeren Anschlusstechnik vorteilhaft. Bei gerader Anzahl von Zellenreihen enden die Anschlüsse in beiden Fällen jeweils auf einer Seite des PV-Elementes. Bei fortlaufender elektrischer Verschaltung (Stringbildung) hat dies den Vorteil, dass nur eine Lisene zur Aufnahme der Leitungen benötigt wird. Die Leitungslängen können relativ kurz ausgeführt werden. Bei ungeraden Zellenreihen muss der Minuspol modulintern über einen separaten Busbar zurück auf die Anschlussstelle der gegenüberliegenden Seite des PV-Elementes geführt werden.

Im ersten Schritt ist die Wahl der elektrischen Anschlusstechnik selbst von Bedeutung. Zwischen Vor- und Nachteilen muss abgewogen werden. Von der Industrie werden dazu unterschiedliche Techniken zur Verfügung gestellt. Generell kann zwischen rückseitigen Anschlüssen und Kantendosen unterschieden werden. Da für das Vorhaben bereits feststand, dass die Fassadenelemente in gerahmter Weise ausgeführt und gleichzeitig nachträglich ausklappbar sein sollten, wurde die Kantendose nicht favorisiert. Eine erforderliche Modifikation im Rahmenbereich (ggf. verbunden mit einer statischen Schwächung), Kantenschutz der herauszuführenden Anschlussleitung, der zwingende Anschluss der DC-Leitungen mit Anschlusstechnik und die nachträgliche angestrebte Ausklappbarkeit jedes einzelnen Fassadenelementes

wären als Argumente gegen die Kantendose anzuführen. Letztendlich spielte sicher auch der geringe Erfahrungsschatz im Umgang mit dieser Anschlusstechnik eine Rolle.

Die rückseitige Anschlusstechnik hat sich nicht zuletzt, auch bei immer mehr in Glas/Glas-Technik ausgeführten Standardmodulen, als zuverlässig erwiesen. Die Entscheidung für getrennte Anschlussdosen für Plus und Minus statt der klassischen Anschlussdose ergab sich zwangsläufig aus der Tatsache, dass die Bypassdioden zwischen dem Front- und Rückseiten-glas mit einlaminiert wurden. Die Konzentration von Bypassdioden wie bei der klassischen Anschlussdose wird dadurch umgangen. Da Fassadenelemente im Vergleich zu Standardmodulen über eine höhere Zellenanzahl und meist auch Zellenreihen verfügen, können einlamierte Bypassdioden dort platziert werden, wo deren Einsatz erforderlich ist. Eine Konzentration von Bypassdioden an einem Ort würde einen höheren Verschaltungsaufwand bedeuten. Für die weitere Planung wurden deshalb getrennte rückseitig angebrachte Anschlussdosen favorisiert. Getrennte Anschlussdosen stehen auch dafür, dass Leitungslängen optimiert und Brandlasten auf ein Minimum reduziert werden können. Das Handling von leitungslosen PV-Fassadenelementen reduziert zudem die Gefahr, dass Leitungen während des Transportes und der Montage beschädigt werden.

## **4 Realisierungsprozess am Demonstrationsgebäude**

### **4.1 Genehmigungsprozess**

Bei der Beschreibung des Realisierungsprozess am Demonstrationsgebäude sei ebenfalls auf den Schlussbericht des Verbundkoordinators – Fraunhofer IEE verwiesen und lediglich auf die Ausgestaltung der PV-Elemente eingegangen werden.

Unmittelbar beim Start des Projekts PV-HoWoSan wurde klar, dass der im Juni 2017 erfolgte Brand des Grenfell Towers in London auch auf das Projekt PV-HoWoSan Auswirkungen haben würde. Erste Gespräche mit der Bauaufsicht Frankfurt sowie dem verantwortlichen Brandschutzgutachter ließen erwarten, dass die Auslegung der konstruktiven Anforderungen zur Sicherstellung des Brandschutzes, bzw. die Anforderungen an Zusatzmaßnahmen bei Abweichungen von den baurechtlichen Anforderungen, höher sein würden als zum Zeitpunkt der Projektbeantragung angenommen.

So wurde gleich zu Beginn das für PV-Anlagen übliche Unterkonstruktionsmaterial Aluminium von der Bauaufsicht Frankfurt als brandschutztechnisch nicht ausreichend angesehen, so dass ein Wechsel zu (Edel-)Stahl notwendig wurde. Des Weiteren wurden konstruktive Zusatzmaßnahmen zur Verhinderung einer Brandweiterleitung gefordert. Diese bezogen sich beispielsweise auf die Verlegung von Kabeln in speziellen Brandschutzkanälen, die geschossweise

Schottung von Brandabschnitten durch speziell entwickelte Brandriegel oder auch auf Maßnahmen zur thermischen Trennung der PV-Fassade von den Betonsandwich-Elementen (ins Besondere zur brennbaren Dämmung der Sandwich-Elemente) der Bestandsfassade.

In einem weiteren Abstimmungsgespräch mit der Bauaufsicht sowie der Feuerwehr Frankfurt wurde als Voraussetzung für die Erteilung einer Zulassung im Einzelfall (ZIE) die Durchführung eines originalmaßstäblichen Brandversuchs bei einer anerkannten Prüf- und Zertifizierungsstelle für Brandschutz gefordert. Parallel wurde durch die Planungen der Sanierung des Hochhauses Mainfeld 7 ein enges Zeitfenster für die Installation einer PV-Fassade durch den Bauherrn die ABG vorgegeben, was den geplanten Projektverlauf quasi umkehrte. An der am Fraunhofer IEE vorab zu errichtenden Testfassade sollten die hier gewonnen Erkenntnisse bzgl. Konstruktion, Montage und Installation in das Demo-Vorhaben einfließen. Als Konsequenz hieraus wurde entschieden, möglichst zeitnah Kontakt zu verschiedenen Prüfanstalten aufzunehmen. Mit der MFPA Leipzig konnte eine Versuchsanstalt identifiziert werden, bei der ein Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10 im Mai 2018 durchgeführt werden konnte. Mit diesem Termin erschien es möglich, die notwendigen Bauanträge und Installationsarbeiten der PV-Fassade mit dem Bauzeitenplan der ABG zur Sanierung des Hochhauses Mainfeld 7 in Einklang zu bringen. Daher wurde beschlossen, mit der Entwicklung des neuartigen RGI-PV-Fassadensystems für die Demofassade zu starten und nicht die Entwicklungen an der Testfassade beim Fraunhofer IEE abzuwarten. Aufgrund der kurzen Vorlaufzeit bis zum Brandversuch wurden die wesentlichen Anforderungen von Bauaufsicht und Feuerwehr bei der Erstellung des Brandprüfmodells 1-zu-1 übernommen. Zusätzlich wurde zeitlich vor dem Fassadenbrandversuch nach DIN 4102:20:2017-10 ein Single-Burning-Item (SBI) Brandversuch nach DIN EN 13823 durchgeführt, um eine Klassifizierung zum Brandverhalten der PV-Module nach DIN EN 13501-1 zu erwirken.

## **4.2 Brandprüfungen**

### **4.2.1 SBI Brandversuch**

Die Klassifizierung nach DIN EN 13501-1 unterteilt sich in die drei Bereiche:

- Die Brennbarkeitsklasse (A - F)
- Die Rauchentwicklungsklasse (s1 - s3)
- Die Tropfbarkeitsklasse (d0 - d2)

Hierbei bedeuten:

A: kein Beitrag zum Brand

- B: sehr begrenzter Beitrag zum Brand
- C: begrenzter Beitrag zum Brand
- D: hinnehmbarer Beitrag zum Brand
- E: hinnehmbares Brandverhalten
- F: keine Leistung festgestellt
- s1: geringe Rauchentwicklung
- s2: mittlere Rauchentwicklung
- s3: hohe Rauchentwicklung bzw. Rauchentwicklung nicht geprüft
- d0: kein brennendes Abtropfen/Abfallen innerhalb von 600 Sekunden
- d1: kein brennendes Abtropfen/Abfallen mit einer Nachbrennzeit länger als 10 Sekunden innerhalb von 600 Sekunden
- d2: keine Leistung festgestellt



Abbildung 6: SBI Brandversuch nach DIN EN 13823.  
Links während der Beflammung. Rechts nach Versuchsende.

Abbildung 6 zeigt die PV-Module während und nach der Prüfung. Als Ergebnis des Brandversuchs wurden die getesteten PV-Module der Kategorie B-s1-d0 zugeordnet und haben somit einen sehr begrenzten Beitrag zum Brand  
eine geringe Rauchentwicklung  
und kein brennendes Abtropfen/Abfallen innerhalb von 600 Sekunden

Abbildung 7 zeigt ein Detail im Bereich der unmittelbaren Einwirkung der Flammen. Die gezeigten Photovoltaikmodule sind augenscheinlich durch den Brand zerstört, denn das Glas ist gebrochen. Diese mechanische Zerstörung ist an sich aber kein Kriterium für die

Klassifizierung. Vielmehr sind dies die messtechnischen Ergebnisse: wieviel Wärme freigesetzt wurde, wieviel Rauch freigesetzt wurde, etc. )



Abbildung 7: Detail SBI Brandversuch nach DIN EN 13823 nach Versuchsende.

Betrachter, die kein Detailwissen hinsichtlich der Ergebnisse derartiger Versuche besitzen, sind anhand des Bildes geneigt, ein Urteil, wie z.B.: „Glas gebrochen, daher Versuch nicht bestanden“ zu fällen, da beide Photovoltaikmodule ja augenscheinlich durch den Brand geschädigt wurden.

Der SBI Brandversuch nach DIN EN 13823 ist jedoch kein Versuch der bestanden oder nicht bestanden wird. Der Versuch dient vielmehr dazu die Materialeigenschaften unter definierten Bedingungen zu ermitteln und anschließend das geprüfte Material anhand der in der Messung gewonnen Ergebnisse in Klassen einzuteilen.

#### 4.2.2 Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10

Abbildung 8 bis Abbildung 10 verdeutlichen die Durchführung des Brandversuchs bei der MFPA Leipzig GmbH. Aufgrund der kurzfristig nicht verfügbaren Halle für Großbrandversuche wurde in Abstimmung mit der Bauaufsicht Frankfurt ein Zimmerbrand simulierender originalmaßstäblicher Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10 (Brandverhalten von Baustoffen und Bauteile – Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen) durchgeführt. Aufgrund des Kompromisses bezüglich des Teststands wurde die eigentliche Versuchs- und damit Beurteilungsdauer von den eigentlich geforderten 20 Minuten auf 30 Minuten verlängert. Die Bewertungsfaktoren für den Brandversuch waren:

- Keine Vergrößerung des Primärbrandes (Gasbrenner) durch die PV-Konstruktion

- Wirksamkeit der Brandriegel zur Verhinderung einer geschossübergreifenden Brandweiterleitung
- Kein eigenständiges Weiterbrennen der PV-Konstruktion nach Erlöschen des Primärbrandes
- Kein brennendes Abtropfen von Bestandteilen der Konstruktion. Ggfs. können einzelne Tropfen einer Kabelisolierung toleriert werden. (Ausgenommen sind hier die frei brennenden Leitungen im unteren rechten Eckbereich)
- Kein Herabfallen von Konstruktionsteilen, ausgenommen gesplittertes Glas
- Beurteilung der Rauchentwicklung
- Beurteilung der Gesamtkonstruktion unter Brandeinwirkung
- Beurteilung der Temperaturentwicklung hinter dem WDVS an der Oberfläche des Rohrprüfstandes (Oberfläche KS Mauerwerk) um eine Aussage über die zu erwartende Temperaturentwicklung der Vorsatzschale / Polystyrolämmung zu treffen.
- Nachweis der Wirksamkeit der in den Lisenen angebrachten Brandschutzsteinen.



Abbildung 8: Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10.  
bei der MFPA Leipzig: Vor Versuchsbeginn.



Abbildung 9: Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10.  
bei der MFPA Leipzig: während des Brandversuchs.



Abbildung 10: Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10.  
bei der MFPA Leipzig: Nach Löschen der Primärflamme.

Die Durchführung des Brandversuchs zeigte, dass die wesentlichen Anforderungen an das Brandverhalten durch die entwickelte Konstruktion erfüllt sind. Abgesehen von einem geringfügigen Brennen der Rückseite des beflamnten PV-Moduls, der damit einhergehenden geringen Rauchentwicklung und dem Platzen lediglich kleiner Glasflächen im Bereich der Primärflamme, hört das PV-Modul kurz nach Erlöschen der Primärflamme ebenfalls auf zu brennen. Somit konnte gezeigt werden, dass sich die entwickelte Konstruktion trotz brennbarer

Bestandteile annähernd wie ein nichtbrennbares Bauteil verhält, so dass die Verwendung bei der geplanten Hochhaussanierung genehmigungsfähig erschien. Die Wirksamkeit der Brandschutzsteine konnte nachgewiesen werden, indem im unteren rechten Eckbereich Kabel durch einen Brandschutzstein hindurch in den unmittelbar beflamnten Bereich geführt wurden. Die Isolierung der Kabel wurde dementsprechend durch die Flamme in Brand gesetzt. Der Brandschutzstein verhinderte aber wirksam die Weiterleitung der Flamme in die darüber verlaufende Lisenenbereich hinein. Aufgrund der erhöhten brandschutzrechtlichen Anforderungen, welche speziell die Verwendung von Edelstahl anstelle von Aluminium forderte sowie detaillierte konstruktive Anpassungen des RGI-Grundkonzepts nötig machte, war mit einer deutlichen Kostensteigerung bei der Demo-Fassade im Vergleich zu der ursprünglichen Annahme zum Zeitpunkt des Projektantrags zu rechnen. Daher wurde entschieden, dass aufgrund des begrenzten Fördervolumens lediglich ein PV-Streifen realisiert wird.

## 5 Testinstallation am Fraunhofer IEE

Parallel zum Genehmigungsprozess für die Umsetzung am Demonstrationsgebäude in Frankfurt wurde die Entwicklung einer Testfassade weiterverfolgt, die am Teststand des Fraunhofer IEE aufgebaut und messtechnisch untersucht werden sollte. Konkrete Ansätze waren hierbei die Erarbeitung von Vorfertigungspotentialen, die Montagemöglichkeiten, sowie die Optimierung der Hinterlüftung zur Leistungssteigerung speziell im Falle einer vollflächigen Belegung der Fassade mit PV-Modulen.

Hierzu wurde wie in Abbildung 11 dargestellt im ersten Schritt ein 3-D-Modell der geplanten PV-Installation am Teststand entwickelt. Die Umsetzung der Testfassade basiert auf dem Konstruktionsprinzip der für das Gebäude Im Mainfeld 7 entwickelten Rahmen und Fassadenkonstruktionsteile, wobei der Fassadenansatz so gewählt wurde, dass unterschiedliche Modulgrößen integrierbar sind. Wie am Demonstrationsgebäude in Frankfurt wurde das Fassadensystem am Dach aufgehängt, eine zusätzliche Verankerung erfolgte in den Geschossdecken. Des Weiteren wurden die zentralen brandschutz-technischen Anforderungen aus Frankfurt übernommen. Als maßgebliche Erweiterungen sind anzusehen:

- Durch die Elementbauweise können beliebig gestaltete Fassaden mit Fenstern, Türen, Vorbauten usw. bedient werden
- Sämtliche umlaufende Gebäudeabschlüsse wurden entwickelt und ausgeführt (Boden-, Dachabschlüsse sowie seitliche Abschlüsse, wie auch Gebäudeecken
- Es wurden zwei Energieaufbereitungskonzepte umgesetzt:
  - Zentral angeordnete Stringwechselrichter

- Modulwechselrichter in der Fassade
- Leitungsinstallationen können in vertikaler und horizontaler Weise ausgeführt werden
- Erweiterung der Montage- und Installationsarbeiten zur Optimierung des Systems der Fassade mit PV-Modulen.

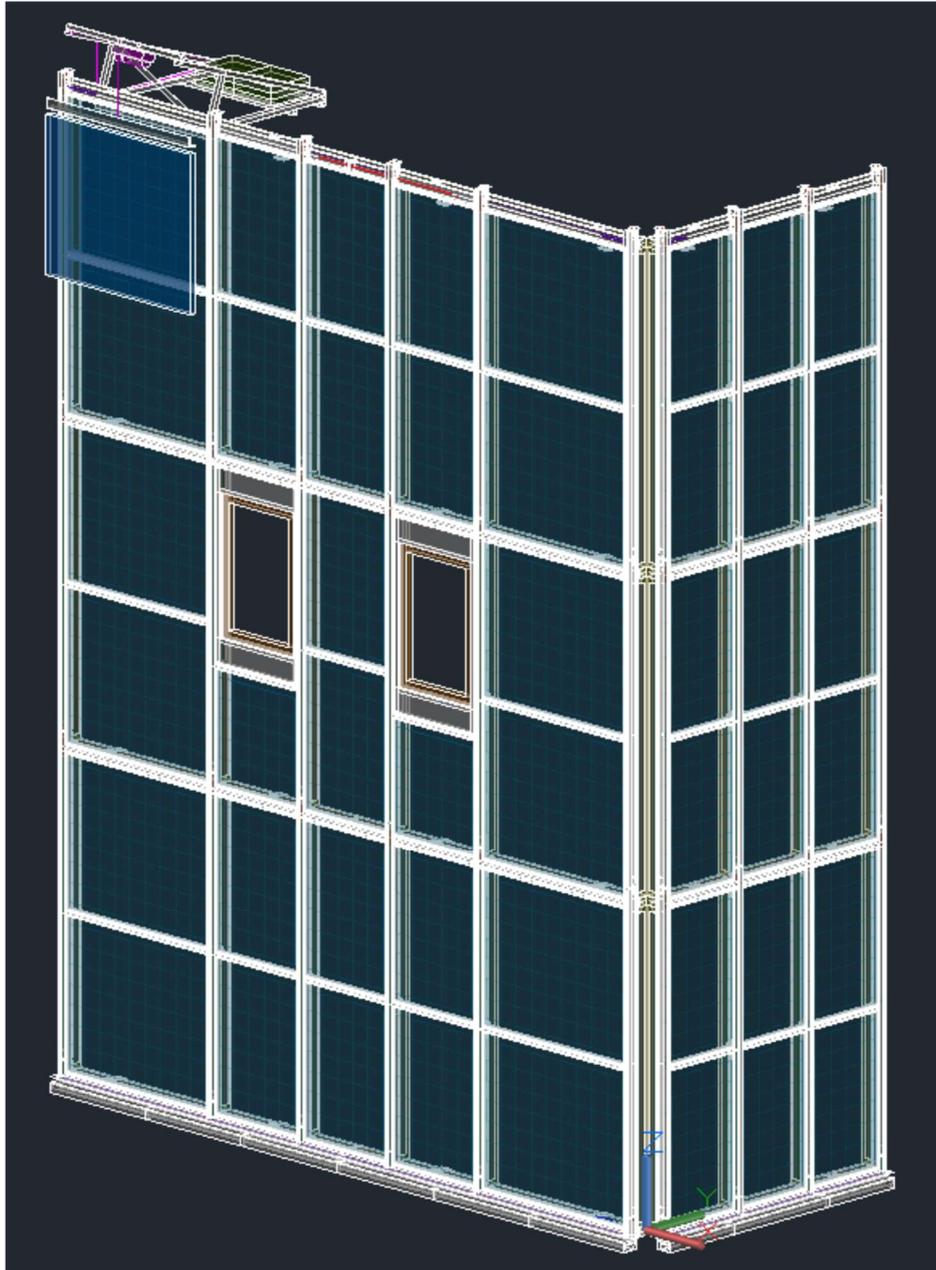


Abbildung 11: 3-D-Modell der PV-Installation am Teststand (Quelle: RGI)

Abbildung 12 zeigt die Teilkomponenten der Testfassade, die auf dem Testfeld des Fraunhofer IEE in Kassel aufgebaut wurde.

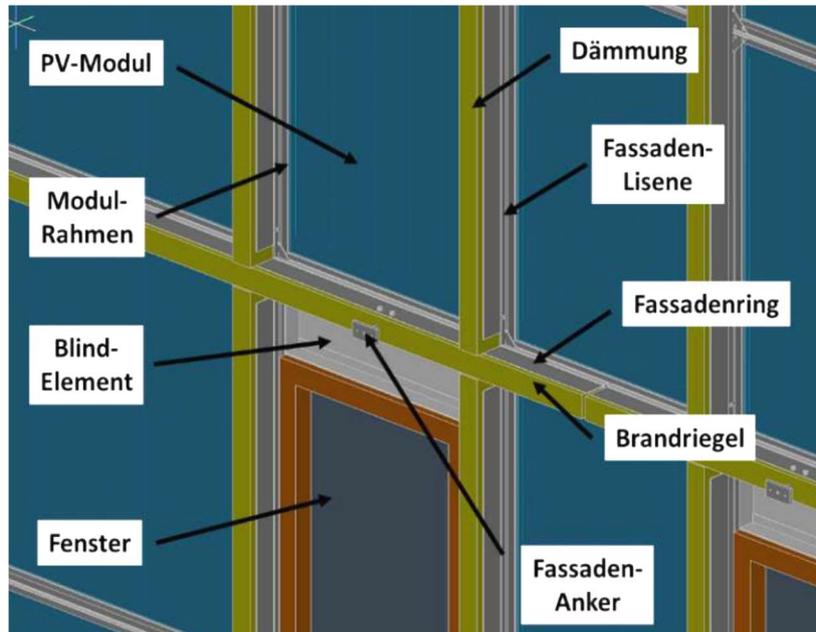


Abbildung 12: Teilkomponenten der Testfassade



Abbildung 13: Testfassade am Fraunhofer IEE während der Montage

Abbildung 13 verdeutlicht den Montageprozess, bei dem zum Einhängen der Module ein am Dach befestigter Seilzug verwendet wurde. Abbildung **14** zeigt den fertigen Aufbau, bei dem die rechte Fassadenseite nach Süd-Ost, die links zu sehende nach Süd-West ausgerichtet ist. Beide Fassadenteile sind mit dem gleichen Zellentyp ausgestattet und sind bezüglich ihres Aufbaus identisch.



Abbildung 14: Testfassade nach Fertigstellung

Für die Testfassade hat SUNOVATION insgesamt die in den Abbildung 15 bis Abbildung 18 gezeigten Photovoltaikmodule hergestellt.

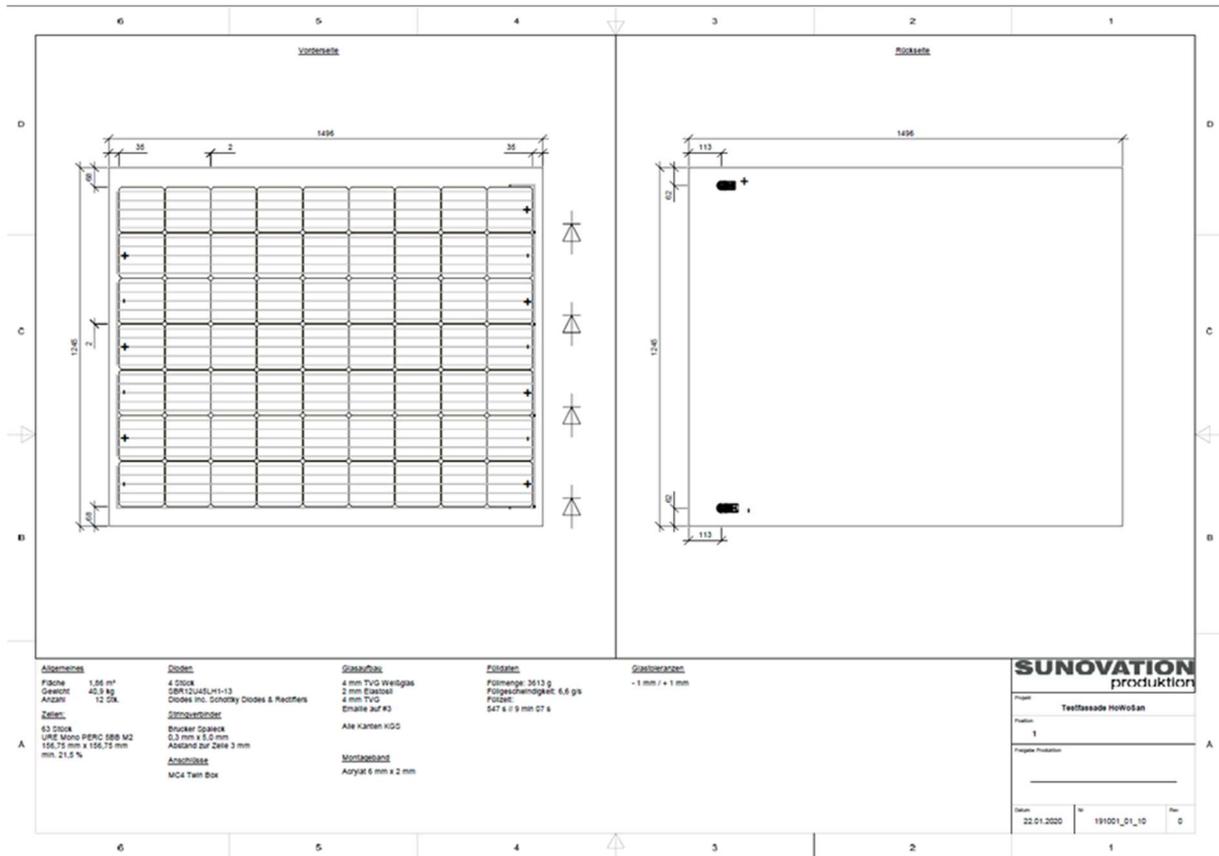


Abbildung 15: Fertigungszeichnung der PV Module für die Testfassade in Kassel: Position 1.

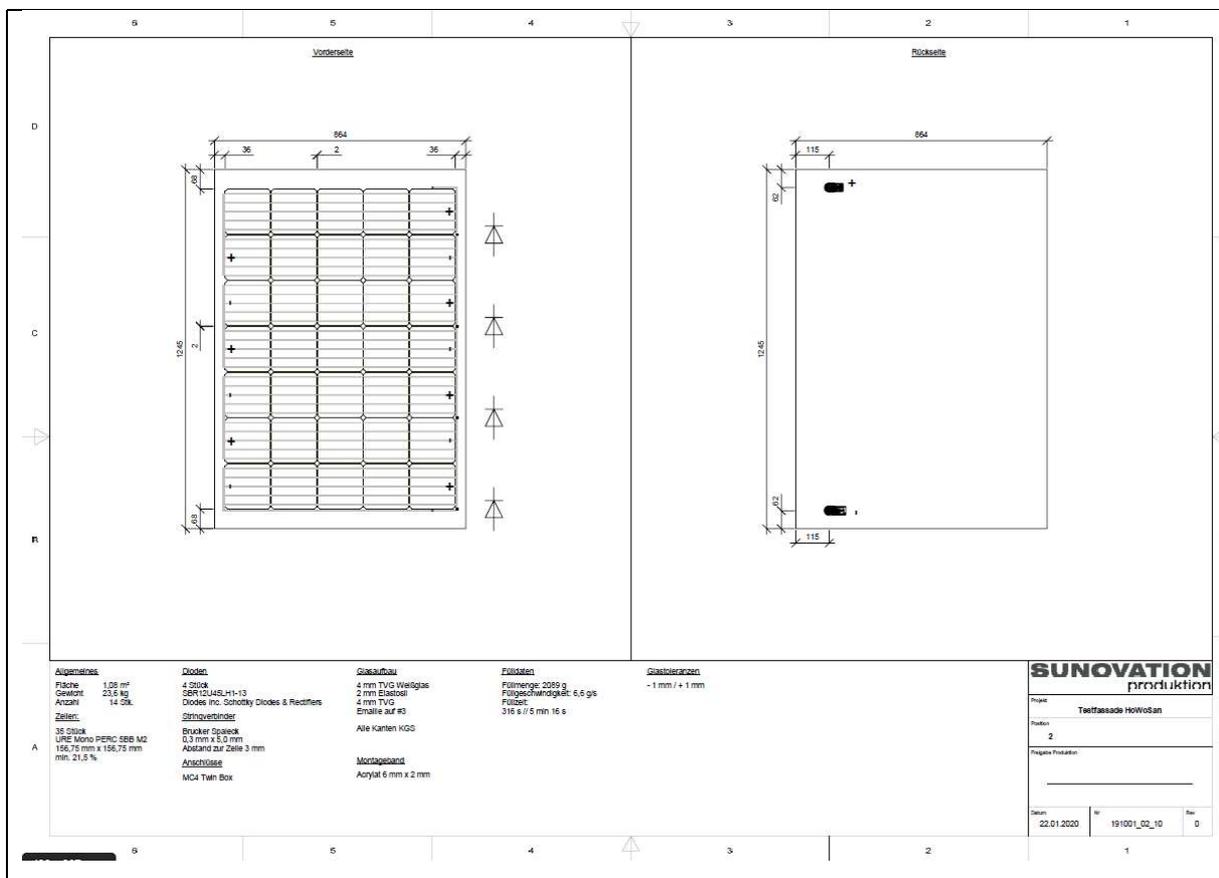


Abbildung 16: Fertigungszeichnung der PV Module für die Testfassade in Kassel: Position 2.

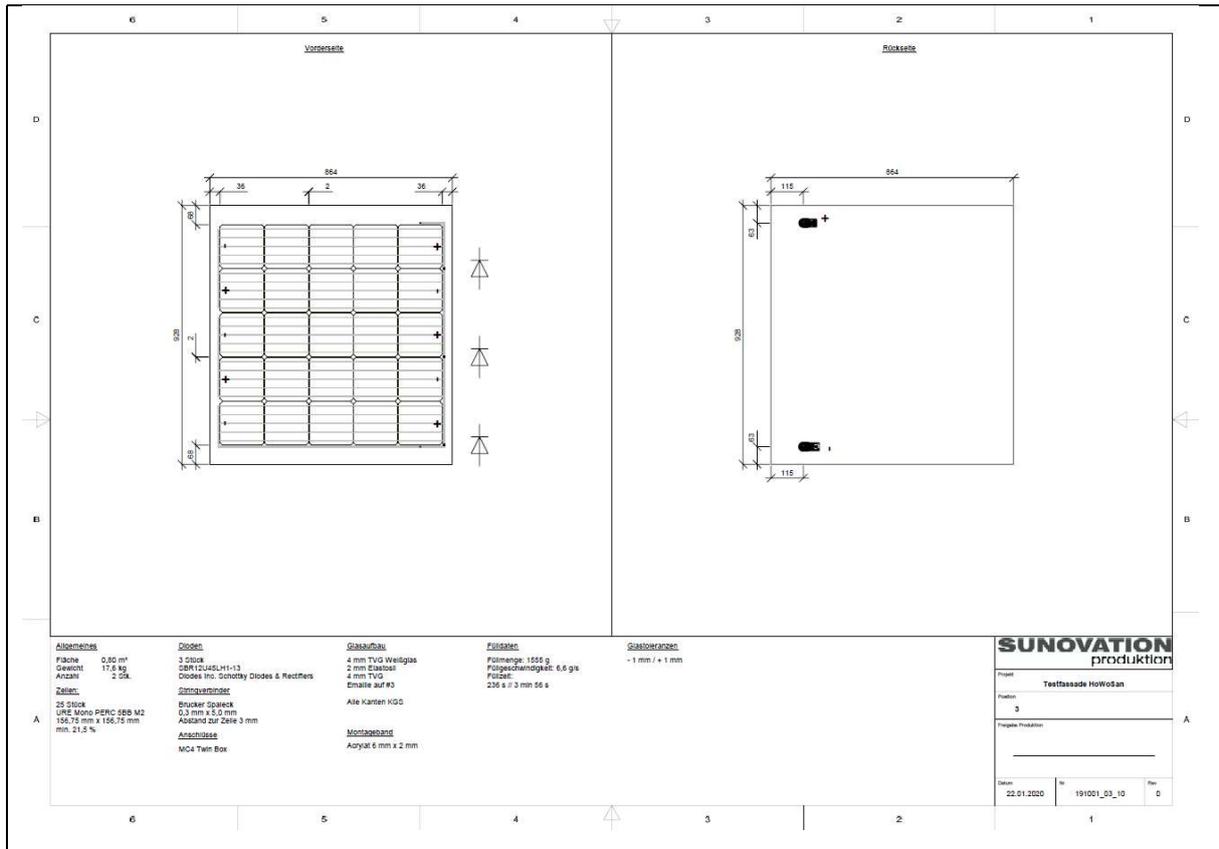


Abbildung 17: Fertigungszeichnung der PV Module für die Testfassade in Kassel: Position 3.

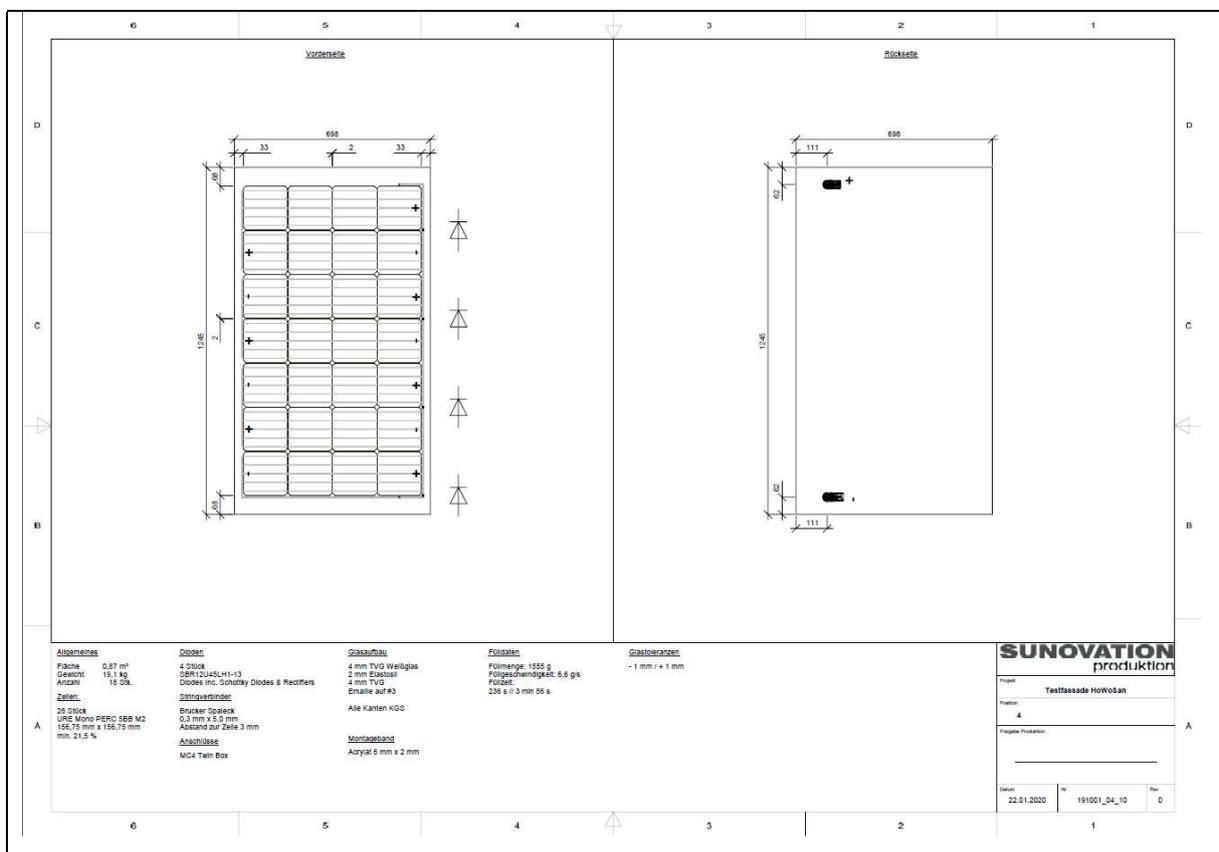


Abbildung 18: Fertigungszeichnung der PV Module für die Testfassade in Kassel: Position 4.

In Zusammenarbeit mit dem IEE wird die Anzahl, die Art und die Position der Messfühler der Testfassade in Kassel wie nachstehend dargestellt festgelegt.

Es ist geplant, insgesamt 3 Messmodule mit insgesamt 22 Messfühlern herzustellen.

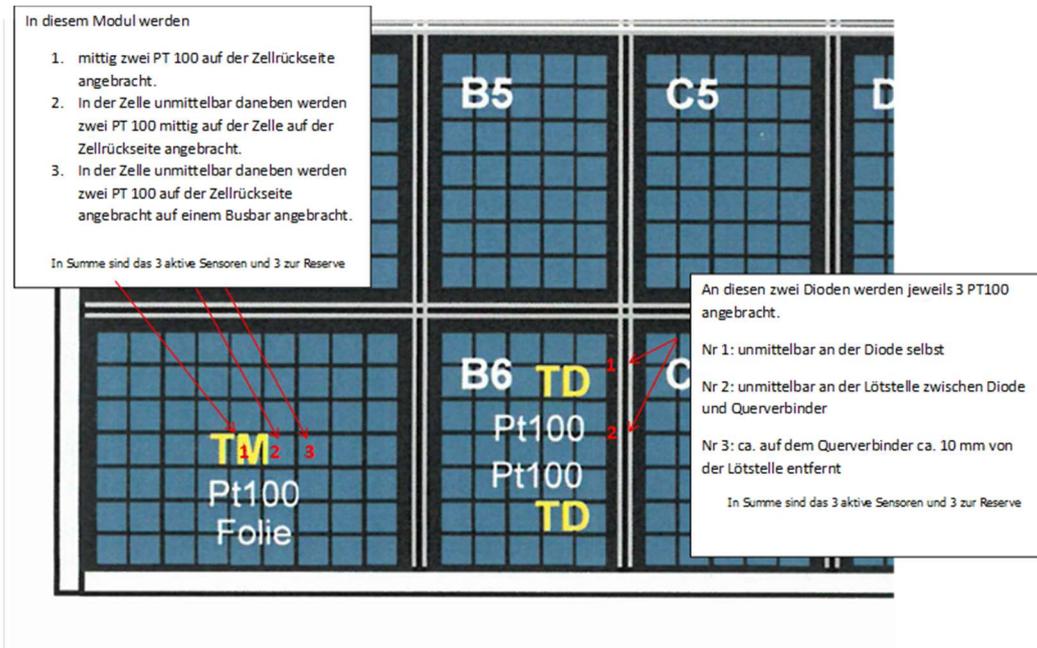


Abbildung 19: Position der Messfühler in der Südseite der Testfassade in Kassel.

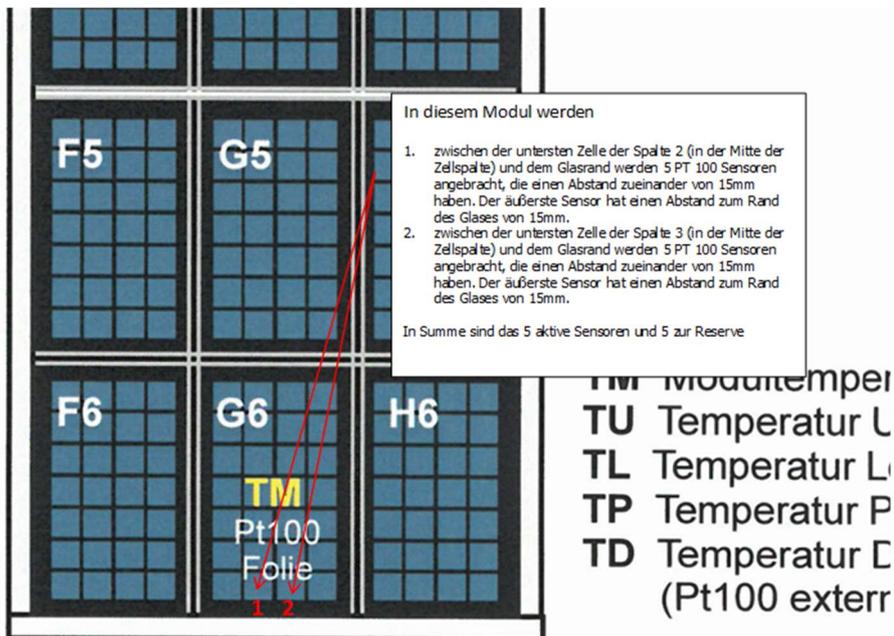


Abbildung 20: Position der Messfühler in der Ostseite der Testfassade in Kassel.

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen Detailaufnahmen der Module des Typs A6 und B6, die mit Tempertursensoren ausgestattet wurden.



Abbildung 21: Detail des PV Modules Typ B6 mit 3 PT Temperaturfühlern zur Messung der Diodentemperatur und deren Umgebung.

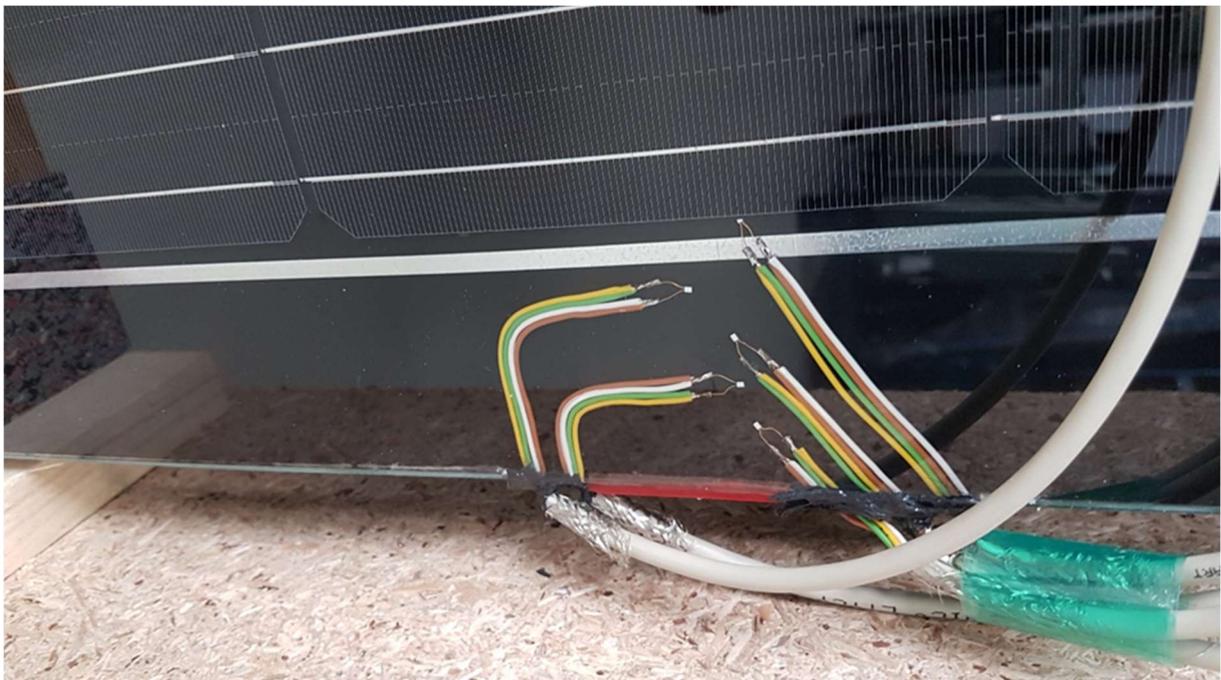


Abbildung 22: Detail des PV Modules Typ A6 mit 5 PT Temperaturfühlern zur Messung der Glastemperatur im Glasrandbereich.

## 6 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse

Parallel zu den Untersuchungen der durchgeführten Brandversuche wurden mit Genehmigung aller Projektpartner und des PtJ zwei Filme zu Schulungs- und Marketingzwecken erstellt (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24).

Beide Filme werden von SUNOVATION immer dann an Brandschutzbeauftragte / Feuerwehren und Planungsingenieure verschickt, wenn im Rahmen einer Planung/Ausschreibung, brandschutztechnische Einschätzung, Erläuterungs- und Demonstrationsbedarf besteht.

Darüber hinaus wurde von SUNOVATION bei der MFPA Leipzig eine gutachterliche Stellungnahme auf Basis der Versuchsergebnisse des Brandversuchs nach DIN 4102:20:2017-10 in Auftrag gegeben, die ebenfalls mehrfach hilfreich bei der Einschätzung hinsichtlich der Eignung von Photovoltaik in Fassaden eingesetzt wurde.



Abbildung 23: Screenshot des Schulungs- und Marketingfilmes:  
SBI Brandversuch nach DIN EN 13823.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Abbildung 23 zeigt einen Screenshot des Filmes zum SBI Brandversuch. Neben dem Inhalt des Filmes selbst sind auch Steuerelemente des Programmes zu sehen, die bei der Wiedergabe des Filmes nicht dargestellt werden.

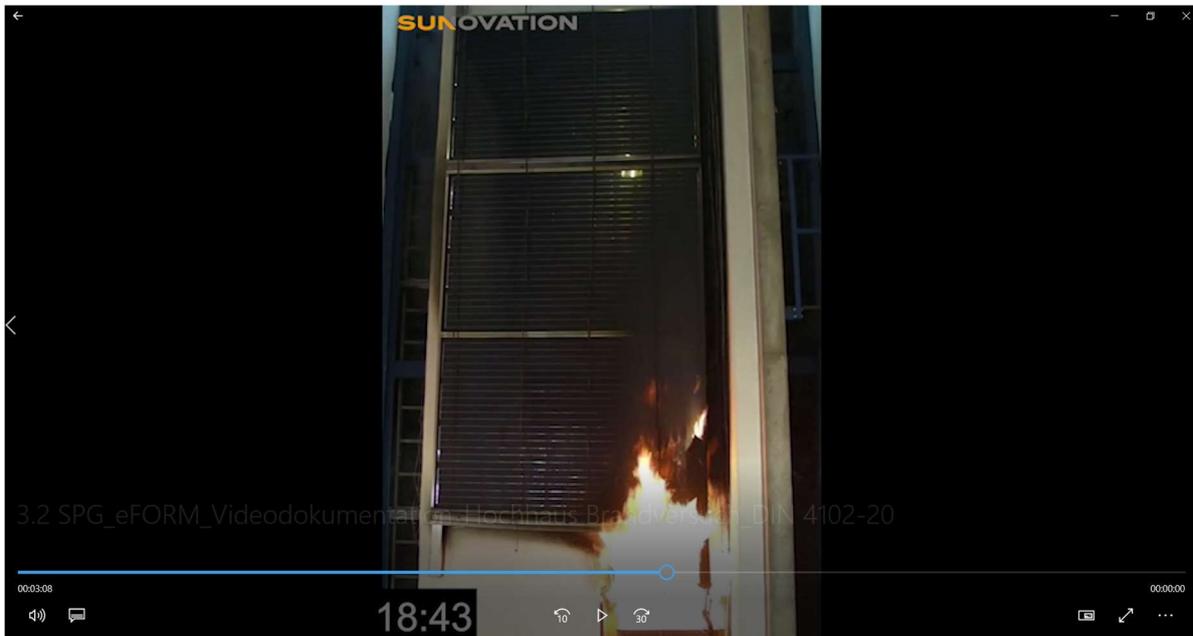


Abbildung 24: Screenshot des Schulungs- und Marketingfilmes:  
Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10.<sup>3</sup>

Im Verlauf des Projektes wurden keine Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zentrale Projektergebnisse

Zentrales Ziel des Forschungsprojekts PV-HoWoSan war die Entwicklung und Realisierung eines kostengünstigen, bauphysikalisch funktionierenden, energetisch und wirtschaftlich optimierten und in mehrfacher Sicht sicheren PV-Fassadensanierungssystems für ein Wohnhochhaus in Frankfurt.

Die Entwicklungspfade zur Umsetzung der geplanten PV-Fassade an dem Hochhaus in Frankfurt beinhalteten nach den Abstimmungen mit den Planern und Genehmigungsbehörden die Entwicklung eines neuartigen Fassadensystems unter Einhaltung der brandschutztechnischen, elektrischen und statischen Anforderungen inklusive der Vorbereitung des Genehmigungsprozesses. Die Entwicklung fand hierbei in drei Pfaden statt:

<sup>3</sup> Abbildung 24 zeigt einen Screenshot des Filmes zum Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10. Neben dem Inhalt des Filmes selbst sind auch Steuerelemente des Programmes zu sehen, die bei der Wiedergabe des Filmes nicht dargestellt werden.

- Der konzeptionellen Entwicklung eines Fassadenkonzepts für das Hochhaus und dessen Umsetzung und Begutachtung am Mock-up-Teststand des Richard-Grün-Instituts in Ratingen
- Der Erstellung eines Brandprüfmodells inklusive der Durchführung eines Brandversuchs bei der MFPA-Leipzig
- Der Erstellung eines erweiterten Fassadenentwurfs und dessen Umsetzung und energetischer Bewertung am Fassadenteststand des Fraunhofer IEE in Kassel.

Mit Hilfe des Mock-Up am Teststand von RGI konnte der prinzipielle Aufbau des Einhängesystems inklusive der Verkabelung untersucht und an die Anforderung für Hochhausbauten angepasst werden. Das Brandprüfmodell übernahm hierauf aufbauend den konstruktiven Ansatz und beinhaltete alle Anforderungen der Bauaufsicht Frankfurt im Hinblick auf Statik und insbesondere Brandschutz. Mit dem erfolgreich durchgeführten Brandversuch konnte dann gezeigt werden, dass es durch konstruktive Maßnahmen möglich ist, trotz Abweichungen zu den Anforderungen an nichtbrennbare Baustoffe in der Außenwandbekleidung ein Brandverhalten zu erhalten, welches die hohen Anforderungen an Hochhäuser einhalten und damit als Grundlage für eine Zulassung im Einzelfall bzw. eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung dienen kann. Die Erweiterung des Fassadenentwurfs für den Teststand des Fraunhofer IEE in Kassel zielte auf mehrere Aspekte ab. Zum einen wurde der Produktions- und Montageprozess des neuartigen Fassadenkonzepts inklusive des Verkabelungskonzepts analysiert und optimiert. Des Weiteren wurden Anschlussdetails am oberen und unteren Gebäudeabschluss, im Bereich von Fenstern sowie beim Übergang zu weiteren Fassadenseiten entwickelt. Der Aufbau diente dann letztendlich einer energetischen Bewertung des Fassadenkonzepts, welche sowohl die thermischen Aspekte wie Hinterlüftung und Temperaturverhalten der Module als auch die Bewertung der umgesetzten Verkabelungs- und Wechselrichterkonzepte beinhaltete. Begleitend zu den konstruktiven und versuchstechnischen Untersuchungen wurden im Projekt wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Ökobilanzierung von BIPV, den Anforderungen und Möglichkeiten zur Integration von BIPV in die Planungsmethode Building Information Modeling (BIM), den Fragen von Eigenstromnutzung und der Netzdienlichkeit von Fassaden-PV sowie der Einbindung von BIPV in den Sanierungsprozess von Gebäuden erarbeitet.

Mit den erarbeiteten Erkenntnissen wurde die Umsetzung am Hochhaus in Frankfurt vorbereitet. Basierend auf einer ersten Baugenehmigung für das Fassadensystem wurden die Verankerungspunkte in der mit einem mineralischen Wärmedämmverbund-System neu gedämmten Hochhausfassade als Vorbereitung für die Montage eines PV-Streifens gesetzt.

Kostenschätzungen führten dann aber dazu, dass die Umsetzung der Fassade aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisiert werden konnte. Die Gründe hierfür liegen u. a. an:

- Hohen Brandschutzanforderungen
- Einem neuartigen Konstruktionsaufbau, welcher speziell aus Brandschutzgründen Sonderelemente beinhaltet und keine Standardprofile enthalten konnte
- Das Fehlen der Ausführungsplanung für das Gewerkeübergreifende Bauen (höherer Abstimmungsaufwand, Risikozuschlag und Gewährleistungsfragen)
- Fehlenden Erfahrungen einer zu beauftragenden ausführenden Firma mit dem neu entwickelten System
- Den Randbedingungen Hochhaus und Bestand → Statische Anforderungen, Windlasten (statisch, speziell auch im Brandfall), Arbeiten in der Höhe, Zeitaufwand für Montage, Unsicherheiten über die Bestandsituation.

Zusammengefasst haben die im Forschungsprojekt PV-HoWoSan erarbeiteten Ergebnisse aber auch der Prozess zur letztlich nicht erfolgten Realisierung am Hochhaus wichtige Erkenntnisse zu Randbedingungen und Hemmnissen für die Umsetzung von BIPV an Sonderbauten geliefert. Insbesondere konnte, auch wenn die Umsetzung am Demogebäude aus Kosten- und Termingründen nicht vollzogen wurde, ein Weg zur Planung, Genehmigung und Umsetzung aufgezeigt werden, der bei günstigeren Randbedingungen an alternativen Gebäuden beschritten werden könnte.

## **7.2 Übertragbarkeit und Ausblick**

In dem Forschungsvorhaben PV-HoWoSan konnte gezeigt werden, dass die Umsetzung von BIPV an Hochhäusern große Herausforderungen beinhaltet. Im Dialog mit den zuständigen Genehmigungsbehörden ist es aber möglich, Lösungen zu finden und eine Genehmigung für den Bau einer derart gestalteten Photovoltaikfassade zu erwirken. Als zentrale Randbedingungen und Möglichkeiten hinsichtlich des Genehmigungsprozesses sind zu sehen:

- Die Verwendung von Photovoltaik an einem Hochhaus stellt immer eine Abweichung von der jeweiligen Landesbauordnung dar.
- Im Sonderbau gibt es keine zeitlichen Fristen seitens der Genehmigungsbehörden, was u. U. erhebliche Auswirkungen auf den Bauablauf haben und in dem Fall ein schwer kalkulierbares Risiko darstellen kann.

- In enger Abstimmung mit der Bauaufsicht und gegebenenfalls der Feuerwehr können Wege identifiziert werden, so dass sich ein aus teilweise schwer entflammbar Material bestehendes Bauteil wie ein Element nichtbrennbarer Bauart verhält.
- Für die Ausgestaltung solcher Möglichkeiten ist die genaue Analyse der Bestandssituation notwendig. Wichtige Aspekte hierbei sind:
  - Höhe des Gebäudes
  - Anfahrmöglichkeiten für die Feuerwehr
  - Gefährdungssituation der Fassade, an der PV angebracht werden soll:
  - Anordnung von Fenstern, Abstand zu Fenstern und Öffnungen
  - Ggf. betretbare Räume unterhalb der Fassade
  - Brandmeldeanlage und/oder Löschanlage vorhanden
  - Aufbau der Bestandsfassade: Brennbar Material verbaut?
  - Art der PV-Module: Glas-Glas- oder Glas-Folien-Module.
- Brandversuche, sowohl SBI- als auch Großbrandversuche, können wichtige Informationen hinsichtlich des Brandverhaltens von Produkten oder neuen Systemansätzen zeigen.
- Bestandsgebäude weisen oft Unsicherheiten hinsichtlich der Tragfähigkeit von z.B. Vorsatzschalen oder auch hinsichtlich der exakten Position von Geschossdecken auf. Alternative Befestigungsmöglichkeiten wie die im Projekt entwickelte Dachaufhängung bieten vielversprechende Möglichkeiten, die Standsicherheit auch für Hochhäuser sicherzustellen.

Das Projekt hat weiterhin gezeigt, dass für die Umsetzung von PV an Gebäuden mit hohen Brandschutzanforderungen, wie z.B. denen aus der Gebäudeklasse 5, keine Standardsysteme verfügbar sind. Signifikante Abweichungen von standardisierten Konstruktionen können aber zu erheblichen Mehrkosten führen und sind ohne zusätzliche Förderungen oft nur schwer wirtschaftlich umsetzbar. Dies betrifft alle Phasen der Umsetzung solcher Projekte von der Vor- und Ausführungsplanung über die Montage, Inbetriebnahme bis hin zum Gewährleistungszeitraum. Wichtig ist hier ein eingespieltes gewerkeübergreifendes Team, in dem die Schnittstellen und Verantwortlichkeiten, z.B. durch einen Generalunternehmer, klar definiert sind und ein enger Draht zu den Genehmigungsbehörden sichergestellt werden kann. Hier hat das Projekt PV-HoWoSan gezeigt, dass juristisch verlässliche und verallgemeinerbare Aussagen zu neuen Technologieansätzen sowohl seitens der Genehmigungsbehörden als auch durch Fachplaner nur eingeschränkt eingeholt werden können.

Darüber hinaus hat die fassadenintegrierte Photovoltaik aufgrund der ungünstigeren Ausrichtung verglichen mit Dachanlagen prinzipiell niedrigere Erträge, weshalb alleine über die Stromeinspeisung eine Wirtschaftlichkeit nicht zu erreichen ist. Allerdings passt der zeitliche Verlauf bei fassadenintegrierten Anlagen besser zur Stromnutzung im Gebäude, so dass, da Mieterstrommodelle im Mehrgeschosswohnbau immer beliebter werden, eine hohe Eigennutzungsquote die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessert. Erleichtert wird dies zusätzlich, wenn auch ohne Photovoltaik eine hochwertige Fassade, z.B. als VHF oder Vorhangfassade mit einer hochwertigen Optik, realisiert werden würde und aufwendige Unterkonstruktionen sich nicht allein über den Stromertrag finanzieren müssen.

Gleiches gilt für die Frage, ob BIPV im Neubau oder im Bestand integriert werden soll. Hinsichtlich Statik und hohem Vorfertigungsgrad kann die Integration an Bestandsbauten zu großen Unsicherheiten führen – deutlich einfacher gestaltet sich dies im Neubau. Gleiches gilt für das Thema Brandschutz. Im Sonderbau müssen bei Neubauten ohnehin hohe Brandschutzanforderungen eingehalten werden; Brandmeldeanlagen und Löschanlagen, die beispielsweise zur Löschung der Fassade erweitert werden können, sind hier in der Regel vorgesehen, Zufahrtmöglichkeiten für die Feuerwehr und ausreichend dimensionierte Rettungswege sind vorhanden. Dies alles kann im Brandschutzkonzept die Argumentation von Abweichungen von dem Bauordnungsrecht im Falle von PV erleichtern.

## 8 Literaturverzeichnis

(in alphabetischer Reihenfolge)

[Allianz BIPV 2021] Technische Baubestimmungen für PV-Module als Bauprodukte und zur Verwendung in Bauarten, Allianz Bauwerkintegrierte Photovoltaik e. V., 2021

[Allianz BIPV\_2 2021] Checkliste Brandsicherheit für Bauwerksintegrierte Photovoltaik-Anlagen (BIPV), Allianz Bauwerkintegrierte Photovoltaik e. V., 2021

[DIN EN 13830]: DIN EN 13830. Vorhangfassaden - Produktnorm; Deutsche Fassung EN 13830:2015

[DIN EN 62305]: DIN EN 62305-1:2011-10; VDE 0185-305-1:2011-10, Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (IEC 62305-1:2010, modifiziert); Deutsche Fassung EN 62305-1:2011

[FVHF 2016]: VHF Brandschutz, Brandschutztechnische Vorkehrungen für Vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) nach DIN 18516-1, Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V., 2016

[Flock 2013]: Flock, A.: Das Schlaue Haus in Oldenburg, Feuertrutz Magazin, Verlag für Brandschutzpublikationen, Köln 2013

[GEG 2020]: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden\* (Gebäudeenergiegesetz - GEG), Anlage 7 (zu § 48), 2020

[Schneider 2000]: Schneider, U.: Anforderungen an Brandschutzkonzepte für Sonderbauten, Verein zur Förderung von Ingenieursmethoden im Brandschutz e.V., 2000



Kurzbericht

**Verbundvorhaben:**

**SOLARESBAUEN: PV-HOWOSAN - ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION EINES KOSTENREDUZIERTEN, INDUSTRIELL PRODUZIERTEN PV-EINHÄNGE-FASSADEN-SYSTEMS ZUR SANIERUNG MEHRGESCHOSSIGER WOHNHOCHHÄUSER**

**Teilvorhaben: Entwicklung von maßgeschneiderten Modulen für das RGI System**

Förderkennzeichen: 03SBE0003E

Aschaffenburg, 22.08.2022

Verfasser: Dipl. Ing. Christof Erban – Projektleiter HoWoSan

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren

(Teile dieses Berichts wurden dem Schlussbericht des Verbundkoordinators Fraunhofer IEE Kassel – Autor: Dr. Michael Krause et. al. entlehnt und soweit nötig um die Arbeiten/ Einschätzungen von SUNOVATION ergänzt)



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

<b>Zuwendungsempfänger</b> SUNOVATION Produktion GmbH Glanzstoffstrasse 21 63820 Elsenfeld	<b>Förderkennzeichen</b> 03SBE0003E
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: HoWoSan - ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION EINES KOSTENREDUZIERTEN, INDUSTRIELL PRODUZIERTEN PV-EINHÄNGE-FASSADEN-SYSTEMS ZUR SANIERUNG MEHRGE- SCHOSSIGER WOHNHOCHHÄUSER Teilvorhaben: Entwicklung von maßgeschneiderten Modulen für das RGI System	
<b>Projektleiter</b> Christof Erban <a href="mailto:Christof.Erb@Sunovation.de">Christof.Erb@Sunovation.de</a>	<b>Laufzeit des Vorhabens</b> 01.11.2017 – 31.12.2021
	<b>Berichtszeitraum</b> 01.11.2017 – 31.12.2021

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
	1.1 Einleitung	4
	1.2 Projektziele	4
	1.3 Ziele im Einzelnen	5
	1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
<b>2</b>	<b>Projektergebnisse</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Übertragbarkeit und Ausblick</b>	<b>10</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Einleitung

Der nachfolgende Kurzbericht beschreibt die von der SUNOVATION Produktion GmbH (SUNOVATION) erarbeiteten Ergebnisse des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts „HOWOSAN - ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION EINES KOSTENREDUZIERTEN, INDUSTRIELL PRODUZIERTEN PV-EINHÄNGE-FASSADENSYSTEMS ZUR SANIERUNG MEHRGESCHOSSIGER WOHNHOCHHÄUSER.

Teilvorhaben: Entwicklung von maßgeschneiderten Modulen für das RGI System“. In dem Projekt soll die technologische Machbarkeit eines PV-Fassadensystems, das den speziellen Belangen eines Wohnhochhauses Rechnung trägt, bestätigt werden.

## 1.2 Projektziele

Das Forschungsprojekt PV-HoWoSan hat die Herausforderungen, die bei der Integration von Photovoltaik in Fassaden von Wohnhochhäusern bestehen aufgegriffen und sich zum Ziel gesetzt, ein kostengünstiges, bauphysikalisch funktionierendes, energetisch und wirtschaftlich optimiertes und in mehrfacher Sicht sicheres PV-Fassadensanierungs-Konzept für ein Wohnhochhaus in Frankfurt zu entwickeln und zu realisieren. Damit sollten die Grundlagen für weitere Projekte zur energetischen Sanierung mit aktivierten Fassaden geschaffen werden. An einem konkreten Wohnhochhaus aus dem Bestand der ABG FRANKFURT HOLDING in Frankfurt a.M., Standort „Im Mainfeld“, sollten die aus Sicht des Bauherrn wichtigsten Fragen – Statik, Brandschutz, gesicherter Vertrieb des erzeugten Stroms, Lichtbogenefahre - untersucht und das System im Rahmen der sowieso anstehenden Sanierungsarbeiten der Fassade am Gebäude installiert werden.

Der Lösungsansatz ist die Integration von PV-Elementen in ein Fassadensystem, das den Übergang zum industriellen Bauen darstellt. Die Bauteile werden industriell gebrauchsfertig und hochpräzise vorproduziert und an der Fassade eingehängt („Einhängen und Fertig“). So werden sehr kurze Bauzeiten erreicht, Gerüste und handwerkliche Fehler weitestgehend vermieden. Durch parametrische Planungsmethoden und BIM (Building Information Modeling) sollen dynamische Skalierungseffekte für zukünftige Projekte erzielt werden, die Unsicherheiten, Planungszeiten- und kosten erheblich senken sowie komplexe Wirtschaftlichkeitsberechnungen ermöglichen („Virtuelles Bauen“). Damit können den beteiligten Akteuren - Fachplaner, Investoren, Behörden, Feuerwehr, etc. - belastbare Lösungen im komplexen Planungsprozess dargestellt werden, die zeitnah aktualisiert und rückgekoppelt werden können. Die statischen

Anforderungen werden unter Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Effekte der PV-Elemente untersucht und konstruktiv gelöst („Dicht aber beweglich“). Lebenszyklusfragen und Rückbau werden adressiert und das System über eine Lebenszyklusanalyse (LCA) ökologisch bewertet. Zur Erfüllung der hohen Brandschutzanforderungen bei Hochhäusern werden diese gebäudespezifisch systematisch in einer Datenbank erfasst, um daraus übertragbare, schutzzielorientierte Brandschutzkonzepte auf Basis der Musterbauordnung (MBO) zu entwickeln. Das elektrische System wird hinsichtlich des hohen Vorfertigungsgrads, der Praktikabilität bei der Installation sowie elektrischer Sicherheitsaspekte (Prüfung von Schutzkleinspannungskonzepten) ausgelegt, so dass von der PV-Fassade keine Gefährdung ausgeht („Sichere PV-Fassade“).

### 1.3 Ziele im Einzelnen

Die hierbei verfolgten Einzelziele lauten:

- Entwicklung eines kostengünstigen, bauphysikalisch funktionierenden, energetisch und wirtschaftlich optimierten und in mehrfacher Sicht sicheren PV-Fassadenanierungs-Konzeptes für ein Wohnhochhaus
- Kurze Bauzeiten ohne Gerüste durch konstruktive Integration der PV-Fassadenkomponenten in das RGI-Fassadensystem (Einhängen und Fertig)
- Kurze Planungszeiten durch Einbindung in moderne Planungstools, um Planungszeiten und den Planungsprozess zu verkürzen (Virtuelles Bauen, 3-D-CAD-Module, BIM)
- Hohe Qualität durch höchste Genauigkeit (CNC-Fertigung) und Prüfung des bauphysikalischen Verhaltens der PV-Module in der Fassade
- Parametrisches Planen auch für die PV-Systemkomponenten
- Systematische Erfassung der Brandschutzanforderungen bei Hochhäusern unterschiedlicher Nutzung, Ausstattung, Höhe, etc. nach Musterbauordnung MBO und den Landesbauordnungen LBO in einer open-source-Datenbank.
- Erarbeitung von übertragbaren Brandschutzkonzepten beim Einsatz von PV in der Hochhausfassade für mehrere typische Hochhäuser zur Erfüllung der Musterbauordnung (MBO) und Bereitstellung in einer Datenbank
- Optimierung des Verschaltungskonzepts im Hinblick auf die elektrische Sicherheit, Ertrag, Integration ins Hausnetz und den Ressourcen- und Kostenaufwand
- Ökologische Bewertung der PV-Fassade durch LCA und Bereitstellung von aktualisierten Datensätzen

- Bewertung der System- und Netzdienlichkeit von PV-Fassaden im Vergleich zu Aufdachanlagen
- Techno-ökonomische Modelle auf Basis von BIM unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflüsse auf den Wert einer PV-Fassade (Unsicherheiten in der Lastentwicklung, Änderungen des Nachfrageverhaltens durch andere Lastgruppen, unterschiedliche Komponentenlebensdauer, etc.)
- Einbindung in die Entwurfs- und Genehmigungsplanung für das Sanierungsobjekt „Im Mainfeld“ und Umsetzung im Rahmen der Sanierungsmaßnahme
- Wissenschaftliches Monitoring zur Bewertung der Sanierung mit der PV-Fassade unter Berücksichtigung thermischer, elektrischer und raumklimatischer sowie ökonomischer Aspekte
- Sicherung des Vertriebs des erzeugten PV-Stroms im Gebäude
- Einbindung der Mieter in den Planungsprozess und Nutzerschulung
- Leitfaden zur Darstellung der komplexen Planungsprozesse

## 1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektpartner des Projekts HoWoSan sind:

- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
- Universität Kassel
- ABG FRANKFURT HOLDING ,GmbH
- SUNOVATION Produktion GmbH

Assoziierte Partner:

- Phoenix Contact GmbH & Co. KG
- Stäubli Electrical Connectors.
- 

Darüber hinaus war eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen nicht vorgesehen und ist nicht erfolgt.

## 2 Projektergebnisse

Zentrales Ziel des Forschungsprojekts PV-HoWoSan war die Entwicklung und Realisierung eines kostengünstigen, bauphysikalisch funktionierenden, energetisch und wirtschaftlich optimierten und in mehrfacher Sicht sicheren PV-Fassadensanierungssystems für ein Wohnhochhaus in Frankfurt.

Die Entwicklungspfade zur Umsetzung der geplanten PV-Fassade an dem Hochhaus in Frankfurt beinhalteten nach den Abstimmungen mit den Planern und Genehmigungsbehörden die Entwicklung eines neuartigen Fassadensystems unter Einhaltung der brandschutztechnischen, elektrischen und statischen Anforderungen inklusive der Vorbereitung des Genehmigungsprozesses. Die Entwicklung fand hierbei in drei Pfaden statt:

- Der konzeptionellen Entwicklung eines Fassadenkonzepts für das Hochhaus und dessen Umsetzung und Begutachtung am Mock-up-Teststand des Richard-Grün-Instituts in Ratingen
- Der Erstellung eines Brandprüfmodells inklusive der Durchführung eines Brandversuchs bei der MFPA-Leipzig
- Der Erstellung eines erweiterten Fassadenentwurfs und dessen Umsetzung und energetischer Bewertung am Fassadenteststand des Fraunhofer IEE in Kassel.

Mit Hilfe des Mock-Up am Teststand von RGI konnte der prinzipielle Aufbau des Einhängesystems inklusive der Verkabelung untersucht und an die Anforderung für Hochhausbauten angepasst werden. Das Brandprüfmodell übernahm hierauf aufbauend den konstruktiven Ansatz und beinhaltete alle Anforderungen der Bauaufsicht Frankfurt im Hinblick auf Statik und insbesondere Brandschutz. Mit dem erfolgreich durchgeführten Brandversuch konnte dann gezeigt werden, dass es durch konstruktive Maßnahmen möglich ist, trotz Abweichungen zu den Anforderungen an nichtbrennbare Baustoffe in der Außenwandbekleidung ein Brandverhalten zu erhalten, welches die hohen Anforderungen an Hochhäuser einhalten und damit als Grundlage für eine Zulassung im Einzelfall bzw. eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung dienen kann. Die Erweiterung des Fassadenentwurfs für den Teststand des Fraunhofer IEE in Kassel zielte auf mehrere Aspekte ab. Zum einen wurde der Produktions- und Montageprozess des neuartigen Fassadenkonzepts inklusive des Verkabelungskonzepts analysiert und optimiert. Des Weiteren wurden Anschlussdetails am oberen und unteren Gebäudeabschluss, im Bereich von Fenstern sowie beim Übergang zu weiteren Fassadenseiten entwickelt. Der Aufbau diente dann letztendlich einer energetischen Bewertung des Fassadenkonzepts, welche sowohl die thermischen Aspekte wie Hinterlüftung und Temperaturverhalten der Module als auch die Bewertung der umgesetzten Verkabelungs- und Wechselrichterkonzepte beinhaltete.

Begleitend zu den konstruktiven und versuchstechnischen Untersuchungen wurden im Projekt wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Ökobilanzierung von BIPV, den Anforderungen und Möglichkeiten zur Integration von BIPV in die Planungsmethode Building Information Modeling (BIM), den Fragen von Eigenstromnutzung und der Netzdienlichkeit von Fassaden-PV sowie der Einbindung von BIPV in den Sanierungsprozess von Gebäuden erarbeitet.

Mit den erarbeiteten Erkenntnissen wurde die Umsetzung am Hochhaus in Frankfurt vorbereitet. Basierend auf einer ersten Baugenehmigung für das Fassadensystem wurden die Verankerungspunkte in der mit einem mineralischen Wärmedämmverbund-System neu gedämmten Hochhausfassade als Vorbereitung für die Montage eines PV-Streifens gesetzt. Kostenschätzungen führten dann aber dazu, dass die Umsetzung der Fassade aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisiert werden konnte. Die Gründe hierfür liegen u. a. an:

- Hohen Brandschutzanforderungen
- Einem neuartigen Konstruktionsaufbau, welcher speziell aus Brandschutzgründen Sonderelemente beinhaltet und keine Standardprofile enthalten konnte
- Das Fehlen der Ausführungsplanung für das gewerkeübergreifende Bauen (höherer Abstimmungsaufwand, Risikozuschlag und Gewährleistungsfragen)
- Fehlenden Erfahrungen einer zu beauftragenden ausführenden Firma mit dem neu entwickelten System
- Den Randbedingungen Hochhaus und Bestand → Statische Anforderungen, Windlasten (statisch, speziell auch im Brandfall), Arbeiten in der Höhe, Zeitaufwand für Montage, Unsicherheiten über die Bestandsituation.

Zusammengefasst haben die im Forschungsprojekt PV-HoWoSan erarbeiteten Ergebnisse aber auch der Prozess zur letztlich nicht erfolgten Realisierung am Hochhaus wichtige Erkenntnisse zu Randbedingungen und Hemmnissen für die Umsetzung von BIPV an Sonderbauten geliefert. Insbesondere konnte, auch wenn die Umsetzung am Demogebäude aus Kosten- und Termingründen nicht vollzogen wurde, ein Weg zur Planung, Genehmigung und Umsetzung aufgezeigt werden, der bei günstigeren Randbedingungen an alternativen Gebäuden beschritten werden könnte.

Parallel zu den Untersuchungen der durchgeführten Brandversuche wurden mit Genehmigung aller Projektpartner und des PtJ zwei Filme zu Schulungs- und Marketingzwecken erstellt (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2).

Beide Filme werden von SUNOVATION immer dann an Brandschutzbeauftragte / Feuerwehren und Planungsingenieure verschickt, wenn im Rahmen einer Planung/Ausschreibung, brandschutztechnischen Einschätzung, Erläuterungs- und Demonstrationsbedarf besteht.

Darüber hinaus wurde von SUNOVATION bei der MFPA Leipzig eine gutachterliche Stellungnahme auf Basis der Versuchsergebnisse des Brandversuchs nach DIN 4102:20:2017-10 in Auftrag gegeben, die ebenfalls mehrfach hilfreich bei der Einschätzung hinsichtlich der Eignung von Photovoltaik in Fassaden eingesetzt wurde.



Abbildung 1: Screenshot des Schulungs- und Marketingfilmes: SBI Brandversuch nach DIN EN 13823.

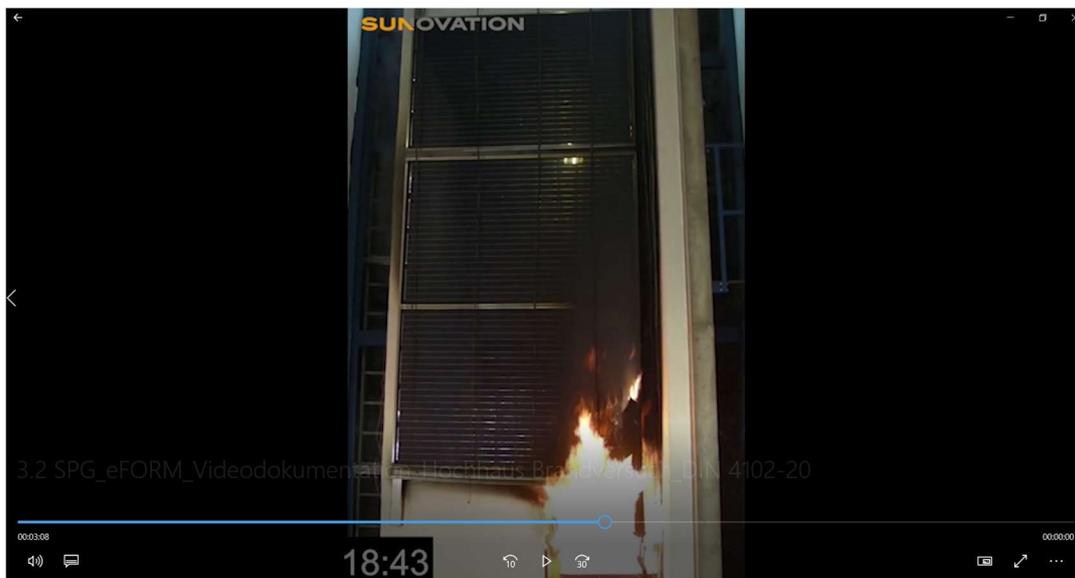


Abbildung 2: Screenshot des Schulungs- und Marketingfilmes: Brandversuch nach DIN 4102:20:2017-10.

### 3 Übertragbarkeit und Ausblick

In dem Forschungsvorhaben PV-HoWoSan konnte gezeigt werden, dass die Umsetzung von BIPV an Hochhäusern große Herausforderungen beinhalten. Im Dialog mit den zuständigen Genehmigungsbehörden ist es aber möglich, Lösungen zu finden und eine Genehmigung für den Bau einer derart gestalteten Photovoltaikfassade zu erwirken. Als zentrale Randbedingungen und Möglichkeiten hinsichtlich des Genehmigungsprozesses sind zu sehen:

- Die Verwendung von Photovoltaik an einem Hochhaus stellt immer eine Abweichung von der jeweiligen Landesbauordnung dar.
- Im Sonderbau gibt es keine zeitlichen Fristen seitens der Genehmigungsbehörden, was u. U. erhebliche Auswirkungen auf den Bauablauf haben und in dem Fall ein schwer kalkulierbares Risiko darstellen kann.
- In enger Abstimmung mit der Bauaufsicht und gegebenenfalls der Feuerwehr können Wege identifiziert werden, so dass sich ein aus teilweise schwer entflammbar Materialen bestehendes Bauteil wie ein Element einer nichtbrennbaren Bauart verhält.
- Für die Ausgestaltung solcher Möglichkeiten ist die genaue Analyse der Bestandssituation notwendig. Wichtige Aspekte hierbei sind:
  - Höhe des Gebäudes
  - Anfahrmöglichkeiten für die Feuerwehr
  - Gefährdungssituation der Fassade, an der PV angebracht werden soll:
  - Anordnung von Fenstern, Abstand zu Fenstern und Öffnungen
  - Ggf. betretbare Räume unterhalb der Fassade
  - Brandmeldeanlage und/oder Löschanlage vorhanden
  - Aufbau der Bestandsfassade: Brennbar Materialien verbaut?
  - Art der PV-Module: Glas-Glas- oder Glas-Folien-Module.
- Brandversuche, sowohl SBI- als auch Großbrandversuche, können wichtige Informationen hinsichtlich des Brandverhaltens von Produkten oder neuen Systemansätzen zeigen.
- Bestandsgebäude weisen oft Unsicherheiten hinsichtlich der Tragfähigkeit von z.B. Vorsatzschalen oder auch hinsichtlich der exakten Position von Geschossdecken auf. Alternative Befestigungsmöglichkeiten wie die im Projekt entwickelte Dachaufhängung bieten vielversprechende Möglichkeiten, die Standsicherheit auch für Hochhäuser sicherzustellen.

Das Projekt hat weiterhin gezeigt, dass für die Umsetzung von PV an Gebäuden mit hohen Brandschutzanforderungen, wie z.B. denen aus der Gebäudeklasse 5, keine Standardsysteme verfügbar sind. Signifikante Abweichungen von standardisierten Konstruktionen können aber zu erheblichen Mehrkosten führen und sind ohne zusätzliche Förderungen oft nur schwer wirtschaftlich umsetzbar. Dies betrifft alle Phasen der Umsetzung solcher Projekte von der Vor- und Ausführungsplanung über die Montage, Inbetriebnahme bis hin zum Gewährleistungszeitraum. Wichtig ist hier ein eingespieltes gewerkeübergreifendes Team, in dem die Schnittstellen und Verantwortlichkeiten, z.B. durch einen Generalunternehmer, klar definiert sind und ein enger Draht zu den Genehmigungsbehörden sichergestellt werden kann. Hier hat das Projekt PV-HoWoSan gezeigt, dass juristisch verlässliche und verallgemeinerbare Aussagen zu neuen Technologieansätzen sowohl seitens der Genehmigungsbehörden als auch durch Fachplaner nur eingeschränkt eingeholt werden können.

Darüber hinaus hat die fassadenintegrierte Photovoltaik aufgrund der ungünstigeren Ausrichtung verglichen mit Dachanlagen prinzipiell niedrigere Erträge, weshalb alleine über die Stromspeisung eine Wirtschaftlichkeit nicht zu erreichen ist. Allerdings passt der zeitliche Verlauf bei fassadenintegrierten Anlagen besser zur Stromnutzung im Gebäude, so dass, da Mieterstrommodelle im Mehrgeschosswohnbau immer beliebter werden, eine hohe Eigennutzungsquote die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessert. Erleichtert wird dies zusätzlich, wenn auch ohne Photovoltaik eine hochwertige Fassade, z.B. als VHF oder Vorhangfassade mit einer hochwertigen Optik, realisiert werden würde und aufwendige Unterkonstruktionen sich nicht allein über den Stromertrag finanzieren müssen.

Gleiches gilt für die Frage, ob BIPV im Neubau oder im Bestand integriert werden soll. Hinsichtlich Statik und hohem Vorfertigungsgrad kann die Integration an Bestandsbauten zu großen Unsicherheiten führen – deutlich einfacher gestaltet sich dies im Neubau. Gleiches gilt für das Thema Brandschutz. Im Sonderbau müssen bei Neubauten ohnehin hohe Brandschutzanforderungen eingehalten werden; Brandmeldeanlagen und Löschanlagen, die beispielsweise zur Löschung der Fassade erweitert werden können, sind hier in der Regel vorgesehen, Zufahrtmöglichkeiten für die Feuerwehr und ausreichend dimensionierte Rettungswege sind vorhanden. Dies alles kann im Brandschutzkonzept die Argumentation von Abweichungen von dem Bauordnungsrecht im Falle von PV erleichtern.