

Bernhard Weller, Jasmin Fischer, Hubertus Wabnitz

Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme (PV-WDVS)

F 2839

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-8963-5

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Forschungsprojekt

Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme (PV-WDVS)

Abschlussbericht

Projektpartner

CIS Solartechnik GmbH & Co. KG

Sto AG

TU Dresden - Institut für Baukonstruktion

Zentralverband Deutsches Baugewerbe (ZDB)



Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller, TU Dresden

Bearbeiter

Dipl.-Ing. Jasmin Fischer, TU Dresden

Dr. Hubertus Wabnitz, Hamburg

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.

AZ: SF-10.08.18.7-10.6 / II 3-F20-08-1-070

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

30.11.2012

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
D-01062 Dresden

Telefon +49 351 46334845
Telefax +49 351 46335039
www.bauko.bau.tu-dresden.de

Inhalt

1	Bedeutung des Vorhabens	5
2	Zusammenfassung	8
3	Projektziele	12
4	Projektpartner	13
4.1	Zentralverband Deutsches Baugewerbe ZDB	13
4.2	Sto AG	14
4.3	CIS Solartechnik GmbH & Co. KG	14
4.4	Institut für Baukonstruktion, TU Dresden	15
5	Projektverlauf	16
5.1	Laufzeit	16
5.2	Arbeitsgemeinschaft	16
5.3	Arbeitsablauf und Vorgehen	16
5.4	Projekttreffen	18
6	Marktpotenzial	20
6.1	Photovoltaik	20
6.2	Wärmedämm-Verbundsysteme	21
6.3	PV-WDVS	23
7	Patentrecherche	25
8	Ausgangssituation	27
8.1	Photovoltaik	27
8.2	Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS)	27
8.3	Baurechtliche Bedingungen	28
8.4	Konstruktive Anforderungen	29
8.5	Bauphysikalische Anforderungen	29
8.5.1	Wärmeschutz und Feuchteschutz	29
8.5.2	Schallschutz	30
8.5.3	Brandschutz	30
8.6	Anforderung an die elektrische Integration	32
8.7	Gestalterische Anforderungen	33
8.8	Sonstige Anforderungen	33
9	Entwicklung Prototyp	34
9.1	Konstruktion und Materialien	34
9.1.1	CIS-Solarmodul	34
9.1.2	Trägerplatte	35
9.2	Alterungstests CIS-Modul	36
9.3	Messungen zur Temperaturentwicklung	37
9.4	Hygrothermische Simulationen	38
9.5	Schälversuche	41
9.6	Haftzugfestigkeitsversuche	45
9.7	Scherversuche	49
9.8	Brandversuche	50
9.9	Elektrische Leistungsmessung	51
9.9.1	Aufbau	51
9.9.2	Testfeld	51
9.9.3	Ergebnisse Prototypen auf dem Testfeld	52
9.10	Verschaltung der Module	53
9.11	Hygrothermisches Verhalten der Testwand	54

Abschlussbericht

Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme

9.12	Visualisierung	57
10	Ökologie	58
10.1	Photovoltaik	58
10.2	PUR-Trägerplatte	59
10.2.1	Herstellung	59
10.2.2	Nutzungsphase	59
10.2.3	End-of-Life	60
11	Wirtschaftlichkeit	61
12	Verbreitung der Ergebnisse	65
12.1	Veröffentlichungen	65
12.2	Vorträge	65
12.3	Messeexponate	66
13	Literaturverzeichnis	67
14	Abbildungsverzeichnis und -nachweis	70
15	Anhang	72

1 Bedeutung des Vorhabens

Der Klimaschutz stellt eine vorrangige gesellschaftliche Aufgabe dar. Hierzu müssen die insbesondere in den Industrieländern überdurchschnittlich hohen Treibhausgas-Emissionen und damit verbunden der Primärenergieverbrauch in den nächsten Jahrzehnten deutlich reduziert werden.

Einen wesentlichen Anteil am deutschen Primärenergieverbrauch hat mit ca. 40% der Gebäudesektor. Damit sind ca. 30% der bundesdeutschen CO₂-Emissionen verbunden, woran die Wärmeerzeugung mit fossilen Brennstoffen großen Anteil hat.

Die Bundesregierung hat in ihrem Klimaschutzprogramm als eines der Hauptziele eine Senkung des Primärenergieverbrauchs im Gebäudesektor um 80% bis zum Jahr 2050 verkündet.

Mit dem Energiekonzept vom 28. September 2010 hat sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, dass der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung im Jahr 2050 80% betragen soll.

Die Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden hat eine Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden zum Ziel durch eine Reduzierung des Energieverbrauches und die Nutzung erneuerbarer Energien.

Eine Anforderung der Richtlinie besagt, dass bis zum Ende des Jahres 2020 alle zu errichtenden Gebäude als „Niedrigstenergiegebäude“ errichtet werden müssen, d.h. als Gebäude, die einen geringen Energiebedarf aufweisen, der vorwiegend aus erneuerbaren Energien gedeckt werden soll.

Mit der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen wird der Rahmen gelegt, das verbindliche Ziel eines 20%igen Anteils am Gesamtenergieverbrauch der EU zu erreichen.

Die EU-Richtlinien und nationalen Umsetzungen stärken die Bedeutung gebäudeintegrierter Photovoltaik. Die Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung-EnEV), die der Umsetzung der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden dient, ermöglicht die Anrechnung des Stroms aus erneuerbaren Energien auf den Endenergiebedarf Strom. Dies führt zu einer Senkung des Primärenergiebedarfs, der beim energetischen Nachweis nach EnEV nachzuweisen ist, und damit zu einer größeren Freiheit bei der Gebäudeplanung. Voraussetzung ist die vorrangige Selbstnutzung des erzeugten und benötigten Stroms. Berechnungen des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES weisen nach, dass der Primärenergiebedarf z.B. bei einem als Passivhaus mit Wärmepumpe geplanten Einfamilienhaus mit einer 3 kWp Photovoltaik-Anlage um 62% gesenkt werden kann [30].

Weitere Anreize zur Selbstnutzung sind die steigenden Strompreise und Technologien, um den durch Photovoltaik erzeugten Strom speichern zu können.

Eine bei Neubauten optimierte bzw. bei Bestandsbauten nachträglich verbesserte Dämmung der Gebäudehülle stellt den Schlüssel für eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs und somit für einen bestmöglichen Klimaschutz im Gebäudesektor da.

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) werden seit ca. 50 Jahren zur energetischen Verbesserung der Außenwände verwendet. Seit den 1960er Jahren sind über 700 Mio. m² Fassadenfläche in Deutschland verarbeitet worden. Einfluss auf die künftige WDVS-Entwicklung nimmt die Neubauentwicklung, die nachträgliche Dämmung von Fassaden sowie die Instandsetzung von Wärmedämm-Verbundsystemen. Dabei sind politische und finanzielle Faktoren wie die Gesetzgebung zur Energieeinsparung bei Gebäuden und die staatliche Förderung, aber auch die demographische Entwicklung wichtige Kriterien. Unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren und Entwicklung gehen Studien davon aus, dass der WDVS-Markt von derzeit ca. 40 Mio. m²/a bis zum Jahr 2025 leicht ansteigt auf bis zu 65 Mio. m²/a. Prognostiziert wird ab 2025 ein Rückgang des Marktes bis 2040.

Wissenschaftliche Studien belegen, dass über 2.000 km² Gebäudeflächen für die Photovoltaik (PV)-Nutzung in Deutschland zur Verfügung stehen, davon ca. 25 % an der Fassade.

Um den Ansprüchen der Architektur gerecht zu werden, sind in die Gebäudehülle integrierte Lösungen zu bevorzugen. Für die Integration in vorgehängte hinterlüftete Fassaden oder in Vorhangfassaden stehen Systeme zur Verfügung. Für die PV-Integration in Wärmedämm-Verbundsysteme fehlen jedoch geeignete Technologien. Dabei stellen Gebäudeflächen mit Wärmedämm-Verbundsystemen ein großes Potenzial für die Energieerzeugung durch Solarenergie dar.

Klimaschutz ist eine Bauaufgabe, die überwiegend von kleinen und mittleren Unternehmen des deutschen Baugewerbes umgesetzt wird. Der Zentralverband Deutsches Baugewerbe (ZDB) beheimatet ca. 35.000 baugewerbliche Unternehmen aus dem Hochbau, Ausbau und Tiefbau. Schätzungsweise 25.000 der ZDB-Mitgliedsunternehmen zählen die energetische Gebäudesanierung bzw. das energetisch optimierte Bauen zu ihrem Hauptgeschäftsfeld. Viele der ZDB-Mitgliedsunternehmen widmen sich auch der Nutzung erneuerbarer Energien bzw. der Geothermienutzung.

Vor diesem Hintergrund hat der ZDB das Forschungsvorhaben Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme (PV-WDVS) initiiert, um mit der Entwicklung einer energieerzeugenden Wärmedämm-Verbundsystem-Fassade dem Baugewerbe neben der oberflächennahen Geothermie ein weiteres Marktsegment im Bereich erneuerbarer Energien zu erschließen. Zugleich vermag das Forschungsvorhaben einen nicht unwesentlichen Beitrag zum Klimaschutz und zur Energiewende zu

leisten. Schließlich wird mit derartigen Innovationen die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Bauwirtschaft gestärkt. Dies ist unerlässlich, um die Beschäftigung im Baugewerbe auch langfristig zu sichern und weiter auszubauen.

Zugleich sieht der ZDB Innovationen auch als erforderlich an, um die Berufsbilder weiterzuentwickeln und attraktiv zu halten. Schon heute ist vor dem Hintergrund des demografischen Wandels ein Wettbewerb um Nachwuchskräfte und Facharbeiter spürbar.

Mit Entwicklungen wie der PV-WDVS-Fassade werden neue Anforderungen an die ausführenden Unternehmen und auch an die Qualifikation des Fachpersonals gestellt. Zugleich erwächst den Unternehmen hierdurch ein Marktsegment mit großer Perspektive, da mit der Energiewende die konsequente Hebung aller Potentiale erneuerbarer Energien alternativlos geworden ist.

Insbesondere Hochbaubetriebe, Stuckateurbetriebe und Unternehmen des Wärme-, Kälte-, Schall- und Brandschutzisolierhandwerks werden ihre Angebotspalette um die PV-WDVS-Fassade erweitern und einen Beitrag zur Nutzung erneuerbarer Energien leisten können.

Der ZDB schätzt, dass sich mit der Entwicklung von PV-WDVS-Fassaden auch positive Beschäftigungseffekte sowohl im Handwerk als auch in der Bauproduktenindustrie ergeben werden.

Leichte Solarpaneele ohne Glas auf Basis der CIS-Dünnschicht-technologie ermöglichen die konstruktive Umsetzung einer wärmedämmenden und gleichzeitig energieaktiven, voll funktionstüchtigen Außenwandbekleidung in einem Aufbau.

Damit unterscheidet sich das innovative PV-WDVS grundlegend von herkömmlichen Solarfassaden, bei denen starre Solarpaneele auf einer vergleichsweise aufwändigen Metallunterkonstruktion montiert werden. Der Forschungsansatz sieht eine einfache, handwerksgerechte Verarbeitung der Systemkomponenten vor und soll deren Dauerhaftigkeit erproben. Ziel ist eine im Vergleich zu konventionellen Systemen verbesserte Wirtschaftlichkeit, die eine breite Anwendung im Rahmen der Gebäudesanierungsprogramme zur CO₂-Reduzierung ermöglichen wird. Insbesondere handelt es sich um eine handwerksgerechte Lösung, wobei baugewerbliche Unternehmen die vorgefertigten PV-WDVS-Module analog zu herkömmlichen WDVS verarbeiten können.

Die Entwicklung des PV-WDVS leistet einen hohen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz. Eine nachträgliche Fassadendämmung führt im Gebäudebestand in Abhängigkeit des Anteils der Fassadenfläche zu einer Energieeinsparung von bis zu 40 %. Hinzu kommen die Energiegewinne durch die PV-Anlage, die voraussichtlich 700 kWh/kWp betragen und zu einer CO₂-Minderung von ca. 620 kg CO₂/kWp führen.

2 Zusammenfassung

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) nehmen bei der Fassadendämmung wegen ihrer bauphysikalischen Eigenschaften, verbunden mit einer hohen Wirtschaftlichkeit, eine besondere Rolle ein. WDVS werden bereits seit rund 50 Jahren sowohl im Neubau als auch im Bestand eingesetzt und stellen somit eine bewährte Bauweise dar. Das Forschungsprojekt soll WDVS mit der Nutzung erneuerbarer Energien kombinieren und Photovoltaik- (PV-) Module als Bauteilschicht integrieren. Leichte Solarpaneele ohne Glas auf Basis der CIS-Dünnschichttechnologie ermöglichen die konstruktive Umsetzung einer wärmedämmenden und gleichzeitig energieaktiven, voll funktionstüchtigen Außenwandbekleidung in einem Aufbau.

Es liegen bisher keine Erkenntnisse über die Integration durch insbesondere Klebung von PV-Elementen in WDVS vor. Im Rahmen des Forschungsprojektes soll unter Berücksichtigung der baurechtlichen, konstruktiven, bauphysikalischen und gestalterischen Randbedingungen eine dauerhaft gebrauchstaugliche und wirtschaftliche Fassade erprobt und entwickelt werden.

Das Ziel soll in einer interdisziplinären Forschungsarbeit durch Beteiligte aus Wissenschaft, Industrie und Praxis realisiert werden.

Die Bearbeitung erfolgt in folgenden Schritten:

- Markt- und Patentrecherche
- Definition der Anforderungen
- Weiterentwicklung eines glasfreien PV-Moduls
- Entwicklung und Prüfung von PV-WDVS-Aufbauten
- Betrachtungen zur Nachhaltigkeit
- Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit
- Verbreitung der Ergebnisse

Eine Auswertung der während der Laufzeit des Projektes von dem Patentinformationszentrum (PIZ) der TU Dresden ermittelten Patentschriften zeigt, dass diese insbesondere die Verbindung flexibler PV-Module auf Dächern, die Verbindung starrer PV-Module, mechanische Montagesysteme und die Herstellung von Solarmodulen betreffen. Patente für die PV-Integration durch Klebung in ein WDVS, die auch die Verbindung der Elemente einschließt, sind nicht bekannt.

Die Projektpartner entschieden sich für eine Vorfertigung des PV-WDVS-Elementes, das heißt eine werksseitige Verklebung des PV-Moduls auf der Trägerplatte. Wegen der staubfreien und temperierten Umgebung im Werk kann bei der Vorfertigung eine gleichbleibende Eigenschaft der Klebverbindung gewährleistet werden, zudem ist eine Verarbeitung durch

entsprechende zu berücksichtigende Aushärtezeiten des Klebstoffes auf der Baustelle u. U. nicht möglich.

Im Rahmen des Projektes wurde von der CIS Solartechnik GmbH & Co. KG das glasfreie PV-Modul für die Anwendung weiterentwickelt. Kunststofffolien weisen im Gegensatz zu Glas eine hohe Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit auf, wodurch die Lebenszeit der Solarmodule verkürzt wird. Durch Aufbringen von Barrierschichten lässt sich die Durchlässigkeit gegenüber Wasserdampf und Sauerstoff reduzieren. Mit dem Einsatz einer neu entwickelten Ultrahochbarrierefolie konnten die Anforderungen erfüllt werden.

Ausgehend von den Anforderungen wurde als Trägerplatte insbesondere eine Polyurethan (PUR)-Hartschaumplatte untersucht. Zusätzlich kam eine Putzträgerplatte aus Blähglasgranulat zum Einsatz.

Messungen am nicht hinterlüfteten, gedämmten PV-Modul sowie hygrothermische Simulationen zeigten, dass Temperaturen im Modul bis zu 85 °C erreicht werden können. Durch hygrothermische Simulationen wurde zudem beurteilt, dass im Bauteil keine kritische Feuchte auftritt.

Mittels Schälversuchen, Haftzugfestigkeitsversuchen und Scherversuchen, die im Friedrich-Siemens-Laboratorium der TU Dresden durchgeführt wurden, wurde ein geeigneter Klebstoff für die Verklebung des glasfreien PV-Moduls auf der Trägerplatte nachgewiesen. An den Klebstoff werden unter anderem folgende Anforderungen gestellt:

- Eignung für den Einsatz im Außenbereich
- Temperaturbeständigkeit von bis zu 85 °C
- Beständigkeit unter Einwirkung von Feuchtigkeit
- Hohe Zugfestigkeit
- Eignung für flächigen Auftrag
- Haftung auf PV-Rückseitenfolie und auf der PUR-Hartschaumplatte
- Spannungsausgleichendes Kleben unterschiedlicher Materialien

Ausgehend von den Anforderungen wurden insbesondere elastische 2K-Klebstoffe untersucht.

Nach ETAG 017 bzw. 004 muss die Haftzugfestigkeit zwischen Deckschicht und Dämmstoff mindestens 0,08 N/mm² betragen oder ein Versagen im Dämmstoff auftreten.

Es wurden verschiedene Materialien unter verschiedenen Temperaturen sowie gealterte und ungealterte Probekörper untersucht. Der Versuchsaufbau für die Haftzugfestigkeitsversuche erfolgte nach DIN EN 1607. Die Prüfungen wurden bestanden. Um eine Aussage über die Haftzugfestigkeit zwischen Rückseitenfolie und Klebstoff zu erhalten, wurden zudem Probekörper ohne Trägerplatte geprüft. Der Bruch trat in der PV-

Rückseitenfolie auf, d.h. er ist auf ein Materialversagen und nicht auf unzureichende Haftung zwischen den Materialien zurückzuführen.

Die thermischen Längenänderungen des PV-Moduls beanspruchen den Klebstoff auf Scherung. Durch Scherversuche wurden die Temperaturexpansionen simuliert.

Das hygrothermische Verhalten der Testwand wurde mit verschiedenen Aufbauten in der Kurzbewitterungsanlage bei der Sto AG untersucht. Die Testwand wurde folgendem Zyklus unterworfen. Es erfolgt eine Erwärmung auf 70 °C bzw. auf 85 °C durch IR-Bestrahlung, wobei die Temperatur für zwei Stunden gehalten wird. Anschließend erfolgt eine zweistündige Berieselung bei einer Wassertemperatur kleiner als 20 °C. Die Testwand wurde 200 Zyklen unterworfen.

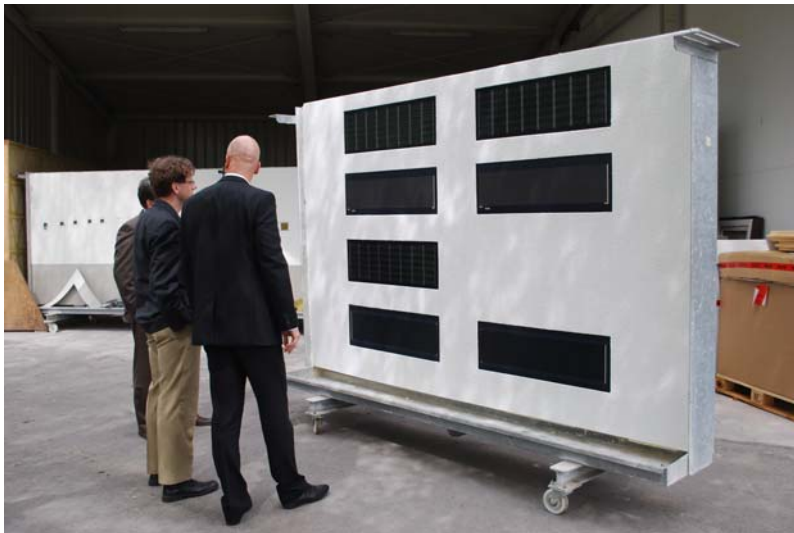


Abbildung 1

PV-WDVS Testwand mit CIS-Photovoltaik

Als Trägerplatte kamen sowohl eine PUR-Hartschaumplatte als auch eine Putzträgerplatte zum Einsatz. Als Anschlusslösungen wurden zwei Varianten getestet. Zum einen wurde um das PV-Modul ein Randstreifen vorgesehen, der mit dem Armieren des WDVS mit überarmiert wird. Bei der zweiten Variante wurden ein Kantenprofil und ein Fugenband um die Trägerplatte gelegt, die bündig mit dem PV-Modul abschließen. Es wurden PV-Module der CIS Solartechnik und der Solarion AG getestet.

Die Elemente, die mit dem empfohlenen Klebstoff aufgeklebt waren, haben die Prüfung bestanden.

Das Erscheinungsbild des PV-WDVS kann durch die Modulgröße sowie die Modulordnung und Variation der Abstände entscheidend bestimmt werden. In Abhängigkeit der Zellanzahl kann die Modulgröße theoretisch frei gewählt werden. Die Farbwirkung der Fassade könnte z.B. durch einen farbigen Modulrand oder durch eingefärbte Oberputze bzw. durch farbige Beschichtung des Oberputzes verändert werden.

In der Ökobilanz werden Produktsysteme hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus beurteilt. Während das Bauteil

Photovoltaikmodul bzw. die Photovoltaikanlage getrennt bilanziert werden kann, hängt die Energieeinsparung durch Dämmstoffe von dem Gebäude ab, sodass eine getrennte Betrachtung von PV und Dämmstoff erfolgte. Ein Beurteilungskriterium für die PV ist die Energierückgewinnungszeit, die für CIS-Module in Deutschland unter drei Jahren liegt. WDVS zeichnen sich ebenso durch geringe energetische Amortisationszeiten aus, die bei einer Sanierung von Altbauten häufig bei unter einem Jahr liegen.

Die Wirtschaftlichkeit der in das WDVS integrierten PV hängt neben den Investitionskosten und den Betriebskosten u.a. vom Ertrag der Anlage ab. Der Ertrag der Anlage wird vom Standort und damit den Wetterbedingungen, der Ausrichtung, der Einbausituation und damit Temperaturentwicklung im Modul sowie der Anlagengüte mit ihrer optimalen Auslegung und Installation bestimmt. Die Art der Finanzierung, evtl. Förderung, der Anteil des Eigenverbrauchs und die Strompreisentwicklung nehmen ebenso Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Berechnungen zeigen, dass sich die PV-Anlage in den ersten 10 Jahren amortisieren kann.

3 Projektziele

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) nehmen bei der Fassadendämmung wegen ihrer optimalen bauphysikalischen Eigenschaften, verbunden mit einer hohen Wirtschaftlichkeit, eine hervorragende Rolle ein. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird das WDVS mit der Nutzung erneuerbarer Energien kombiniert und Photovoltaik (PV) als Bauteilschicht integriert.

Die Verwendung von flexiblen, glasfreien PV-Modulen ermöglicht einen Bauteilaufbau ohne aufwendige und kostenintensive Unterkonstruktion, wie sie in Vorhangfassaden oder vorgehängten hinterlüfteten Fassaden notwendig ist. Da keine Erkenntnisse über die Integration durch insbesondere Klebung von PV-Elementen in WDVS vorliegen, ist ein Forschungsschwerpunkt, durch mechanische und hygrothermische Material- und Bauteilprüfungen einen geeigneten Klebstoff für die Anwendung nachzuweisen.

Bei den flexiblen PV-Modulen kommt statt üblicherweise Glas eine transparente Kunststoffolie zum Einsatz. Kommerziell erhältliche Kunststoffolien weisen im Gegensatz zu Glas hohe Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeiten auf, was die Lebenszeit der Solarmodule verkürzt. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist deshalb auch die Entwicklung bzw. Untersuchung von Barrierefolien, die die geforderten Anforderungen erfüllen.

Die gewonnenen Ergebnisse sollen die Voraussetzung für die Produktentwicklung und Markteinführung einer nachhaltigen, baukonstruktiv und bauphysikalisch geeigneten Konstruktion schaffen, die die besonderen Anforderungen der Photovoltaik berücksichtigt.

Wesentliche Forschungsinhalte und -ziele sind:

- Markt- und Patentrecherche
- Definition der Anforderungen
- Weiterentwicklung eines glasfreien PV-Moduls
- Entwicklung und Prüfung von PV-WDVS-Aufbauten
- Betrachtungen zur Nachhaltigkeit
- Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

4 Projektpartner

Das Projekt wurde aus einer Gemeinschaft aus Forschungsinstitut und Partnern der Solar- und Bauindustrie untersucht.

4.1 Zentralverband Deutsches Baugewerbe ZDB

Der Zentralverband Deutsches Baugewerbe (ZDB) vertritt ca. 35.000 Mitgliedsbetriebe und stellt den größten Bauwirtschaftsverband Deutschlands dar. Die in Bauinnungen organisierten Mitgliedsunternehmen des ZDB beschäftigen über 400.000 Arbeitnehmer.

Zu den Aufgaben des Verbandes zählen auch die Förderung technischer Innovationen und die Unterstützung der Mitgliedsunternehmen bei der Erschließung neuer Marktfelder.

Die Bauwirtschaft ist die Schlüsselbranche der deutschen Volkswirtschaft. Mit einem Investitionsvolumen von 214 Mrd. Euro bietet sie im Bauhauptgewerbe ca. 730.000 Menschen Arbeits- und Ausbildungsplätze. Mittelbar hängen von ihr 2,3 Millionen Arbeitsplätze ab.

Eine wesentliche Stärke der deutschen Bauwirtschaft ist ihre mittelständische Struktur. Die familiengeführten kleinen und mittleren Bauunternehmen beschäftigen rund 80 % der ca. 730.000 Arbeitnehmer im deutschen Bauhauptgewerbe und erbringen ca. 70 % der Bauwirtschaftsleistung.

Untersuchungen von Wirtschaftsinstituten belegen die positiven volkswirtschaftlichen Effekte von Bauinvestitionen. So werden durch einen Euro öffentlicher Förderung von Bauinvestitionen bis zu 15 Euro Gesamtinvestitionen ausgelöst.

Die Klimaschutzpolitischen Ziele und die Energiewende gehören zu den größten Herausforderungen für die Bauwirtschaft. Bis zum Jahr 2050 soll der Energieverbrauch um 80 % gesenkt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine erhebliche Steigerung der derzeitigen Modernisierungsrate von ca. 1 % p. a. erforderlich.

Einen wesentlichen Baustein zur Energiewende stellt die verstärkte Nutzung regenerativer Energien im Gebäudebereich dar.

Vor diesem Hintergrund hat der ZDB das Forschungsvorhaben PV-WDVS initiiert, um mit der Entwicklung einer energieerzeugenden Wärmedämm-Verbundsystem-Fassade dem Baugewerbe neben der oberflächennahen Geothermie ein weiteres Marktsegment im Bereich erneuerbarer Energien zu erschließen.

4.2 Sto AG

Die Sto AG gehört zu den bedeutenden Herstellern von Bauprodukten, insbesondere im Bereich gedämmter Fassadensysteme.

Sto ist weltweiter Marktführer für Wärmedämmverbundsysteme und ist aktiv in vielfältigen internationalen Initiativen. Mehrere Innovations-, Solar- und Bauphysikpreise bestätigen die führende Innovationskraft des Konzerns. Das Unternehmen zählt zu den "Top 100" innovativer Unternehmen.

Mit einem Konzernumsatz von mittlerweile mehr als einer Milliarde € und etwa 4.500 Mitarbeitern verfügt Sto über ausreichend Kraft, um einen entscheidenden Baustein in der Energiewende beisteuern zu können. Sto Produkte bewirken seit 1965 eine Energieeinsparung von rund 64 Milliarden Litern Heizöl, dies entspricht etwa 199 Mio. Tonnen CO₂.

Forschungsprojekte der Sto AG (erneuerbare Energien)

- 1988 - 1993 Transparente Wärmedämmung; BMFT 0335003I
- 1992 - 1996 Thermotrope Schichten 1 und 2; BMFT
- 1998 - 2001 ISOTEG - Bayerische Forschungsförderung
Innovative Systeme und Optimierte Techniken zur Energetischen Gebäudesanierung
- 1999 - 2003 Latentwärmespeicher für Bausysteme; BMFT 0329840B
- 1999 - 2004 Fassadenkollektor BMFT 0327234A
- 2006 - 2007 PV-VH Fassaden; BMVBS Z6-10.08.18.7-07.9/II2-F20-06-027
- 2008 - 2012 Cost Effective EU NMP2-LA-2008-212206

4.3 CIS Solartechnik GmbH & Co. KG

Als Projektpartner der PV-Industrie konnte die CIS Solartechnik GmbH & Co. KG gewonnen werden.

Die CIS Solartechnik GmbH & Co. KG verfügte über ein Entwicklungslabor sowie über eine Pilotproduktionslinie für glasfreie CIS-Photovoltaikmodule mit einem Photohalbleitermaterial, das aus Kupfer (Cu), Indium (In) und Selen (Se) hergestellt wird.

Charakteristisch für die Entwicklung sind der Einsatz galvanischer Prozesse, die Verwendung von Metallfolie als Träger des Zellmaterials und die Fertigung von Rolle zu Rolle.

Die CIS Solartechnik GmbH & Co. KG hat ihren Entwicklungsbetrieb zum Ende des Jahres 2011 eingestellt. Der geplante Aufbau einer eigenen Serienproduktion hat sich nicht mehr als wirtschaftlich herausgestellt.

4.4 Institut für Baukonstruktion, TU Dresden

Schwerpunkt von Forschung und Lehre des Instituts für Baukonstruktion der Technischen Universität Dresden bildet insbesondere die Fassadenplanung mit dem Konstruktiven Glasbau, der gebäudeintegrierten Photovoltaik und der energiesparenden Bauweise. Zu dem Institut zählen 25 wissenschaftliche und nichtwissenschaftliche Mitarbeiter aus den Bereichen Bauingenieurwesen, Architektur und Chemie.

Das Institut für Baukonstruktion bietet durch langjährige Forschungs- und Projekterfahrung eine hohe Kompetenz und Erfahrung im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik.

Es verfügt durch das institutseigene Forschungslabor, das Friedrich-Siemens-Laboratorium, über eine umfangreiche Ausstattung für experimentelle Untersuchungen an Klebstoff- und Foliensystemen sowie an Substratoberflächen.

So stehen z.B. zur Bestimmung von Materialkennwerten und der Festigkeiten eine Universalprüfmaschine, eine elektrodynamische Prüfmaschine und eine Zeitstandanlage zur Verfügung. Die künstliche Alterung von Materialien kann in den Klimaprüfkammern für klein- und großformatige Bauteile, in der Korrosionsprüfkammer, im Wärmeschränk und der UV-Bewitterungsanlage erfolgen.

5 Projektverlauf

5.1 Laufzeit

Das Forschungsprojekt „PV-WDVS“ wurde zum 01.05.2010 mit einem Zuwendungsbescheid bewilligt. Die Laufzeit war zunächst bis zum 31.01.2012 genehmigt und wurde kostenneutral bis zum 30.06.2012 verlängert.

5.2 Arbeitsgemeinschaft

Forschende Stelle	Technische Universität Dresden, Institut für Baukonstruktion, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller, Dipl.-Ing. Jasmin Fischer
-------------------	---

Initiative und Koordination	Zentralverband Deutsches Baugewerbe (ZDB), Berlin, Dipl.-Ing. Michael Heide
-----------------------------	---

Weitere beteiligte

Forschungseinrichtungen	CIS Solartechnik GmbH & Co. KG, % Aurubis AG, Hamburg, Dr. Adalbert Lossin, Dr. Hubertus Wabnitz; Sto AG, Stühlingen, Dipl.-Phys. Markus Zwerger
-------------------------	---

5.3 Arbeitsablauf und Vorgehen

Die Integration in Dämmsysteme erfordert leichte und flexible Photovoltaik-Module. Im Rahmen des Projektes werden deshalb glasfreie Folienmodule mit Dünnschichttechnologie, die sich zudem durch variable Größen und Formen auszeichnen, für den speziellen Einsatzort an der Fassade weiterentwickelt.

Der Aufbau des PV-WDVS-Elementes erfordert eine besondere bauphysikalische Betrachtung, die durch hygrothermische Simulationsberechnungen unterstützt wird.

Teilaufgabe des Projektes ist zudem, die dauerhafte Eignung von Klebstoffen für die Modulbefestigung durch Haftzugfestigkeitsversuche zu prüfen. Schließen werden die Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Elementes und des Systems nach den Vorgaben der EOTA getestet.

Weitere Untersuchungen gelten der Modulverschaltung und der Integration der Leitungen. Betrachtungen zur energetischen und wirtschaftlichen Amortisation weisen die Nachhaltigkeit des Systems nach.

Die folgende Tabelle zeigt den Arbeitsplan über die Projektlaufzeit.

					2010			2011			2012			2012		
		Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.
Paket	Bearbeitungsinhalt	ZDB	TUD	Sto	CIS											
1.	Ermittlung der Rand- und Rahmenbedingungen															
1.1	Markt Recherche, Analyse															
1.2	Patentrecherche															
1.3	Baurechtliche Bedingungen - Leitfaden															
2.	Weiterentwicklung der PV- und WDVS-Technologie															
2.1	Definition architektonischer Kriterien															
2.2	Definition baukonstruktiver Kriterien															
2.3	Definition physikalischer und elektrotechn. Kriterien															
2.4	Entwicklung und Herstellung PV-Prototypen															
2.5	Entwicklung geeigneter WDVS Aufbauten															
2.6	PV-WDVS Prototypen															
A	1. Zwischenbericht															
3.	Untersuchung und Auswertung - Prototypen															
3.1	Temperaturentwicklung in PV-WDVS															
3.2	Praxis- Tests Elementmechanik															
3.3	Praxis-Tests Langzeitverhalten (Klimakammern)															
3.4	Elektrische Vermessung / Datenblattangaben unter Berücksichtigung der Temperaturentwicklung und des Langzeitverhaltens															
4.	Untersuchungen an der Versuchswand															
4.1	Planung und Auslegung der Versuchswand															
4.2	Errichtung															
4.3	Bewertung der architektonischen Wirkung															
4.4	Monitoring bauphysikalischer Aspekte															
4.5	Monitoring energetischer Aspekte															
4.6	Gesamtoptimierung															
B	2. Zwischenbericht															
5.	Wirtschaftlichkeit und energetische Bewertung															
5.1	Ertragspotenzial															
5.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse															
5.3	Energetische Gesamtbewertung PV-WDVS															
6.	Auswertung der Ergebnisse															
6.1	Einsatzbereiche und Marktpotenzial															
6.2	Darstellung geeigneter Einsatzbeispiele															
6.3	Anwendungsleitfaden															
7.	Zusammenfassung / Darstellung der Ergebnisse															
7.1	Schlussbericht, Verhütung															

Abbildung 2

Ursprünglich geplanter Arbeitsplan

5.4 Projekttreffen

Termin	Teilnehmer	Ort
1. Arbeitstreffen am 16. Juni 2010	Dr. Hubertus Wabnitz (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. Michael Heide (ZDB) Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller (TU Dresden) Dipl.-Ing. (FH) Claudia Hemmerle (TU Dresden)	Institut für Baukonstruktion, TU Dresden
1. Projekttreffen am 16. September 2010	Dipl.-Ing. Miriam Hohfeld (BBSR) Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer (Universität Stuttgart) Dr. Adalbert Lossin (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dr. Hubertus Wabnitz (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dr. Juan Rechid (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. Michael Heide (ZDB) Ingrid Weindl (ZDB) Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller (TU Dresden) Dipl.-Ing. (FH) Claudia Hemmerle (TU Dresden) Dipl.-Ing. Jasmin Fischer (TU Dresden)	CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG, Hamburg
2. Arbeitstreffen am 06. Oktober 2010	Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. (FH) Claudia Hemmerle (TU Dresden) Dipl.-Ing. Jasmin Fischer (TU Dresden)	Sto AG, Stühlingen
3. Arbeitstreffen am 08. Dezember 2010	Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. Michael Heide (ZDB) Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller (TU Dresden) Dipl.-Ing. (FH) Claudia Hemmerle (TU Dresden) Dipl.-Ing. Jasmin Fischer (TU Dresden)	Institut für Baukonstruktion, TU Dresden
2. Projekttreffen am 23. Februar 2011	Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer (Universität Stuttgart) Dipl.-Ing. Marco Schmidt (TU Berlin) Dr. Adalbert Lossin (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dr. Hubertus Wabnitz (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. Michael Heide (ZDB) Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller (TU Dresden) Dipl.-Ing. Jasmin Fischer (TU Dresden)	Zentralverband des Deutschen Baugewerbes, Berlin
4. Arbeitstreffen am 15. August 2011	Dr. Hubertus Wabnitz (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dr. Juan Rechid (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. Michael Heide (ZDB) Dipl.-Ing. Jasmin Fischer (TU Dresden)	CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG, Hamburg
3. Projekttreffen am 27. Oktober 2011	Dr. Hubertus Wabnitz (CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG) Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. Michael Heide (ZDB) Dipl.-Ing. Marco Schmidt (TU Berlin) Dipl.-Wirt.-Ing. Ewald Japs (Uni Paderborn) Dipl.-Ing. Jasmin Fischer (TU Dresden)	Sto AG, Stühlingen

4. Projekttreffen am 19. April 2012	Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. Michael Heide (ZDB) Dipl.-Ing. Markus Münch (Solarion AG) Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Melina Wachsmuth (Solarion AG) Dipl.-Ing. Jasmin Fischer (TU Dresden)	Sto AG, Stühlingen
5. Projekttreffen/ Abschlusstreffen am 27. Juni 2012	Dipl.-Ing. Miriam Hohfeld (BBSR) Dipl.-Phys. Markus Zwerger (Sto AG) Dipl.-Ing. Michael Heide (ZDB) Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller (TU Dresden) Dr.-Ing. Sven Jakubetz (TU Dresden) Dipl.-Ing. Jasmin Fischer (TU Dresden)	Institut für Baukonstruk- tion, TU Dresden

Abbildung 3

Projekttreffen

6 Marktpotenzial

6.1 Photovoltaik

Der Anteil der erneuerbaren Energien betrug 2009 am Bruttostromverbrauch von 582,5 TWh gut 16 %. Photovoltaik hatte einen Anteil von gut 1%. [3]

Mit dem Energiekonzept vom 28. September 2010 hat sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, dass der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung im Jahr 2050 80% betragen soll. [4]

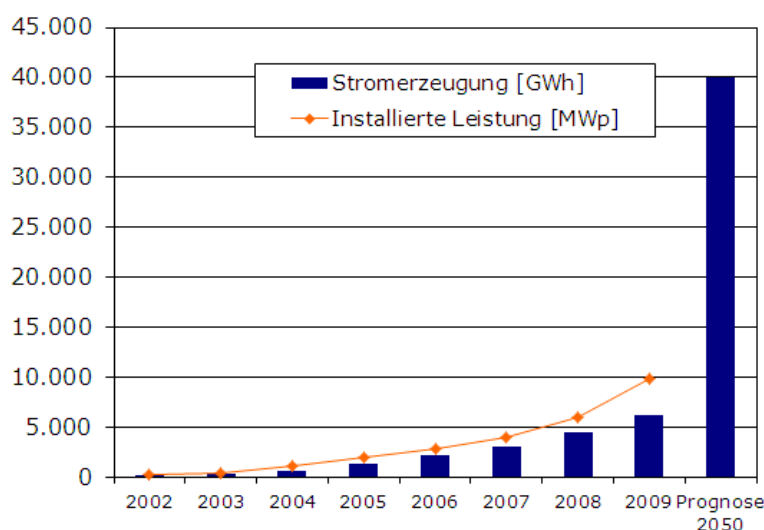


Abbildung 4

Marktentwicklung PV in Deutschland

Basis für das Energiekonzept der Bundesregierung ist eine Studie mit Energieszenarien zur künftigen Energieversorgung Deutschlands, die von der Arbeitsgemeinschaft Prognos, dem Energiewirtschaftlichen Institut an der Universität zu Köln (EWI) und der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) erarbeitet wurde. Das Referenzszenario stellt eine Entwicklung dar, falls die Politik wie bisher mit Anpassungen weiterbetrieben würde. Es wurden vier Zielszenarien untersucht, die eine Entwicklung bei festgelegten Vorgaben für die Anteile der erneuerbaren Energien und Treibhausgasemissionsbeschränkung zeigen. Die Photovoltaik soll demnach 2050 mit 40.000 GWh zur Deckung des Primärenergiebedarfs beitragen, das sind ca. 2% des für 2050 prognostizierten Primärenergiebedarfs. [29]

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das im April 2000 als Weiterentwicklung des Stromeinspeisegesetzes in Kraft trat, ist hauptverantwortlich für den hohen Anteil von erneuerbaren Energien am Stromverbrauch.

Die Kürzung der Einspeisevergütung für Solarstrom verändert sich in Abhängigkeit der in Deutschland jährlich neu installierten Leistung (Marktvolumen) [17]. Der Preis für eine schlüsselfertige Photovoltaikanlage betrug im Jahr 2010 durchschnittlich 2.740 Euro netto je installiertem Kilowatt-

peak (kWp). Die Preissenkung gegenüber dem Vorjahr entspricht gut 20%.

6.2 Wärmedämm-Verbundsysteme

Wärmedämm-Verbundsysteme werden seit ca. 50 Jahren zur energetischen Verbesserung der Außenwände verwendet. Seit den 1960er Jahren sind über 700 Mio. m² Fassadenfläche verarbeitet worden.

Einen starken Aufschwung erhielt der WDVS-Markt nach der Wiedervereinigung, da die staatliche Förderung zu der Instandsetzung von Block- und Plattenbauten den Absatz verdreifachte. [20]

Als die Fördergelder für die neuen Bundesländer 1997/98 stark reduziert wurden, stagnierte der Markt bzw. war rückläufig. Im Jahr 2006, nach der Bekanntgabe von Fördermitteln und dem Wegfall der Eigenheimzulage stieg der Markt wieder an und erreichte einen Absatz von 35-40 Mio. m²/a. [20]

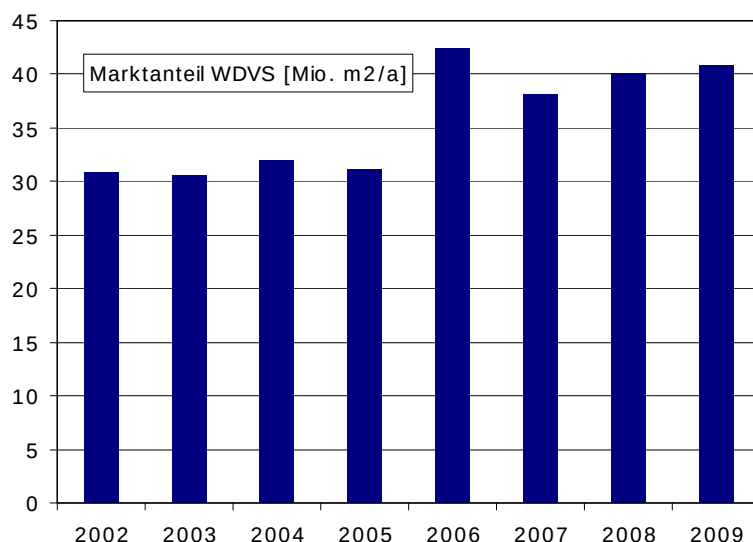


Abbildung 5

Marktentwicklung WDVS in Deutschland

Einfluss auf die künftige WDVS-Entwicklung nimmt die Neubauentwicklung, die nachträgliche Dämmung von Fassaden sowie die Instandsetzung von Wärmedämm-Verbundsystemen. Dabei sind politische und finanzielle Faktoren wie die Gesetzgebung zur Energieeinsparung bei Gebäuden und die staatliche Förderung, aber auch die demographische Entwicklung wichtige Faktoren. [20]

Bei den ca. 18 Mio. Wohngebäuden und 2 Mio. Nichtwohngebäuden stehen gut 4 Mrd. m² als (verputzte) Fassadenflächen zur Verfügung, 700 Mio. m² davon sind mit einem WDVS bekleidet. Renovierungszyklen liegen bei WDVS der 2. Generation bei ca. 35 Jahren, bei WDVS der 1. Generation bei 25-30 Jahren. Es gibt aber keine gesicherten Zahlen, inwieweit Renovierungsmaßnahmen durchgeführt werden oder ob die Gebäude abgerissen worden sind. So haben die Plattenbauten, die nach der Wiedervereinigung mit WDVS gedämmt worden sind, eine hohe Abrissrate. [20]

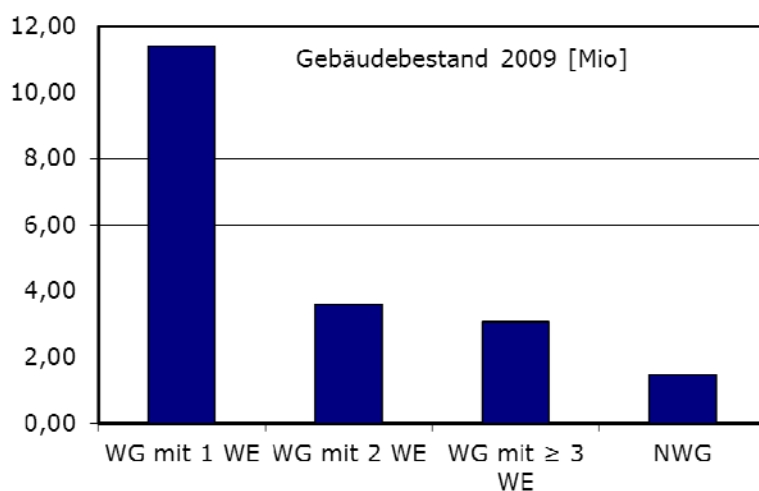


Abbildung 6

Gebäudebestand 2009

Das Aufdoppeln eines bestehenden WDVS wird eher bei neuen WDVS im Rahmen von Gewährleistungsansprüchen genutzt. Beschädigte WDVS werden häufig abgerissen und durch neue ersetzt. Diese Flächen wurden nicht separat erfasst. [20]

Unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren und Entwicklung gehen Studien davon aus, dass der WDVS-Markt bis 2025 ansteigt bis zu 65 Mio. m²/a. Es folgt ein Rückgang des Marktes bis 2040. In den Folgejahren wird der Markt, der auch den Neubaumarkt erfassen wird, voraussichtlich wieder ansteigen. [20]

Die Abbildung 7 beinhaltet den Markt für Neubauten, Altbauten mit erstmaligem WDVS und Altbauten, deren WDVS intakt gesetzt werden muss, d.h. abgerissen und ersetzt wird. (Renovierungszyklen)

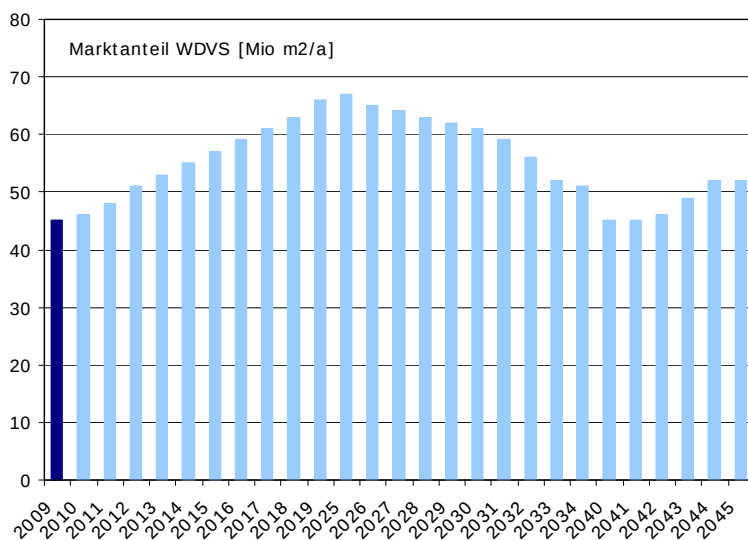


Abbildung 7

Prognose zum zukünftigen WDVS-Markt

6.3 PV-WDVS

Das Potenzial zur Anwendung des PV-WDVS wird insbesondere für großflächige, verschattungsfreie Fassaden im Mehrfamilienhausbau und im Gewerbebau – sowohl im Gebäudebestand als auch Neubau – gesehen. Für kleinteilige Flächen soll geprüft werden, inwieweit sich Modul-Wechselrichter, d.h. je Modul ein Wechselrichter, anbieten, wodurch die Module der verfügbaren Fläche optimal angepasst werden können sowie der Leistungsabfall eines Stranges durch Verschattung vermieden würde.

Nordfassaden sind aus wirtschaftlichen Gründen von der PV-Belegung auszunehmen. Nordfassaden können als Erträge nur gut 30 % der optimalen, d.h. um 30° geneigten südorientierten Fläche erreichen, Ost- und Westfassaden 55 % und Südfassaden 70 %. [31]

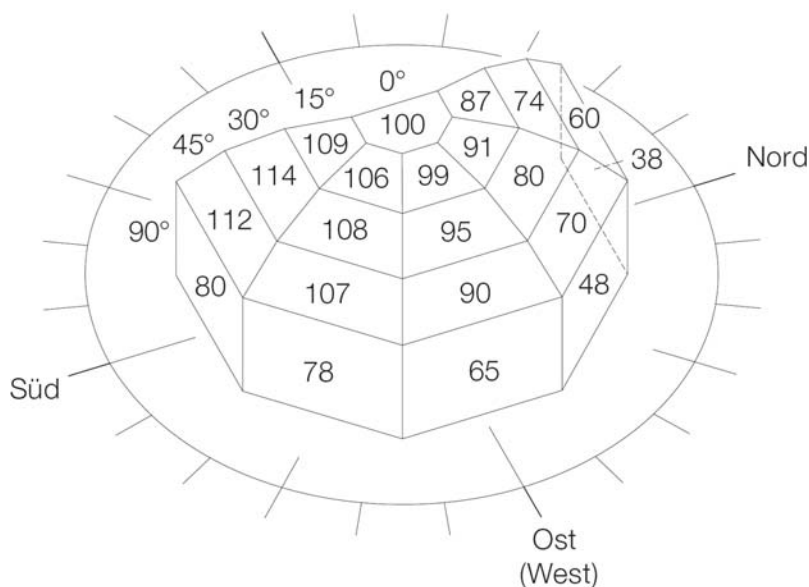


Abbildung 8

Einstrahlung unterschiedlicher Flächenorientierungen im Vergleich zur Horizontalen in [%]

Verschattungen treten auf durch benachbarte Bauwerke oder Pflanzen, durch gebäudeeigene Vorsprünge oder Anlagen sowie durch temporäre Beeinträchtigungen wie Schnee oder Verschmutzung. Verschattungen reduzieren zum einen die nutzbare Fläche, zum anderen können kleinste Verschattungen den Stromfluss einer Zelle verringern oder gar erliegen lassen. Die weiteren, aktiven Zellen treiben den Strom durch die dunkle Zelle, in der die Energie in Wärme umgesetzt wird. Solarmodule sind aus diesem Grund i.d.R. mit Bypassdioden ausgestattet, die den Strom an den verschatteten Zellen vorbeileiten. Üblicherweise wird eine Gruppe von 12-24 Zellen geschützt. Die Leistung sinkt um den Anteil der überbrückten Zellgruppe. Dünnschichtmodule mit langen Zellstreifen reagieren weniger empfindlich als kristalline Module, da die Zellstreifen meist nicht komplett abgedeckt werden. [31]

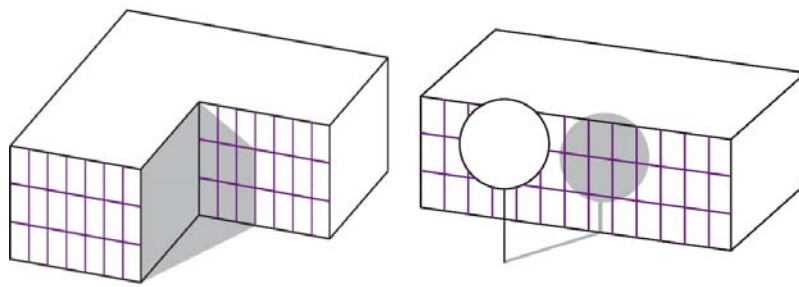


Abbildung 9

Verschattungsursachen

Berücksichtigt man diese Einflussfaktoren, ist von einem Marktpotenzial von maximal 5 Mio. m²/a PV-WDVS in den nächsten Jahrzehnten auszugehen.

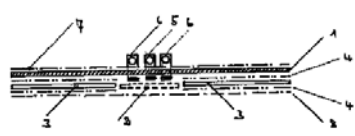
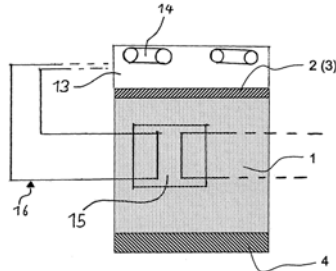
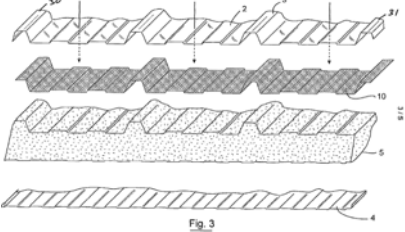
7 Patentrecherche

Die Patentrecherche soll klären, ob Patente veröffentlicht bzw. offen gelegt sind, die gleiche bzw. ähnliche Forschung zum Inhalt haben.

Das Patentinformationszentrum (PIZ) der TU Dresden wurde über die Laufzeit des Projektes mit einer Schutzrechtsrecherche mit folgendem Gegenstand beauftragt:

- flexibles CIS (CuInSe_2)-Photovoltaik-Element, das mit einer Dämmplatte durch Kleben verbunden ist
- Integration in ein Wärmedämm-Verbundsystem

Hervorzuheben sind aus den Recherchen insbesondere folgende Patentschriften in Abbildung 10.

Status Pub.-nummer – Pub.-datum Titel	Thema	
Patentschrift DE10048034B4 – 20070524 Glasloses, flexibles Solar-Laminat, auf seiner Rückseite enthaltend eine Selbstklebeschicht mit elektrischen Leitungen	flexibles Solarmodul, mit Selbstklebeschicht versehen zur Befestigung auf Wänden und Dächern	
Patentschrift WO2009062689A2 – 20090522 Roof or Façade Panel with a Solar Panel	Mit einer Dämmplatte verschäumtes PV-Modul	
Patentschrift GB2460762 – 20091216 Composite insulating panel with solar collector	Eingeschäumte Dämmung mit flexibler PV	

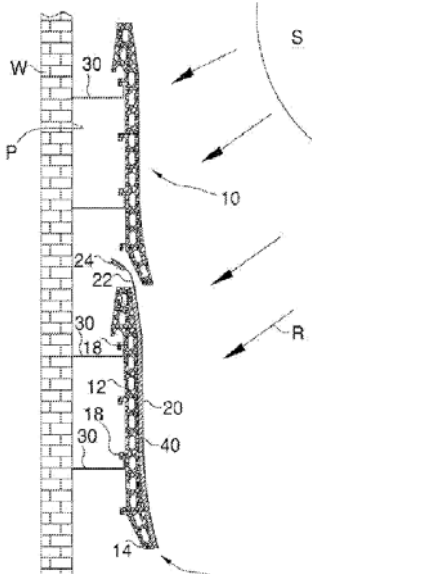
Patentschrift IT2010VR0120 – 20110912 Element for ventilated wall	Hinterlüftete Fassade mit glas- freien PV-Modulen	
--	--	--

Abbildung 10

Patentrecherche

Die weiteren gefundenen und gesichteten Patente betreffen insbesondere

- die Verbindung flexibler Substrate auf Dächern mit Klebstoff oder Klettverschluss
- die Verbindung starrer Substrate (i.d.R. Glas)
- mechanische Montagesysteme
- die Herstellung von Solarmodulen

Im Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass Patente für die Verbindung flexibler PV-Module mit Dämmplatten insbesondere für die Integration im Dach existieren und für einzelne Elemente für die Fassade, Patente für die Integration in ein WDVS, die auch die Verbindung der Elemente einschließt, sind nicht bekannt.

8 Ausgangssituation

8.1 Photovoltaik

Unter Photovoltaik versteht man die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie. Diese Umwandlung findet in einer photoaktiven Halbleiterschicht (Absorber) statt, wo die Absorption von Photonen zur Erzeugung elektrischer Ladungsträger führt. Bisher ist Silizium der am weitesten verbreitete Halbleiter zur Herstellung von Solarzellen. 2009 wurden in Europa Solaranlagen mit einer spezifizierten Leistung von ca. 3,9 GW installiert und etwa 80 % davon waren mit Siliziumzellen ausgerüstet [23].

Allerdings zeichnet Silizium ein nur mäßiger Absorptionskoeffizient aus. Daher werden für Silizium-Solarzellen massive Scheiben (Wafer) von etwa 200 µm Dicke als Absorber benutzt. Diese Scheiben sind bruchempfindlich und werden von einem Deckglas gegen Umwelteinflüsse geschützt, was die Solarmodule jedoch schwer macht. Wo es auf ein geringes Gewicht ankommt, bieten sich Kupfer-Indium-Selen (CIS)-Dünnschichtsolarzellen auf einem flexiblen Substrat an, weil deren Absorber deutlich weniger bruchempfindlich ist und sie damit auch in eine leichte und flexible Deckfolie eingekapselt werden können.

8.2 Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS)

Ein Wärmedämm-Verbundsystem ist ein Bausatz, der sich aus unterschiedlichen Systemkomponenten zusammensetzt. Sie bilden einen festen Verbund miteinander und mit der Außenwand. Aus diesem Grund müssen die Komponenten aufeinander abgestimmt sein. Üblicherweise besteht ein WDVS aus dem Klebstoff, der das System an der Außenwand befestigt, dem Dämmstoff, einem gewebebewehrten Unterputz und dem Oberputz bzw. einer Abschlussbeschichtung.

Ende der 1960er Jahre wurde das WDVS auf dem Markt eingeführt, allerdings unter einem andern Namen. Der Begriff des Wärmedämm-Verbundsystems wurde erst in den 1990er Jahren geschaffen. Mitte der 1970er Jahre wurde das erste mineralische, nicht brennbare WDVS auf den Markt gebracht. Mittlerweile ist eine Vielzahl von WDVS erhältlich, die sich insbesondere hinsichtlich der Art des Dämmstoffes, der Befestigung, den Unterputzen und der Oberflächenbeschichtung unterscheiden. Den größten Marktanteil bei der Verwendung in WDVS besitzt dabei mit rd. 80 % das Polystyrol. [20]

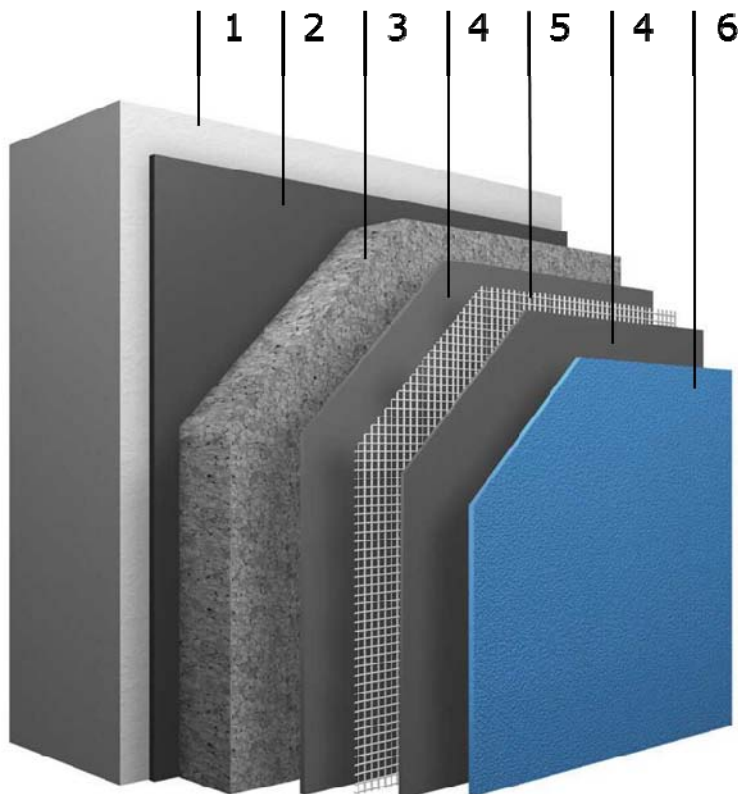


Abbildung 11

Aufbau WDVS

- 1 Außenwand
- 2 Verklebung
- 3 Dämmung
- 4 Armierungsputz
- 5 Armierungsgewebe
- 6 Schlussbeschichtung

8.3 Baurechtliche Bedingungen

Der Nachweis der Verwendbarkeit eines WDVS gemäß Musterbauordnung wird seit 1997 durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ), die durch das DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) erteilt werden, geregelt. AbZ werden in der Regel für die Dauer von fünf Jahren erteilt. WDVS werden in der Bauregelliste B, Teil 1 als Bausatz geführt. Sie müssen nach dem Bauproduktengesetz eine CE-Kennzeichnung tragen.

Die Erteilung von abZ erfolgt bezogen auf bestimmte Fachgruppen. Das Planen und Ausführen von WDVS ist in den LBO geregelt. Nationale Zulassungen für WDVS sind der Fachgruppe 33, Fassadenbau, zugeordnet. Die Untergruppe 33.5 gilt für vorgefertigte WDVS-Elemente; derzeit sind dies im Werk verbundene Hartschaumdämmplatten mit Klinkerriemchen.

- Z-33.41 Angeklebte Dämmstoffplatten aus EPS/PUR
- Z-33.43 Angeklebte und angedübelte Dämmstoffe
- Z-33.44 Angeklebte Mineralfaser-Lamellendämmplatten
- Z-33.46 WDVS mit keramischer Bekleidung
- Z-33.5 Vorgefertigte Wärmedämm-Verbundsysteme

Seit 2004 werden europäisch technische Zulassungen (European Technical Approval: ETA) erteilt. ETAs können für Bauprodukte erteilt werden, für die keine harmonisierten Normen nach der Bauproduktenrichtlinie vorliegen, oder die davon wesentlich abweichen. Grundlage für die Beurteilung der Verwendbarkeit und damit für die Erteilung einer ETA sind i.d.R. ETAGs (Zulassungsleitlinien), die von der EOTA (Europäischen Organisation für technische Zulassungen) erstellt werden. Mit einer ETA hat der Hersteller Zugang zum europäischen Markt. Die Erteilung von ETAs für WDVS erfolgt auf der Grundlage folgender Leitlinien - European Technical Approval Guidelines (ETAG):

- ETAG 004 WDVS mit Putzschicht
- ETAG 014 Kunststoffdübel
- ETAG 017 Vorgefertigte Wärmedämmelemente

8.4 Konstruktive Anforderungen

Die Standsicherheit gehört zu den wesentlichen Anforderungen an das WDVS. Für folgende Einwirkung ist der Nachweis zu führen:

Eigenlast

Hygrothermische Einwirkungen aus Erstschrinden (des Putzes), Feuchteschwankungen und Temperaturschwankungen

Winddruck und Windsog

8.5 Bauphysikalische Anforderungen

Neben der Standsicherheit muss das WDVS Anforderungen an den Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz und Brandschutz erfüllen.

8.5.1 Wärmeschutz und Feuchteschutz

Mit einem WDVS sind sowohl die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 als auch an den energiesparenden Wärmeschutz nach EnEV zu erfüllen.

Bei dem Feuchteschutz sind insbesondere die Tauwasserbildung innerhalb der Wandkonstruktion und die Belastung durch Schlagregen zu untersuchen.

8.5.2 Schallschutz

DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ [7] enthält Regelungen für den Schallschutz von Außenwandkonstruktionen.

Das Schalldämm-Maß der Wandkonstruktion ist bei einschaligen, massiven Wänden einzig von deren flächenbezogener Masse abhängig. Mit einem Wärmedämm-Verbundsystem bekleidete Außenwände stellen unter akustischen Gesichtspunkten jedoch ein zwei- oder ggf. mehrschaliges Bauteil dar. Bei einer massiven Wandkonstruktion wirkt die Dämmschicht des Wärmedämm-Verbundsystems quasi als Feder, während die bedingt biegesteife Masse der äußeren Putzschicht durch einen entsprechenden Außenschallpegel zu Schwingungen angeregt werden kann. In Abhängigkeit von der Eigenfrequenz dieses Masse-Feder-Modells, die wiederum von der dynamischen Steifigkeit s' der Dämmschicht abhängig ist, kann es in Folge von Resonanzen zu einer Verschlechterung des Luftschallschutzes der Außenwandkonstruktion kommen.

Ferner ist der Einfluss der Befestigung des Wärmedämm-Verbundsystems auf der massiven Wandkonstruktion zu betrachten.

Für den Schallschutz einer Außenwandkonstruktion sind der Flächenanteil von Fensteröffnungen sowie das resultierende Schalldämmmaß der Fenster jedoch im Allgemeinen von größerer Bedeutung als die geringfügige Veränderung des Schallschutzes infolge des Wärmedämm-Verbundsystems.

In Bezug auf das PV-WDVS ist zu berücksichtigen, dass die relative Biegeweichheit sowie vergleichsweise geringe Masse der CIS-Photovoltaikmodule in Verbindung mit dem hier betrachteten PU-Hartschaumdämmstoff, der eine vergleichsweise große dynamische Steifigkeit aufweist, vermutlich zu einer geringfügigen Verschlechterung des Luftschallschutzes der Außenwandkonstruktion führen wird. Bei einem üblichen Fensterflächenanteil von Fassaden beispielsweise im Wohnungsbau ist jedoch nicht von einer signifikanten Verschlechterung des Außenlärmschutzes der Gesamtkonstruktion einschließlich der Fenster infolge der Aufbringung des PV-WDVS auszugehen.

8.5.3 Brandschutz

Anforderungen nach Muster- und Landesbauordnungen

Gemäß § 3 (1) der Musterbauordnung (MBO) [28] 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“. § 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 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.

Anmerkung:

Gebäudeklasse 3 umfasst alle Gebäude, deren Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, im Mittel nicht höher als 7 m über der Geländeoberfläche gelegen ist.

Die Anforderungen der Musterbauordnung sind in den Landesbauordnungen sinngemäß entsprechend enthalten.

Brandschutztechnische Einstufung der PV-WDVS-Fassaden

WDVS sind Fassadenbekleidungssysteme, die brandschutztechnisch als Baustoffe behandelt werden. Zusätzlich werden an die einzelnen Komponenten, wie den Dämmstoff, Anforderungen gestellt.

Die Brandschutzklassifizierung von Baustoffen kann nach DIN 4102-1 [5] oder nach DIN EN 13501-1 [12] während der Koexistenzphase beider Normen wahlweise erfolgen.

Allgemein bauaufsichtlich zugelassene Wärmedämm-Verbundsysteme mit einer Wärmedämmung aus Schaumkunststoff sind im Sinne der DIN 4102-1 [5] in die Baustoffklasse B „brennbare Baustoffe“ einzustufen. Mit Flammenschutzmitteln behandelte Polystyrol-Hartschäume entsprechen der Baustoffklasse B1 „schwer entflammbar“. Gemäß DIN 4102-4 zählen Kunstharzputze nach DIN 18558 [7] ebenfalls zu der Baustoffklasse B1.

Die CIS-Solarmodule weisen sowohl als Träger- wie auch als Frontseitenabdeckung Kunststofffolien auf, die als „brennbar“ Baustoffklasse B nach DIN 4102-1 einzustufen sind.

Im Falle eines Gebäudebrandes kann bei der Brandbekämpfung die Gefahr eines Spannungsüberschlages aus PV-Anlagen auftreten. Deshalb

ist grundsätzlich eine Spannungsfreischaltung vor und nach dem Wechselrichter zu ermöglichen (s. a. Blitz- und Überspannungsschutz). Dennoch kann auch nach Abtrennung durch den Gleichstrom (DC)-Lasttrennschalter Hochspannung in der PV-Anlage auftreten. Um dem entgegenzuwirken, kann nach [1] ein „PV-Feuerwehrscharter“ installiert werden, der in Schaltstellung „Safety“ die Gleichstrom-Hauptleitungen unterbricht sowie die modulseitigen Anschlüsse kurzschließt. Bei größeren Gebäuden mit ausgedehnten PV-Anlagen kann ein sog. Feuerwehplan sinnvoll sein.

Im Gegensatz zu herkömmlichen PV-Elementen mit Frontseitenverglasung besteht bei den CIS-Solarelementen im Brandfall keine Verletzungsgefahr durch Zersplitterung von Gläsern.

Berücksichtigung des Blitz- und Überspannungsschutzes

Im Zusammenhang mit der beabsichtigten Anordnung der Elektrokabel der PV-Anlage innerhalb des Fassadenaufbaus sowie der notwendigen Einführung in das Gebäude sind Aspekte des Blitz- und Überspannungsschutzes zu berücksichtigen.

Solaranlagen erhöhen nach Beer [2] das Risiko eines Blitzeinschlages nicht. Zudem ist die Einschlagswahrscheinlichkeit im Bereich der Fassade gegenüber geneigten oder horizontalen Dachflächen weitaus geringer.

Dennoch ist trotz der geringen Einschlagswahrscheinlichkeit ein Überspannungsschutz in Form einer DC-Freischalteinrichtung – von den Solarelementen ausgehend – vor dem und in Form einer Wechselstrom (AC)-Freischalteinrichtung nach dem Wechselrichter auszubilden.

8.6 Anforderung an die elektrische Integration

Wie in [22] erläutert, ist die Errichtung von Photovoltaik-Anlagen sowie deren Installation nach den bestehenden VDE-Bestimmungen durchzuführen. Folgende Normen sind zu beachten:

- VDE 0100 „Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis zu 1000 V.“
- VDE 0105 (Teil 100) „Betrieb von elektrischen Anlagen“
- VDE 0298 „Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen“
- VDE 100 (Teil 712) „Photovoltaik-Versorgungssysteme“

8.7 Gestalterische Anforderungen

In erster Linie muss das System die Anforderungen hinsichtlich der dauerhaften Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Aber um die Akzeptanz zu fördern und das System im Markt einführen zu können, ist auch der gestalterische Anspruch mit einer harmonischen Integration in das Gebäude und die Umgebung zu erfüllen.

Das Erscheinungsbild der PV-Module wird durch unterschiedliche Kriterien bestimmt. Einflussfaktoren sind die Form, Größe und Anordnung der Zelle und des Moduls. Zudem nehmen Material- und Farbwahl Einfluss. Die Farbwirkung kann z.B. durch eine mögliche Färbung der Modulrandbereiche und die Zelltextur verändert werden.

8.8 Sonstige Anforderungen

Neben den genannten Anforderungen ist zudem die Montagefreundlichkeit des Systems, die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zu betrachten.

9 Entwicklung Prototyp

9.1 Konstruktion und Materialien

Die Projektpartner entschieden sich für eine Vorfertigung des PV-WDVS-Elementes, das heißt eine werksseitige Verklebung des PV-Moduls auf der Trägerplatte. Wegen der staubfreien und temperierten Umgebung im Werk kann bei der Vorfertigung eine gleichbleibende Eigenschaft der Klebverbindung gewährleistet werden, zudem ist eine Verarbeitung durch entsprechende, zu berücksichtigende Aushärtezeiten des Klebstoffes auf der Baustelle u. U. nicht möglich.

Als Trägerplatte wird insbesondere eine Hartschaumdämmstoffplatte untersucht, die auf einem geeigneten Untergrund ausschließlich durch Klebung befestigt werden kann. Zusätzlich wird als Trägerplatte eine Putzträgerplatte aus Blähglasgranulat untersucht. Das System soll grundsätzlich eine untere, gedübelte Dämmschicht erhalten. Durch diese Dämmschicht ist es zudem möglich, das PV-WDVS-Element mit einer Standarddicke herzustellen und die individuell gewünschten Dämmstoffdicken mit der unteren Dämmstofflage zu erreichen. Abbildung 12 stellt den Aufbau dar.

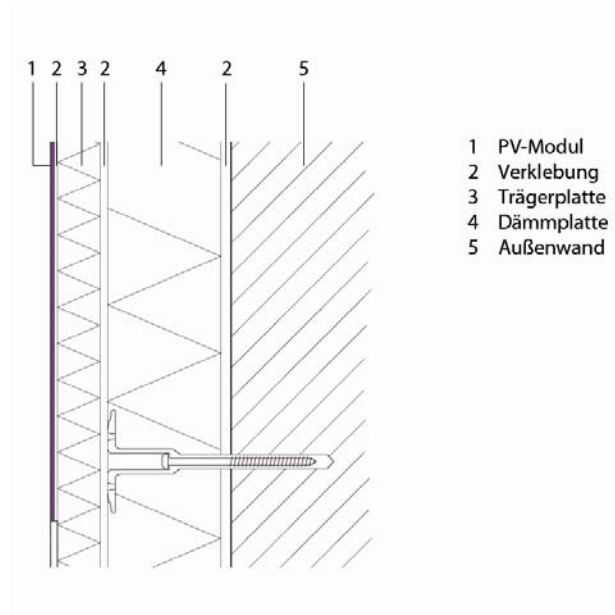


Abbildung 12

Konstruktion des Elementes

9.1.1 CIS-Solarmodul

Das **CuInSe**-Solarmodul ist ein Verbund aus Deck- und Rückseitenfolie, Verkapselungsfolien und CIS-Dünnschichtsolarzellen. Die Solarzellen selbst sind auf ein flexibles Trägermaterial aus Metall oder Kunststoff aufgebracht. Im Vorwege werden die sortierten Solarzellen in Reihe zu sogenannten Strings verschaltet. Dabei bestimmt die Zellanzahl die Länge des Strings. Einzelne Strings werden danach untereinander verschaltet und schließlich mit den oben genannten Folien in einem Laminations-schritt verbunden, siehe Abbildung 13.

Das entstandene Solarmodul ist flexibel und leichtgewichtig. Im Prinzip ist sowohl die Zell- als auch die Stringanzahl frei wählbar, was eine Variation der Modulabmessungen ermöglicht.

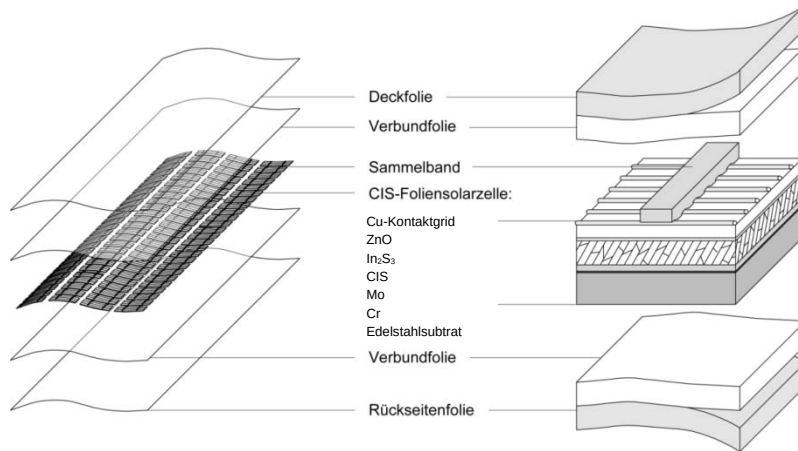


Abbildung 13

Aufbau CIS-Solarmodul

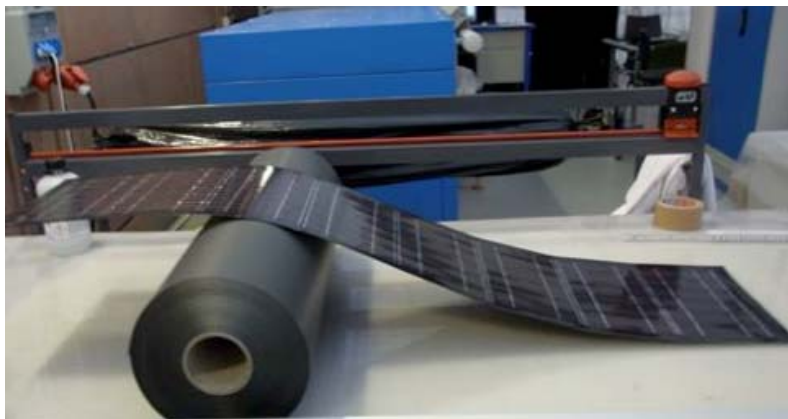
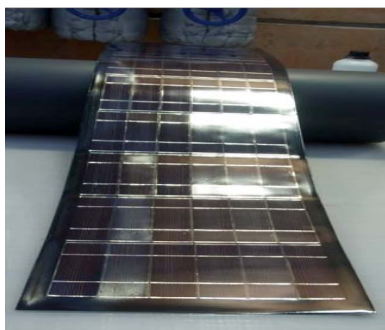


Abbildung 14

CIS-Solarmodul



Als Rückseitenfolien stehen zwei mögliche Folienaufbauten F1 und F2 mit thermoplastischen Kunststoffen zur Verfügung.

9.1.2 Trägerplatte

Abbildung 15 zeigt verschiedene Dämmstoffe mit relevanten Eigenschaften auf. Orange markiert sind im Vergleich ungünstige, blau günstige Eigenschaften für den Anwendungsfall.

Dämmstoff	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Treibhauspotenzial [kg CO ₂ äq.] pro m ³		Primärenergie nicht erneuerbar [MJ] pro m ³		Temperaturbeständigkeit	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	Brand-schutz (DIN 4102)/ (DIN EN 13501-1)	Druckspannung bei 10% Stauchung [kPa]	Verdübelung notwendig auf geeignetem Untergrund ⁶ (auf Altbau grundsätzlich)	Preis [€/m ³]
		Herstellung	End of Life	Herstellung	End of Life						
Polystyrol ¹ expandiert	0,035	62	27	1840	-695	80-85	20-100	B1 ⁵	100	-	40-70
Mineralwolle ²	0,035	93		1032		500-750	1	A1	>5	ja	50-120
Mineralwolle-Lamelle	0,040	93		1032		500-750	1	A1	40-80	-	50-120
Polyurethan ³	0,030	134	57,5	2768	-499	bis 120	40-200	B1(C)/B2(E) ⁵	150	-	160-400
Holzfaserdämmplatte ⁴	0,039	-15,9	16,8	918	-915	110	5-10	B2 (E) ⁵	≥30	ja	160-300

1 Industrieverband Hartschaum

2 Rockwool

3 Industrieverband Polyurethan-Hartschaum/End of Life Szenario: thermische Verwertung

4 Pavaflex Holzfaserdämmstoff /End of Life Szenario: Produkt wird in einem Biomassekraftwerk mit Energiegewinnung verbrannt

5 Einsatz bis zur Hochhausgrenze (22 m)

6 Mindestabreißfestigkeit von 0,08 N/mm²

Abbildung 15

Eigenschaften verschiedener Dämmstoffe

Expandiertes Polystyrol (EPS) wird als Trägerplatte der PV aufgrund einer Temperaturbeständigkeit, die im kritischen Bereich liegt, ausgeschlossen.

Ausschlaggebend dafür, mit Polyurethan (PUR)-Hartschaum die ersten Versuche durchzuführen, war die Tatsache, dass bei dieser Variante das PV-WDVS-Element nicht verdübelt werden muss. Neben PUR und EPS auch nicht zwingend verdübelt werden müssen Mineralwolle-Lamellen, die aber produktionsbedingt lediglich in Breiten bis 20 cm erhältlich sind und somit für die Anwendung ungeeignet.

PUR-Hartschaumplatten, deren Bestandteile in flüssigem Zustand gesundheitsschädlich sein können, im ausgehärtetem allerdings unbedenklich, weisen hinsichtlich des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs im Vergleich zu anderen Dämmstoffen ungünstigere Werte auf. Aber da seine Wärmeleitfähigkeit geringer ist als z.B. die der Mineralwolle, amortisiert sich PUR energetisch ebenso wie die meisten Dämmstoffe nach kurzer Zeit (vgl. Kapitel 10).

9.2 Alterungstests CIS-Modul

Für die überwiegende Anzahl heutiger Solarmodule wird Glas im Dickenbereich von ca. 3mm Stärke als oberseitiges und transparentes Deckmaterial verwendet.

Alternativ zur Verwendung von Glas als Deckmaterial können auch transparente Kunststofffolien zum Einsatz kommen. Kunststofffolien sind leichter als Glas, bruchfest und zudem flexibel. Allerdings weisen sie im Gegensatz zu Glas eine hohe Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit auf, wodurch die Lebenszeit der Solarmodule verkürzt wird.

Durch Aufbringen von Barrierschichten lässt sich die Durchlässigkeit gegenüber Wasserdampf und Sauerstoff reduzieren. Bisher weisen kommerziell verfügbare Barrierefolien Wasserdampfdurchlässigkeiten im Bereich von 10^{-2} g/m²d und Sauerstoffdurchlässigkeiten im Bereich von 10^{-1} cm³/m²d auf. Um die Eignung dieser Barrierefolien zu untersuchen, wurden bei der CIS Solartechnik eine Reihe von Tests durchgeführt, die sich an den Alterungstests in der DIN-Norm 61646 („Terrestrische Dünnschicht Photovoltaik-Module – Bauarteignung und Bauartzulassung“) orientieren. Der Test mit den gravierendsten Folgen für die Effizienz des Solarmoduls ist die sogenannte „Feuchte/Wärme-Alterung“. Dabei wird das Solarmodul für 1000 h einer Temperatur von 85°C und einer relativen Luftfeuchte von 85 % ausgesetzt. Nach Abschluss dieser Belastung wird in der Norm ein relativer Wirkungsgrad $\eta_{\text{rel}} > 90$ % (bezogen auf den Wert vor Alterungsbeginn) gefordert. Bisher haben alle Tests mit kommerziellen Barrierefolien zu wesentlich geringeren Werten geführt. Erst mit einer neu entwickelten Ultrahochbarrierefolie überschreitet das getestete Solarmodul nach 1000 h die geforderten 90%, siehe Abbildung 16.

Alterungsdauer	Folienmodul η_{rel} [%]	Referenz η_{rel} [%]
0 h	100	100
1000 h	95 +/- 2	94 +/- 2

Abbildung 16

Relativer Wirkungsgrad von Solarmodulen vor und nach der Feuchte/Wärme-Alterung

Die Referenzen wurden mit einem Standardsolarglas als obere Abdeckung hergestellt.

9.3 Messungen zur Temperaturentwicklung

Die ersten Messungen zur Temperaturentwicklung bei einem rückseitig mit Dämmstoff isolierten PV-Modul sind auf dem Testfeld der CIS-Solartechnik GmbH & Co. KG durchgeführt worden. In Abbildung 13 ist die Temperaturentwicklung über den Tagesverlauf am 13.07.2010 dargestellt. Die maximale Temperatur liegt bei ca. 62°C. Allerdings lassen zwei Umstände noch höhere Temperaturen erwarten: Erstens ist die Temperaturmessung punktuell durchgeführt worden, im Allgemeinen ist die Temperaturverteilung jedoch nicht homogen auf der gesamten Rückseite. Zweitens befand sich das Solarmodul in Südausrichtung, erfahrungsgemäß werden bei einer Westausrichtung höhere Temperaturen erreicht (vgl. hierzu auch Kapitel 9.4).

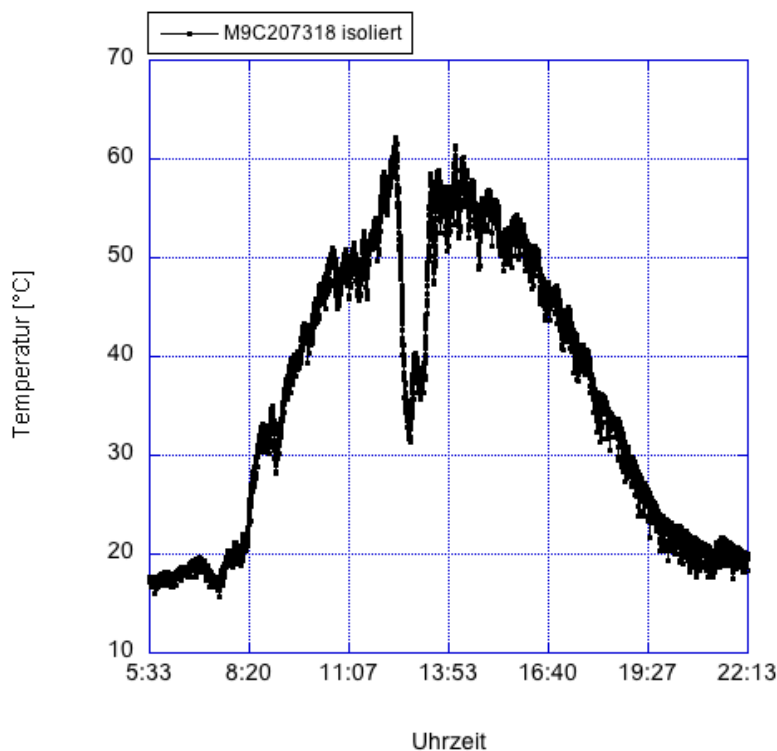


Abbildung 17

Rückseitige Temperatur eines Solarmoduls in Südausrichtung am 13.07.2010

Die Messung wurde mit einem an der Rückseite befestigten PT 1000 Thermosensor durchgeführt. Der Thermosensor war mit einer 5 cm x 5 cm großen und 3 cm dicken Styroporplatte gegenüber der Umgebung isoliert. Die Umgebungstemperatur betrug um 13.00 Uhr ca. 30°C im Schatten.

9.4 Hygrothermische Simulationen

Mittels des Bauphysik-Simulationsprogrammes Delphin5, das an der TU Dresden entwickelt wurde, wurden hygrothermische Berechnungen durchgeführt. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen den Temperaturverlauf, der sich auf der PV-Oberfläche im Laufe des Jahres auf einer Süd- und Westfassade einstellt. Auf der Südfassade werden Temperaturen von über 60°C, auf der Westfassade Temperaturen bis 80 °C erreicht. Datengrundlage war das Referenzklima Essen.

Für die hygrothermischen Berechnungen wurde die Dämmstoffträgerplatte des PV-Moduls mit einer Dicke von 6 cm und die erste Dämmstofflage mit 15 cm berücksichtigt. Als tragende Wand wurde Ziegelmauerwerk angesetzt.

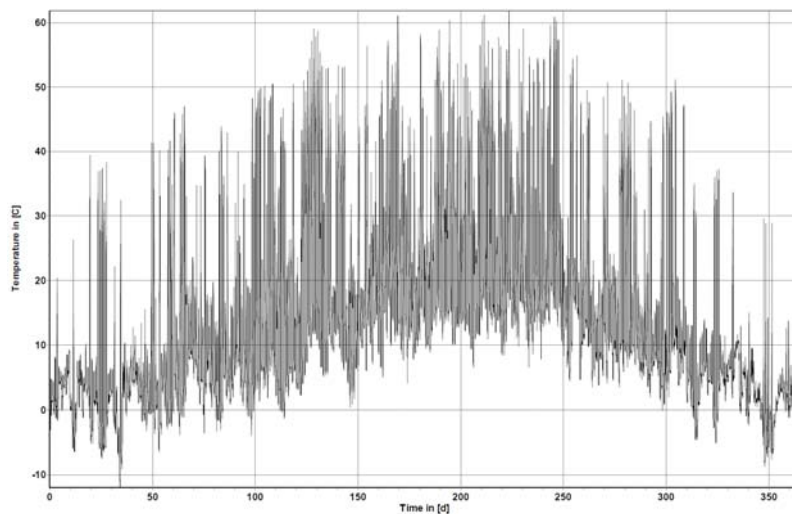


Abbildung 18

Temperaturverlauf PV-Oberfläche
an der Südfassade (Delphin5)

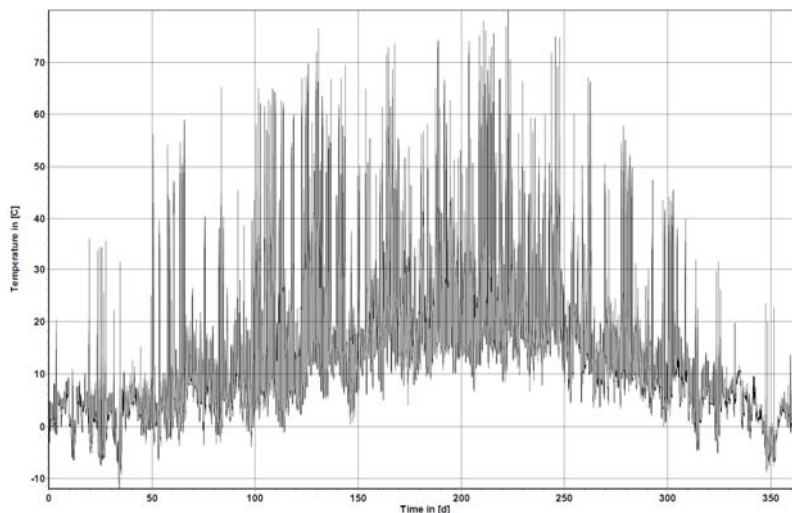


Abbildung 19

Temperaturverlauf PV-Oberfläche
an der Westfassade (Delphin5)

Für die untere, zu verdübelnde Dämmstofflage bietet sich EPS an, der mit über 80 % der in WDVS in Deutschland am häufigsten eingesetzte Fassadendämmstoff ist. Positiv sind im System die ähnlichen Eigenschaften von EPS und PUR wie die Wasserdampfdiffusionswiderstandswerte.

Die Simulationsergebnisse der eindimensionalen Berechnung des Elementes zeigen, dass bei dem oben genannten Aufbau und der Verwendung von PUR als Trägerplatte und EPS als erster Dämmstofflage keine überhygroskopische Feuchte anfällt. Eine Vergleichsrechnung mit dem Dämmstoff Mineralwolle führt zu integrierten überhygroskopischen Feuchtemassen bis zu 30 g/m^2 . Die Gesamtheuchtemassen, d.h. in gasförmiger und flüssiger Form, sind für die beiden Konstruktionen in der Abbildung 20 dargestellt.

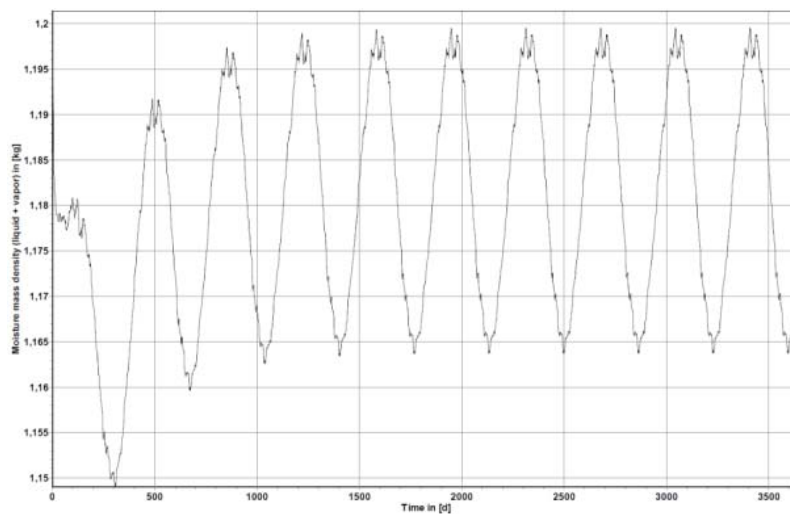
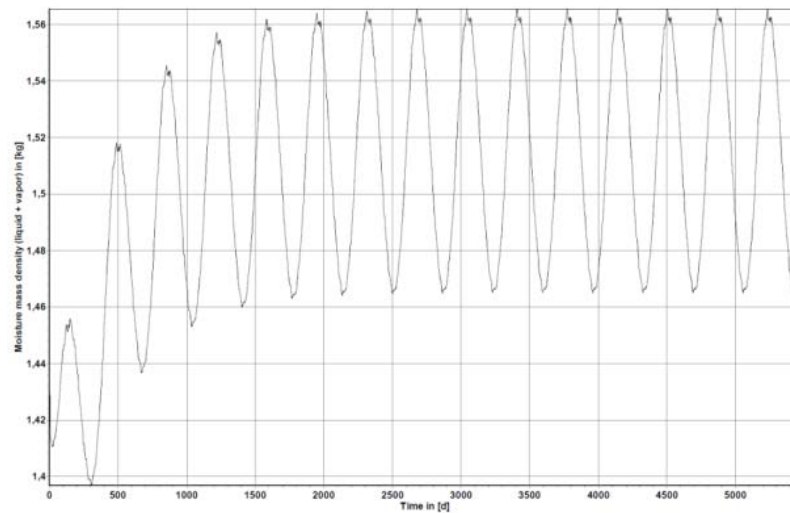


Abbildung 20

Feuchtemassen total (Delphin 5)

PUR-EPS



MW-MW

Die Berechnungen zeigen, dass der höhere Wasserdampfdiffusionswiderstand des PUR-Dämmstoffes positiv aufgrund des niedrigeren Feuchtigkeitseintrages vom Innenraum in die Konstruktion ist.

Eine zu untersuchende Variante sieht einen ca. 5 cm breiten Randstreifen um das PV-Modul vor, der mit überarmiert und verputzt wird, um einen fugenlosen Übergang zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der hygrothermischen zweidimensionalen Berechnungen mit einem wasserhemmenden Oberputz zeigen, dass über die Putzränder Feuchte durch Schlagregenbelastung eintritt, die sich auch hinter dem wasserdichten und dampfdichten PV-Element bewegt. Dargestellt ist in Abbildung 21 die relative Luftfeuchte für einen regenintensiven Tag Mitte Februar. Auf der Ordinatenachse ist das Element über die Höhe aufgetragen, auf der Abszissenachse von außen nach innen über seine Breite. Im Simulationsprogramm Delphin ist definiert, dass ab einer relativen Luftfeuchte von 95 % überhygroskopische Feuchte anfällt. Die inte-

grierte, überhygroskopische Feuchtemasse beträgt im Berechnungsbeispiel maximal ca. 80 g/m². Um Schäden und Ablösungen zu vermeiden, ist der Feuchteeintrag von außen zu minimieren durch z.B. einen waserabweisenden Oberputz.

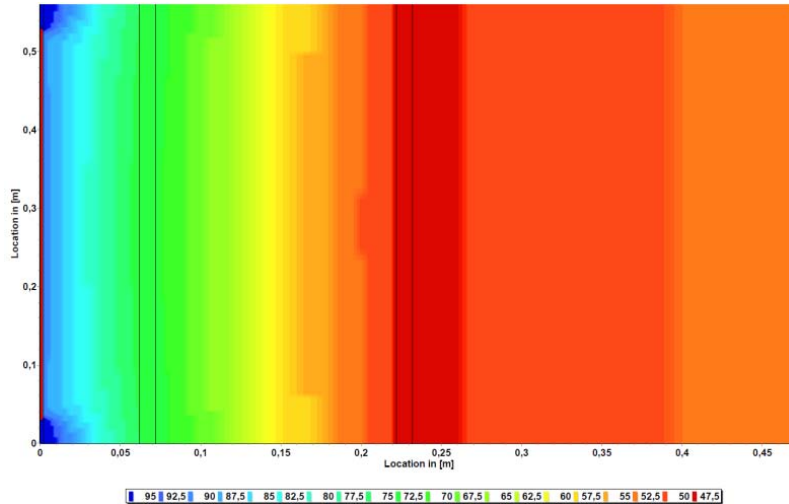


Abbildung 21

Relative Luftfeuchte bei Elementverbindung durch Putzränder (Delphin5)

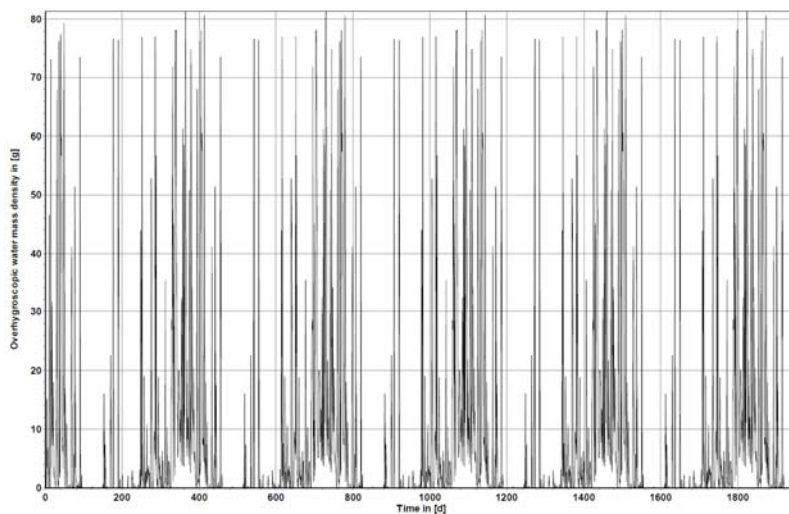


Abbildung 22

Überhygroskopische Feuchtemasse bei Elementverbindung durch Putzränder (Delphin5)

9.5 Schälversuche

Zur vergleichenden Beurteilung möglicher Klebstoffe für die Verbindung des PV-Moduls auf dem Dämmstoff wurde der Schälwiderstand, d.h. der Widerstand gegen abschälende Kräfte, auf den PV-Rückseitenfolien F1 und F2 überprüft.

Geprüft wurden fünf verschiedene Klebstoffe, die Abbildung 20 zeigt.

	K1 (2K-Siliconkautschuk)
	K2 (2K-Polyurethanharz)
	K3 (1K-Polyurethan)
	K4 (1K-PU-Schaum)
	K5 (2K-PU-Schaum)

Abbildung 23

Geprüfte Klebstoffe

Der Versuch wurde nach DIN EN 28510 Teil bzw. DIN EN 1464 durchgeführt. Die Probekörper wurden in 2,5 cm breite Streifen geschnitten, die entfettet wurden und auf die der Klebstoff aufgetragen wurde. Es wurden jeweils 3 bzw. 2 Proben hergestellt, die als beidseitige Fügeteile die fle-

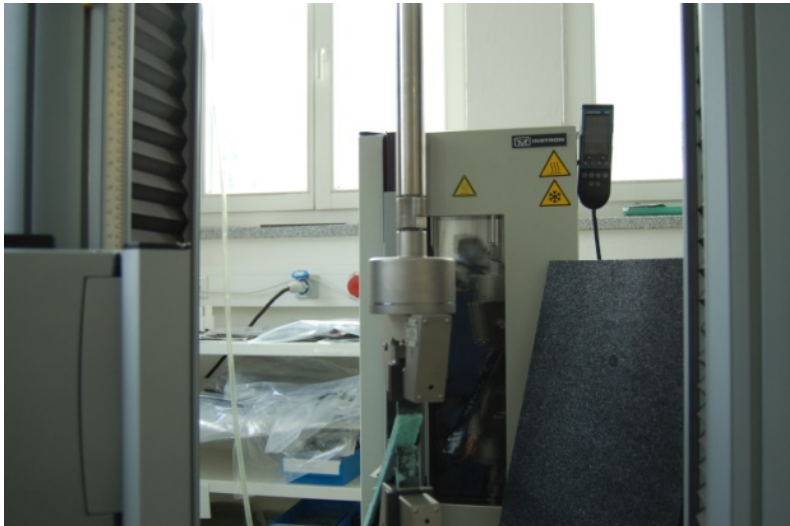
xiblen PV-Rückseitenfolien aufwiesen, teilweise mit 2 verschiedenen Klebstoffdicken.

Die Versuche wurden im Friedrich-Siemens-Laboratorium des Instituts für Baukonstruktion an der Universalprüfmaschine mit einer Maximallast von 50 kN durchgeführt. Für die Prüfung wurde ein Kraftaufnehmer 500 N verwendet. Die Prüfmaschine wurde weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 mm/min. Damit wurde berücksichtigt, dass abweichend von der Norm die beiden flexiblen Fügeteile einseitig eingespannt wurden. Zur Verringerung des Schlupfes wurde vorgespannt.



Abbildung 24

Universalprüfmaschine mit Prüfkörper



Die folgende Abbildung 25 zeigt beispielhaft die Last-Verschiebungskurve für den Klebstoff K1 auf der Rückseitenfolie F1 für die Probekörper 1-3.

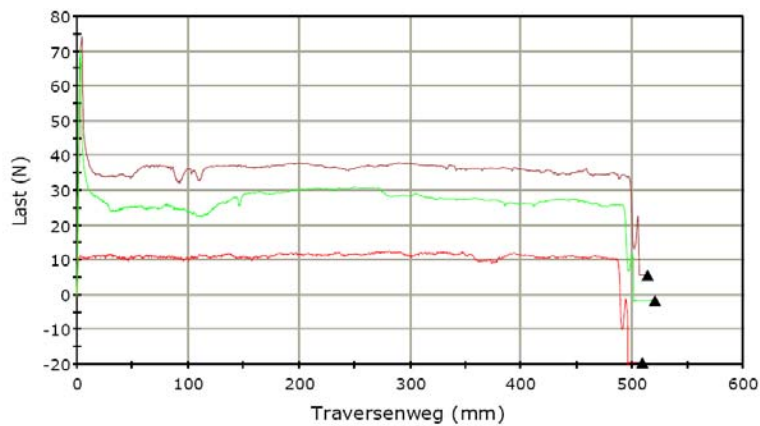


Abbildung 25

Aufzeichnung der Last-Verschiebungskurve

In Abbildung 26 ist der abgeschälte Probekörper dargestellt.



Abbildung 26

Probekörper nach Versuchsdurchführung

Abbildung 27 stellt die Versuchsergebnisse mit dem Schälwiderstand und der Versagensart zusammen.

Klebstoff	K1 1,5 mm	K1 3,5 mm	K2 1,5 mm	K2 3,5 mm	K3	K4	K5
Fügeteil	Schälwiderstand [N/cm]/Versagensart						
F1	10 kohäsiv	10 kohäsiv	44 adhäsiv	60 adhäsiv	2,8 adhäsiv	substratnah kohäsiv	substratnah kohäsiv
F2	4 kohäsiv	7 kohäsiv	150 kohäsiv	80 kohäsiv	3,6 adhäsiv	0,8 substratnah kohäsiv	1,6 substratnah kohäsiv

Abbildung 27

Schälwiderstände und Versagensart

Die Wahl des Klebstoffes beeinflussten unter anderem die Eigenschaften der zu verbindenden Fügeteile, die Umgebungsbedingungen und die geforderten bzw. gewünschten Klebstoffeigenschaften. An den Klebstoff werden u.a. folgende Anforderungen gestellt:

- Eignung für den Einsatz im Außenbereich
- Temperaturbeständigkeit von bis zu 85 °C
- Beständigkeit unter Einwirkung von Feuchtigkeit
- Hohe Zugfestigkeit
- Eignung für flächigen Auftrag
- Haftung auf PV-Rückseitenfolie, auf der PUR-Hartschaumplatte bzw. dem Vlies
- Spannungsausgleichendes Kleben unterschiedlicher Materialien

Ein 1-Komponenten (1K)-Klebstoff, der mit Luftfeuchtigkeit aushärtet, wird ausgeschlossen, da die Fügeteile mit Wasser befeuchtet werden müssen, um die Aushärtung herbeizuführen. Bei der sowohl flexiblen Folie wie auch dem flexiblen PUR-Hartschaum besteht die Gefahr, dass Wasserpfützen bestehen bleiben. Für die folgenden Haftzugfestigkeitsuntersuchungen werden die 2-Komponentenklebstoffe K6 (2K-Silikon) und K7 (2K-Hybrid) verwendet.

9.6 Haftzugfestigkeitsversuche

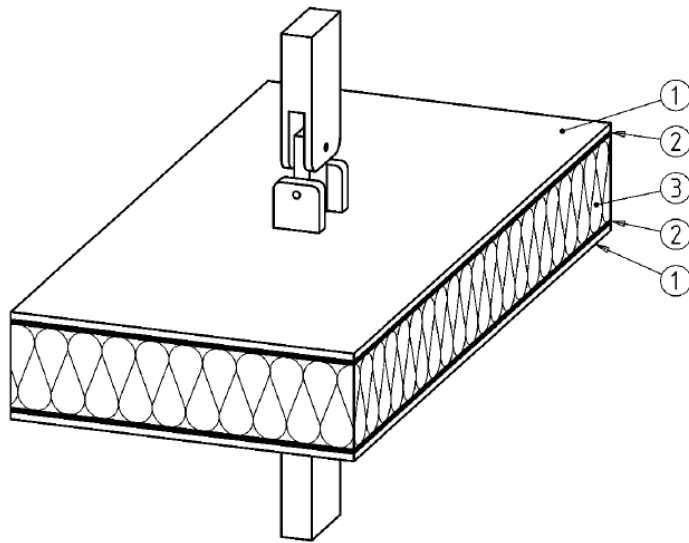
Diese mechanischen Prüfungen dienen zur Beurteilung der einzelnen Bauteile des vorgefertigten Elementes.

Die Haftzugfestigkeit zwischen Deckschicht und Dämmstoff muss beurteilt werden, falls die Deckschicht auf der Wärmedämmschicht durch Verklebung haftet.

Nach ETAG 017 bzw. 004 muss die Haftzugfestigkeit zwischen Deckschicht und Dämmstoff mindestens $0,08 \text{ N/mm}^2$ betragen oder ein Versagen im Dämmstoff auftreten.

Der Versuchsaufbau erfolgt nach DIN EN 1607. Die Probekörper werden zwischen zwei massiven Metallplatten befestigt, die über gelenkige Stäbe in eine Universalprüfmaschine eingebaut sind. Die Versuchskörper werden mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit auseinandergezogen und bis zum Bruch belastet.

Die Kraftmessung erfolgt mit 500 N bzw. 5 kN Kraftmessdosen.



- 1 steife Platte
- 2 Kleber
- 3 Probekörper
- 4 steife Platte

Die Versuchskörper sind Quader mit quadratischen Abmessungen von 50 mm x 50 mm. Mit Dämmstoff wurden zwei verschiedene Aufbauten, A1 und A2, geprüft.

Aufbau A1

Aufbau A2

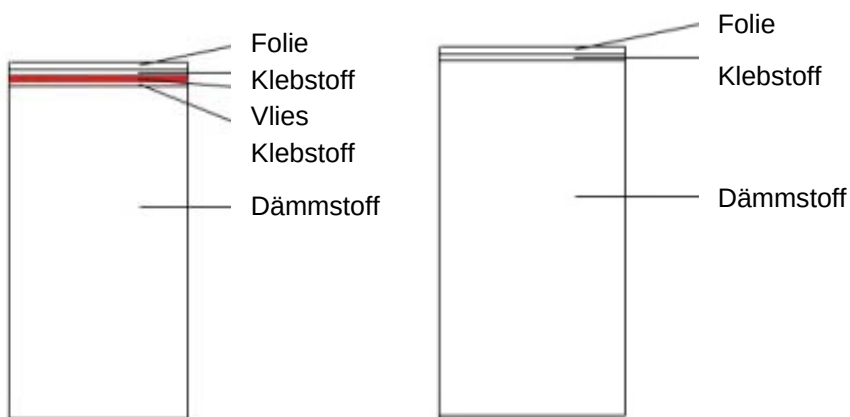


Abbildung 29

Aufbau Probekörper A1/A2

An die Probekörper werden nach Reinigung der Oberflächen beidseitig massive Metallplatten geklebt.

Abschlussbericht

Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme

Die Versuche wurden im Friedrich-Siemens-Laboratorium der TU Dresden durchgeführt. Die Raumtemperatur betrug etwa 23°C. Die Durchführung erfolgte nach ETAG 017 und DIN EN 1607.

Die Prüfung erfolgte an ungealterten Probekörpern des Aufbaus A1 bei

- A) Raumtemperatur (RT), ca. 23 °C
- B) -20 °C (vorkonditionierte Proben)
- C) +85 °C (vorkonditionierte Proben)



Abbildung 30

Probekörper Aufbau A1 nach Versuchsdurchführung

Die Prüfung erfolgte an gealterten Probekörpern des Aufbaus A2 nach

D) 10 Zyklen Klimawechseltest nach DIN EN ISO 9142-D3. Ein Zyklus umfasst folgende Phasen: 15 h bei 40 °C und 90 % rel. Luftfeuchte, 1 h Abfall, 2 h Frost bei -20 °C, 1 h Anstieg, 4 h bei 80°C und 50 % rel. Luftfeuchte, 1 h Abfall

E) 30 Zyklen Frost-Tauwechsel nach ETAG 017. Ein Zyklus umfasst folgende Phasen: 8h Wasserlagerung bei 20 ± 2 °C (mit der Deckschicht nach unten, Eintauchtiefe 5 mm), 2 h Abfall, 14 h Frost bei -20 ± 2 °C.

Es wurden jeweils 5 Probekörper geprüft.

Die Belastung wurde weggesteuert bei 10 mm/min aufgebracht und bis zum Versagen erhöht.

Der Bruch der Probekörper der Reihen A, B, D und E erfolgte im Dämmstoff. Bei den Probekörpern der Reihe C erfolgte der Bruch teilweise im

Vlies. Die mittlere Haftzugfestigkeit der Reihe C betrug $0,09 \text{ N/mm}^2$. Die Prüfungen wurden bestanden.

Die Probekörper der Reihe E wurden während der Frost-Tauwechselprüfung gewogen sowie auf negative Erscheinungen beobachtet. Die Wasseraufnahme betrug ca. 1 %. Es wurden keine negativen Erscheinungen wie Ablösungen oder Verfärbungen beobachtet.

Um eine Aussage über die Haftzugfestigkeit zwischen Deckschicht und Klebstoff zu erhalten, wurden Proben ohne Dämmstoff des Aufbaus A3 geprüft.

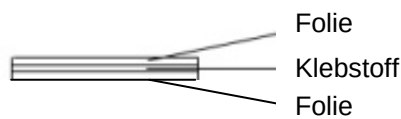


Abbildung 31

Aufbau Probekörper A3

Die Prüfung erfolgte an Probekörpern des Aufbaus A3 an drei Probenreihen:

- F) ungealtert, RT, Klebstofffugendicke: 2 mm
- G) ungealtert, RT, Klebstofffugendicke: 4 mm
- H) 30 Zyklen Frost-Tauwechsel nach ETAG 017. Ein Zyklus umfasst folgende Phasen: 8h Wasserlagerung bei $20 \pm 2 \text{ °C}$ (mit der Deckschicht nach unten, Eintauchtiefe 5 mm), 2 h Abfall, 14 h Frost bei $-20 \pm 2 \text{ °C}$.

Die Versuchsdurchführung erfolgte analog. Der Bruch der Probekörper der Reihen F, G und H erfolgte in der Folie. Die mittleren Haftzugfestigkeiten betragen für F: $0,77 \text{ N/mm}^2$, für G $1,11 \text{ N/mm}^2$ und für H $1,21 \text{ N/mm}^2$. Die Prüfungen wurden bestanden.

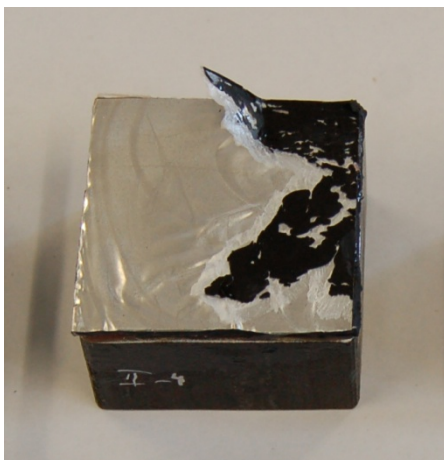


Abbildung 32

Probekörper Aufbau A3 nach Versuchsdurchführung

9.7 Scherversuche

Die thermische Längenänderung des PV-Moduls beansprucht den Klebstoff auf Scherung. In einem Dilatometer wurde vom Fraunhofer IFAM der thermische Ausdehnungskoeffizient eines glasfreien PV-Moduls ermittelt. Der Ausdehnungskoeffizient lehnt sich an den des Aluminiums ($23,1 \cdot 10^{-6}/K$) an. Die Rückseitenfolie ist ein Verbund aus Kunststofffolien und Aluminium. Der Kunststoff ist einer Dehnungsbehinderung unterworfen aufgrund des niedrigen Ausdehnungskoeffizienten und hohen E-Moduls des Metalls.

Die durchgeführten dynamischen Scherversuche dienen zur Simulation der Temperaturendehnungen des PV-Moduls über einen Sommer.

Es wird dabei von 150 Zyklen mit folgenden Werten ausgegangen:

$$\alpha_{T,PV} = 21,9 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$$

$$l_x = 1200 \text{ mm}$$

$$\Delta T = 85^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 70 \text{ K}$$

Empfohlen wird die Verwendung des elastischen Klebstoffes K6 zur Verklebung des PV-Moduls. Vereinfacht kann die Längenänderung des Moduls an jedem Ende folgendermaßen bestimmt werden:

$$\Delta l_x/2 = 0,5 (21,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K} \cdot 70 \text{ K} \cdot 1200 \text{ mm}) = 0,91 \text{ mm}$$

=> Die Auslenkung beträgt 1 mm

Um die Klebschicht an den Enden auf eine maximale Scherung von 50 % zu beanspruchen, sollte ihre Dicke mindestens die gesamte Längenänderung betragen, also bei einer Modullänge von 1,20 m mindestens 2 mm.

Die Prüftemperatur betrug 23°C . Die drei Prüfkörper wiesen nach 150 Zyklen kein Versagen auf.

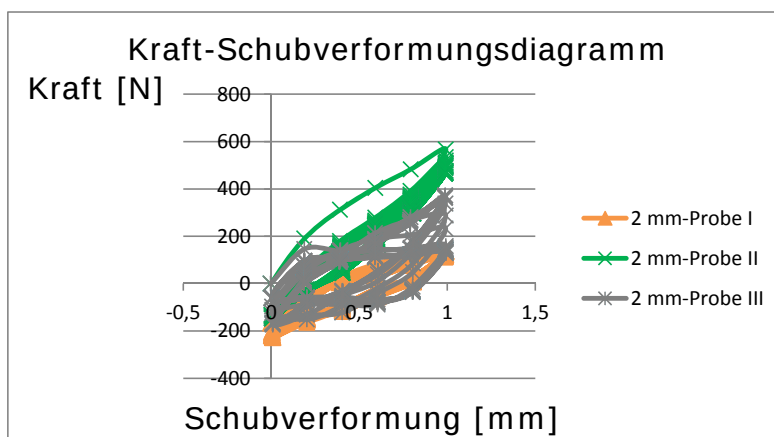


Abbildung 33

Kraft-Schubverformungsdiagramm

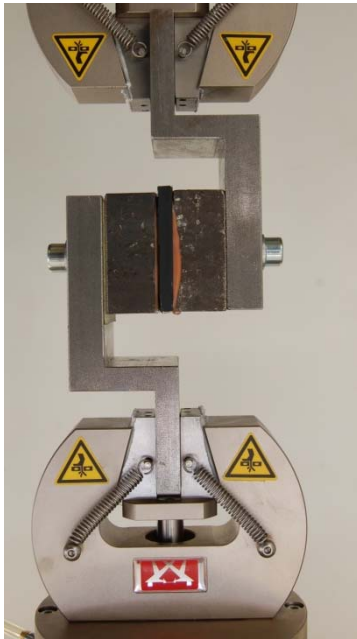


Abbildung 34

Versuchsaufbau Scherversuch

9.8 Brandversuche

In Anlehnung an DIN 4102-1 und DIN EN ISO 11925-2 wurden Entflammbarkeitsprüfungen durchgeführt. Die Probegröße beträgt 8 cm x 23 cm.



Abbildung 35

Versuchsaufbau Entflammbarkeitsprüfung

Der Probekörper hat die Entzündbarkeitsprüfung nach EN ISO 11925-2 für die Klassen B, C, D und E bestanden. Die Anforderungen an die Klasse E sind damit erfüllt. Nach DIN 4102-1 wurde die Anforderung an die Baustoffklasse B2 erfüllt. Eine SBI-Prüfung nach DIN EN 13823 konnte im Rahmen des Projektes nicht mehr erfolgen. Eine B, C oder D Klassifizierung bzw. eine B1 Klassifizierung ist somit noch offen.

9.9 Elektrische Leistungsmessung

9.9.1 Aufbau

Für den Aufbau des Prototypens des PV-WDVS-Elements wurden zwei flexible CIS-Solarmodule der Fa. CIS-Solartechnik eingesetzt. Beide Module entstammen demselben Produktionslauf in der CIS-Pilotanlage in Bremerhaven. Mit den Abmessungen $1000 \times 300 \times 2 \text{ mm}^3$ hat jedes Modul ein Gesamtgewicht von 0,875 kg inklusive Anschlussdose und 2 m Solarkabel. Auf der Rückseite der Module befindet sich jeweils ein PT-1000 Sensor zur Messung der Modultemperatur. Schichtaufbau und Herstellung erfolgte bei der Fa. Sto AG.

9.9.2 Testfeld

Der vollständige Prototyp wurde auf dem Testfeld der Fa. CIS-Solartechnik aufgeständert. Das Testfeld befindet sich in Hamburg auf dem Dach ihrer Produktionshalle.

In Abbildung 30 ist der Prototyp im Vordergrund zu sehen. Er ist nach Süden ausgerichtet und der Neigungswinkel beträgt 90° , um den Einsatz an der Fassade darzustellen. Rückseitig werden die Kabel zur Temperaturmessung bzw. die Anschlusskabel der Module bis zur Messstation im Bürogebäude geführt. Für die präzise elektrische Leistungsvermessung wird eine Vier-Leiter-Messung vorgenommen. Mit dieser Messmethode gehen die Kabelwiderstände der Anschlusskabel nicht in die Messung ein. Technisch werden die Anschlusskabel kurz hinter dem Modul mit einem Y-Stecker auf insgesamt vier Kabel verdoppelt. Zur Leistungsbestimmung wird eine komplette Kennlinie des Moduls aufgenommen, aus der der Punkt maximaler Leistung abgelesen wird. Zu jeder Kennlinienmessung wird sowohl der momentane Sonneneinstrahlungswert als auch die Modultemperatur aufgenommen. Die Sonneneinstrahlung wird mittels eines Pyranometers aufgezeichnet, das für die Messungen am Prototypen auf einen analogen Neigungswinkel von 90° eingestellt wurde.



Abbildung 36

PV-WDVS-Prototyp auf dem Testfeld der Fa. CIS-Solartechnik in Hamburg

9.9.3 Ergebnisse Prototypen auf dem Testfeld

In Abbildung 37 ist der Wirkungsgrad als Funktion der Modultemperatur aufgetragen. Es ergeben sich maximale Temperaturen von 75°C. Weiterhin sieht man einen deutlichen Abfall des Wirkungsgrades zu höheren Temperaturen. Prinzipiell ist diese Temperaturabhängigkeit zu erwarten, da höhere Temperaturen zu einer Reduktion der Bandlücke des Halbleiters führen und damit zu einer Abnahme der Modulspannung. Einen Temperaturkoeffizienten kann man aus diesen Messungen nicht direkt bestimmen, da der Temperaturkoeffizient abhängig von der Bestrahlungsstärke ist. Dass die verschiedenen Temperaturen die Folge unterschiedlicher Bestrahlungsstärken sind, ist bei einem Vergleich von Abbildung 37 und Abbildung 38 ersichtlich.

Der Verlauf der Messpunkte in Abbildung 31 wird damit auch von der Temperatur dominiert und bildet kein „Schwachlichtverhalten“ ab.

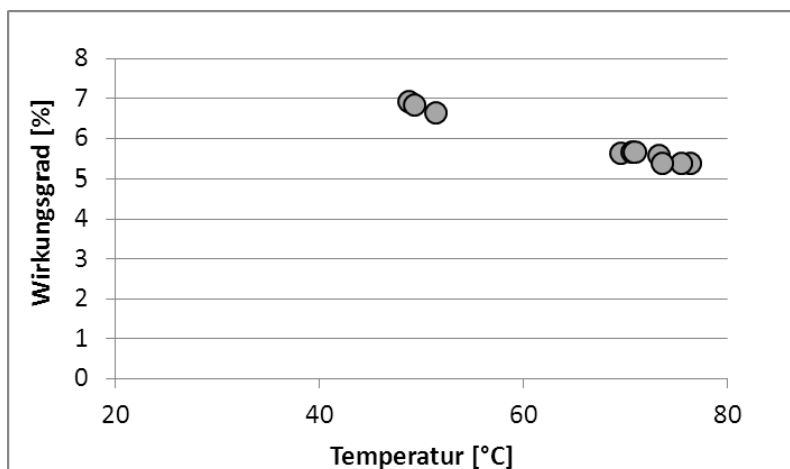


Abbildung 37

Wirkungsgrad des PV-WDVS-Prototypen als Funktion unterschiedlicher Modultemperaturen

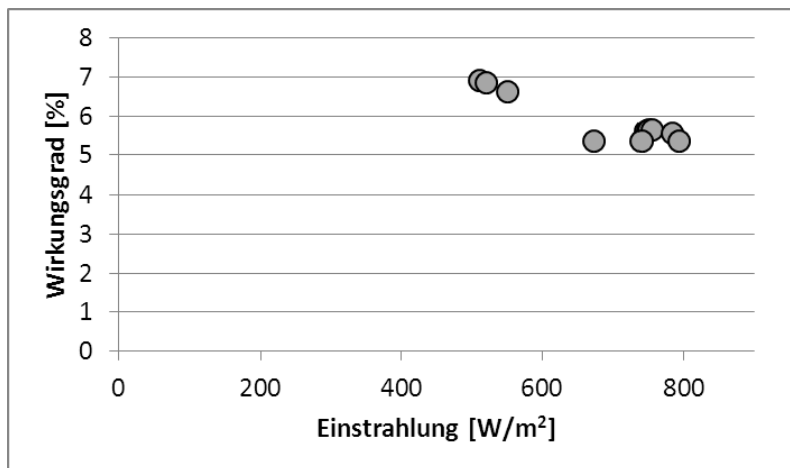


Abbildung 38

Wirkungsgrad des PV-WDVS-Prototypen als Funktion unterschiedlicher Bestrahlungsstärken

Die ersten Temperatur- und Leistungsvermessungen zeigen somit eine bis zu 75 °C hohe Modultemperatur bei ca. 750 W/m² Bestrahlungsstärke und einen durch die hohe Temperatur deutlich reduzierten Wirkungsgrad.

Eine vollständigere Charakterisierung sollte mit einem automatisierten Kennlinienmesssystem vorgenommen und vor allem in den ertragsstarken Monaten des Sommers durchgeführt werden.

9.10 Verschaltung der Module

Es sind prinzipiell mehrere Verschaltungsarten der Solarmodule untereinander möglich.

- 1.: Module in Reihe verschaltet
- 2.: Module parallel verschaltet
- 3.: Der ausgehende Gleichstrom des Solarmoduls wird vor einer weiteren Verschaltung in einen angepassten Gleichstrom (Gleichspannungswandler) oder direkt in Wechselstrom gewandelt (Modulwechselrichter).

Alle Optionen haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Bei den meisten aktuellen Solargeneratoren werden die einzelnen Solarmodule seriell miteinander zu Strings verschaltet. Dabei wird der Vorteil ausgenutzt, dass bei einer Serienschaltung sich die Modulausgangsspannungen zur resultierenden Stringspannung addieren, die Stromstärke jedoch nur ungefähr dem eines Moduls entspricht. Diese vergleichsweise geringe Stromstärke ermöglicht die Verwendung von Standard-Stromkabeln mit geringem Querschnitt des Kupferleiters. Allerdings sind Serienschaltungen anfällig gegenüber Verschattung. Da die resultierende Stromstärke im String durch die Stromstärke des schwächsten Moduls begrenzt wird, kann bereits die teilweise Verschattung eines Moduls signifikante Auswirkungen auf den Ertrag haben.

Strings aus parallelverschalteten Modulen sind deutlich unempfindlicher gegen Verschattungen, da sich hier die Stromstärken der einzelnen Module zur resultierenden Stromstärke des Strings addieren und ein teilwei-

se verschattetes Modul mit reduzierter Stromstärke keine Auswirkung auf den gesamten String hat. Allerdings werden mit den hohen resultierenden Stromstärken im String deutlich größere Leiterquerschnitte nötig, was die Verschaltungskosten erhöht.

In Option 3 wird durch die Verwendung von zusätzlichen Geräten versucht, die Nachteile der vorangehenden Verschaltungen zu vermeiden. Intelligente Gleichspannungswandler sollen das verschattete Modul lokalisieren und dessen verringerte Stromstärke auf den Normalwert der übrigen Module erhöhen. Diese Transformation geht zwar auf Kosten der Modulspannung, was aber in einer Serienschaltung nicht so kritisch ist. Durch Modulwechselrichter wiederum wird jedes Modul durch den eigenen Wechselrichter im Optimum betrieben. Zudem haben Verschaltungen keinen begrenzenden Einfluss mehr für den gesamten Verbund, da die Modulspannung direkt in Wechselspannung umgewandelt wird.

Innerhalb des Projektes wurde beschlossen, zunächst die Option 1 näher zu untersuchen. Zusätzlich wurde entschieden, die Verschaltung auf der Rückseite der Module vorzunehmen.

9.11 Hygrothermisches Verhalten der Testwand

Das hygrothermische Verhalten des PV-WDVS wurde mit verschiedenen Varianten in der Kurzbewitterungsanlage bei der Sto AG untersucht.

Als Trägerplatte kamen sowohl eine PUR-Hartschaumplatte als auch eine Putzträgerplatte zum Einsatz. Als Anschlusslösungen wurden zwei Varianten getestet. Zum einen wurde um das PV-Modul ein Randstreifen vorgesehen, indem die Trägerplatte umlaufend 5 cm breiter als das PV-Modul ausgeführt ist. Auf die Trägerplatte wird ein Vlies aufgeklebt. Der Randstreifen und damit das Vlies wird mit dem Armieren des WDVS mit überarmiert. Bei der zweiten Variante ohne Vlies wird ein Kantenprofil und ein Fugenband um die Trägerplatte gelegt, die bündig mit dem PV-Modul abschließen.

Die PV-Elemente bzw. Dummies wurden mit dem empfohlenen und geprüften Klebstoff K6 aufgeklebt, wie auch bei den Elementen C und D das Vlies. Bei den Elementen B, F und G wurde das Vlies von der Sto AG alternativ mit einem Dispersionsklebstoff, K8, aufgeklebt.

Als PV-Module wurden 3 Module der CIS Solartechnik und 4 Module der Solarion AG, Dresden, getestet.

Abbildung 39 stellt den Aufbau dar.



Abbildung 39

Aufbau Togowand

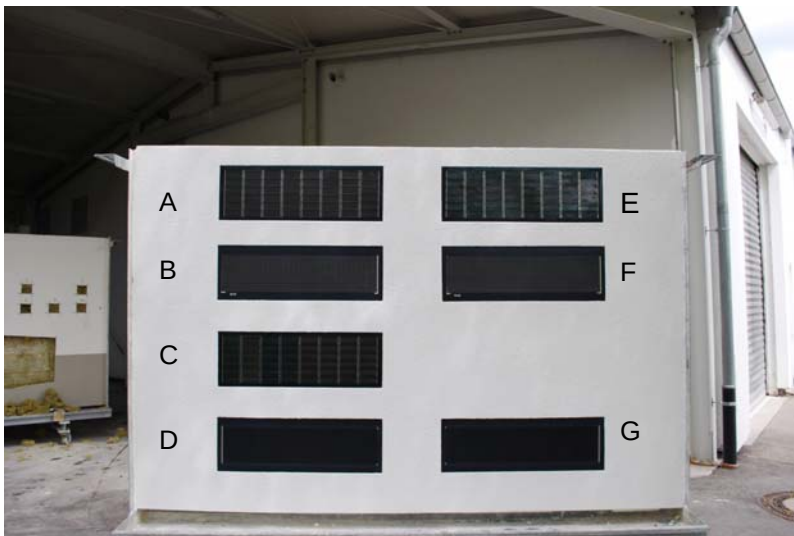


Abbildung 40

Varianten Togowand

- A Putzträgerplatte – Kantenprofil und Fugenband – K6
- B Putzträgerplatte – Randstreifen – K6 – Vlies mit K8 verklebt
- C Dämmplatte – Randstreifen – K6
- D Dämmplatte – Randstreifen – K6
- E Putzträgerplatte – Kantenprofil und Fugenband – K6
- F Putzträgerplatte – Randstreifen – K6 – Vlies mit K8 verklebt
- G Dämmplatte – Randstreifen – K6 – Vlies mit K8 verklebt

Die Testwand wurde folgendem Zyklus unterworfen. Es erfolgte eine Erwärmung auf 70 °C durch Infrarot (IR)-Bestrahlung, wobei die Temperatur für zwei Stunden gehalten wird. Anschließend erfolgt eine zweistündi-

ge Berieselung bei einer Wassertemperatur kleiner als 20 °C. Die Prüfdauer entsprach 800 h, was 200 Zyklen entspricht.

Die Öffnung der Testwand nach Beendigung der Prüfung führte zu folgenden Ergebnissen:

Sowohl bei den Varianten A und E als auch C und D zeigt sich eine gute Haftung des gesamten Aufbaus. Die Elemente sind trocken. Es zeigt sich durch thermische Längenänderungen eine kleine Abrissfuge zwischen PV-Element und Putzaufbau, da der Putz direkt an die Module angeschlossen wurde.

Bei den Elementen B, F und G hatte sich das Vlies großflächig von der Trägerplatte gelöst. Der Dispersionsklebstoff ist für die Anwendung ungeeignet.



Abbildung 41

Aufbau A nach Versuchsdurchführung



Abbildung 42

Aufbau C nach Versuchsdurchführung

9.12 Visualisierung

In Abhängigkeit der Zellanzahl kann die Modulgröße theoretisch frei gewählt werden. Durch die Anordnung der Module und die Abstände zwischen den Modulen kann das Erscheinungsbild entscheidend bestimmt werden.

Die Farbwirkung der Fassade könnte z.B. durch einen farbigen Modulrand oder durch eingefärbte Oberputze bzw. durch farbige Beschichtung des Oberputzes verändert werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen zwei Visualisierungen an einem Einfamilienhaus mit unterschiedlicher Modulanordnung und veränderten Abständen.



Abbildung 43

Visualisierung PV- Module horizontal



Abbildung 44

Visualisierung PV-Module vertikal

10 Ökologie

In der Ökobilanz werden Produktsysteme hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus beurteilt. Während das Bauteil Photovoltaikmodul bzw. die Photovoltaikanlage getrennt bilanziert werden kann, hängt die Energieeinsparung durch Dämmstoffe von dem Gebäude ab, sodass hier eine getrennte Betrachtung von PV und Dämmstoff erfolgt.

10.1 Photovoltaik

Von der International Energy Agency (IEA) wurden 2009 Richtlinien, die sogenannten „Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity“, für die Erstellung von Ökobilanzen von Photovoltaikanlagen veröffentlicht.

Bei einer Photovoltaikanlage umfasst der Lebenszyklus u.a. die Gewinnung der Rohstoffe, die Produktion der Solarzellen, die Herstellung der Module, des Generators, des Wechselrichters und aller Leitungen, die Installation und den Betrieb der Anlage sowie ihre Entsorgung. In der Nutzungsphase wird Energie durch die PV-Systeme erzeugt. Einfluss auf den Ertrag der Anlage haben insbesondere der Aufstellort mit der auf die Module auftreffenden Solarstrahlung, der Modul- und Systemwirkungsgrad und die Lebensdauer der Anlage bzw. der Systemkomponenten. Um eine Vergleichbarkeit der Photovoltaikanlagen zu ermöglichen, sind in den Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity Rahmenbedingungen festgelegt. Die Rahmenbedingungen setzen eine optimale Ausrichtung der Module voraus, eine 30-jährige Nutzungsdauer sowie einen Systemwirkungsgrad von 75%. Die Nutzungsphase kann mit der Energierückgewinnungszeit (Energy Payback Time (EPBT)) beurteilt werden. Diese setzt den Primärenergieverbrauch des Systems über den Lebenszyklus mit der jährlich eingesparten Primärenergie ins Verhältnis. Die jährlich eingesparte Primärenergie wird ausgedrückt durch den Energieertrag der Anlage bzw. den substituierten Strom am Referenzstandort.

Durch die Festlegung der Rahmenbedingungen ist die EPBT nur noch vom Wirkungsgrad der Module und vom Standort mit dem Einstrahlungspotenzial und Strommix abhängig.

Die jährliche mittlere Einstrahlung in den EU-Ländern auf optimal Süd- ausgerichtete Photovoltaikmodule wird vom Joint Research Center (JRC), Gemeinsame Forschungsstelle (GFS) der Europäischen Kommission, mit $1700 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ angegeben. Da das PV-WDVS System nur für die Anwendung auf der Fassade vorgesehen ist, muss realistischerweise eine Abminderung der Einstrahlung von 30 % angenommen werden. Damit beträgt die jährliche Energieerzeugung bei einem Modulwirkungsgrad von 11 % $98,18 \text{ kWh/m}^2$. In aktuellen Veröffentlichungen wird als Primärenergiebedarf zur Herstellung von CIS-Solarmodulen 2.000 MJ/m^2 ohne das BOS (Balance-Of-System: PV-System-Komponenten ohne Module: Wechselrichter/Verkabelung/Montagesystem) angegeben. Damit

beträgt die EPBT unter Berücksichtigung der Einsparung des EU27 Strommix (11 MJ Primärenergiebedarf je kWh) weniger als 2 Jahre. In Deutschland würde die EPBT aufgrund der geringeren Einstrahlung weniger als 3 Jahre betragen.

Bei der Betrachtung der Bilanzen zum Lebensende müssen die Aufwendungen des Recycling wie Energieverbräuche und Entsorgungen berücksichtigt werden. Als Gutschriften können z.B. die weitere Verwertung angesetzt werden.

10.2 PUR-Trägerplatte

Für PUR-Hartschaumdämmstoffplatten existiert eine Umweltproduktdeklaration, die eine Ökobilanz beinhaltet. Bilanziert werden die Ströme durch Produktion der Rohstoffe und Hilfsstoffe, Transporte und Verpackungen sowie eine thermische Verwertung. Die Energieeinsparung in der Nutzungsphase wird nicht bilanziert. Begründet wird dies in der EPD in der Vielzahl der Nutzungsoptionen.

10.2.1 Herstellung

Polyurethan-Hartschaum entsteht durch eine chemische Reaktion von MDI (Methyldiphenyldiisocyanat) und Polyol unter Zusatz von Treibmitteln. (Die Treibmittel verbleiben in den Schaumzellen.) Die Rohstoffe werden hauptsächlich aus Erdöl gewonnen. Polyol kann auch aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Als nicht erneuerbarer Anteil der Primärenergie für die Herstellung und den Transport von PUR mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,03 \text{ W/(mK)}$ wird für eine Dämmstoffdicke von 10 cm $276,8 \text{ MJ/m}^2$ angegeben.

10.2.2 Nutzungsphase

Die Primärenergieeinsparung in der Nutzungsphase kann nur für ein Beispielgebäude gezeigt werden.

Beispiel:

Altbau, 1,5 geschossig

Nutzfläche: 75 m^2

U-Wert Außenwand: $1,76 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

U-Wert Fenster: $3,0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Fensterflächenanteil: 20 %

Heizung: Niedertemperaturkessel

Bei einer angenommenen Verbesserung des U-Wertes einer vorher undgedämmten Außenwand von $1,76$ auf $0,22 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ bei einer Dämmstoffdicke von 10 cm verringern sich die Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände um den Faktor 8.

Unter Zugrundelegung obiger Gebäudeannahmen verringert sich der Heizwärmebedarf des Gebäudes um 40 % von $367 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ auf 220

kWh/m² a. Der Primärenergiebedarf wird um 34 % von 555 kWh/m² a auf 365 kWh/m² a reduziert. Die Berechnung erfolgte nach EnEV 2009.

Die Energierückgewinnungszeit ergibt sich wie folgt:

$$\text{EPBT} = \frac{226,8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}}{190 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}} - \frac{58 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{190 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}} = 0,3 \text{ Jahre}$$

d.h. bei dem Beispielgebäude würde sich die Maßnahme im ersten Jahr amortisieren.

10.2.3 End-of-Life

Bei der Anwendung von Dämmstoffen sind die Ziele eine lange Nutzungsdauer, Trennbarkeit und die Wiederverwendung der Baustoffe. Insbesondere bei geklebten Systemen ist eine Trennung der Einzelkomponenten nicht bzw. wirtschaftlich nicht möglich. Auch die Wiederverwendung der Komponenten des WDVS ist eingeschränkt durch den nicht wieder zu verwendenden Putz und die nicht zerstörungsfrei ausbaubaren Dämmstoffplatten. Eine thermische Verwertung ist bei PUR-Dämmstoffplatten möglich. Als Gutschrift werden in der EPD 50 MJ/m² angesetzt, die bei der thermischen Verwertung anfallen.

11 Wirtschaftlichkeit

Für die energetische Sanierung von Gebäuden sowie die Nutzung erneuerbarer Energien stellen Bund, Länder und Energieversorger Fördermittel zur Verfügung.

In Programmen des Bundes ist eine Dämmung der Außenwand über das KfW-Wohneigentumsprogramm und über die Programme Energieeffizient Bauen bzw. Energieeffizient Sanieren möglich. Photovoltaikanlagen können über das Programm Erneuerbare Energie Standard gefördert werden. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das im April 2000 als Weiterentwicklung des Stromeinspeisegesetzes in Kraft trat, regelt die Einspeisevergütung für erzeugten Strom aus erneuerbaren Energien und die vorrangige Abnahme durch die Netzbetreiber.

Die Wirtschaftlichkeit eines WDVS hängt, wie die ökologische Betrachtung, von dem Gebäude ab, das gedämmt wird. Im Folgenden wird deshalb nur eine Betrachtung der PV-Anlage vorgenommen.

Die Investitionskosten der PV-Anlage setzen sich zusammen aus den Modulkosten, Kosten für Verkabelung, den Wechselrichtern, Planungskosten und Kosten für die Montage incl. elektrischer Verschaltung. Der Aufwand in der Vorfertigung, d.h. Verklebung des Moduls auf die Trägerplatte, muss berücksichtigt werden. Die Substitution des Putzes kann positiv angerechnet werden.

Zu den Betriebskosten der PV-Anlage zählen die Kosten für Versicherung, Zählermiete, Rückstellungen für Reparaturen, Wartung, Instandhaltung, die Betriebsdatenüberwachung sowie evtl. Kosten für die Flächennutzung. Bei diesen Fassadenanlagen kann für Betriebskosten mit 0,7 % der Investitionskosten gerechnet werden.

Die Ertragsabschätzungen und Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden mit der Simulationssoftware PV Sol Expert durchgeführt.

Als Beispiel für den Generator wurden 60 Module mit einer Leistung von insgesamt 5,4 kWp angesetzt. Die Fassadenflächen sind unverschattet.

Modulkennwerte:

Größe: 1200 mm x 810 mm

Leistung: 90 W

Spannung im MPP: 15,3 V

Strom im MPP: 5,88 A

Leerlaufspannung: 21,3 V

Kurzschlussstrom: 6,92 A

Temperaturkoeffizient: -0,45 %/K

Degradation: 0,5 % p. a.

Laufzeit der Anlage: 30 Jahre

Variiert werden die Standorte, die Höhe der Investitionskosten, die Art der Finanzierung, der Eigenverbrauchsanteil und der Netzstrompreis.

Es werden 4 verschiedene Standorte in Deutschland mit jeweils zwei Fassadenausrichtungen, Süd- und Westausrichtung, untersucht.

Die folgende Tabelle stellt für die verschiedenen Standorte und Ausrichtungen die Jahreseinstrahlung und den Jahresertrag zusammen. Der Ertrag der Anlage hängt vom Standort und damit den Wetterbedingungen, der Ausrichtung, der Einbausituation und damit Temperaturentwicklung im Modul sowie der Anlagengüte mit ihrer optimalen Auslegung und Installation ab.

Variante	Standort/Ausrichtung	Jahreseinstrahlung [kWh/a]	Jahresertrag [kWh/a]
A	Hamburg/Westfassade	28.272,4	2.154
B	Hamburg/Südfassade	37.503	2.993
C	Berlin/Westfassade	30.645	2.341
D	Berlin/Südfassade	40.546	3.247
E	Köln/Westfassade	29.963	2.269
F	Köln/Südfassade	38.891	3.049
G	München/Westfassade	35.079	2.713
H	München/Südfassade	45.114	3.619

Abbildung 45

Jahreserträge verschiedener Standorte

In der folgenden Tabelle sind die Varianten zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit zusammengestellt.

Die Investitionskosten der PV-Anlage werden zwischen 1.000 und 1.500 €/kWp kalkuliert.

Die Finanzierung durch Fremdkapital berücksichtigt die Inanspruchnahme des KfW-Programmes Erneuerbare Energien Standard. Bei einer Laufzeit über fünf Jahre und einem tilgungsfreien Jahr beträgt der Zinssatz 1,31 % eff. (Stand: 25.06.2012)

Der Kapitalzins wird mit 3 % berücksichtigt. Alle Angaben sind Netto-Angaben.

Als Datum der Inbetriebnahme wird der 01.07.2012 angesetzt. Der eingespeiste Strom wird nach EEG Novelle mit 0,1892 €/kWh über 20 Jahre zzgl. Inbetriebnahmejahr vergütet.

Variante	Investitions- kosten [€/kWp]	Finanzierung	Eigenver- brauch [%]	Netzstrompreis [€/kWh]
1	1.500	Eigenkapital	0	
2	1.500	Fremdkapital	0	
3	1.000	Eigenkapital	0	
4	1.000	Fremdkapital	0	
5	1.500	Eigenkapital	40	0,20
6	1.500	Fremdkapital	40	0,20
7	1.000	Eigenkapital	40	0,20
8	1.000	Fremdkapital	40	0,20
9	1.500	Eigenkapital	40	0,25
10	1.500	Fremdkapital	40	0,25
11	1.000	Eigenkapital	40	0,25
12	1.000	Fremdkapital	40	0,25

Abbildung 46

Varianten Wirtschaftlichkeitsbe-
rechnung

Als Methode zur Berechnung der Amortisationszeit wurde die dynami-
sche Amortisationsrechnung verwendet.

	Amortisationszeit (Dynamische Berechnung) [a]							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	>30	22,5	>30	19,8	>30	21,8	26,4	16,9
2	>30	20,2	>30	17,9	>30	19,6	23,6	15,3
3	20,0	12,6	17,7	11,4	18,5	12,3	14,1	9,9
4	18,0	11,5	16,0	10,4	16,7	11,3	13,1	9,1
5	>30	21,7	>30	19,2	>30	21,1	25,4	16,4
6	>30	19,5	29,2	17,3	>30	19	22,7	14,9
7	19,3	12,3	17,1	11,1	17,9	12	14	9,7
8	17,4	11,2	15,5	10,1	16,2	10,9	12,7	8,8
9	>30	18,7	27,6	16,6	29,2	18,2	21,7	14,3
10	28,4	16,9	24,6	15,1	26	16,5	19,5	13
11	16,7	10,8	14,9	9,8	15,6	10,6	12,3	8,6
12	15,2	9,9	13,6	9	14,1	9,7	11,2	7,9

Abbildung 47

Amortisationszeiten der verschiedenen Varianten

Die Berechnungen zeigen, dass sich die PV-Anlage auch bei Investitionskosten von 1.500 €/kWp an allen vier Standorten bei Südausrichtung lohnt.

Die Inanspruchnahme der KfW-Förderung, begründet durch den derzeit niedrigen Zinssatz, führt zu reduzierten Amortisationszeiten.

Bei einer Einspeisevergütung, die niedriger ist als der Netzstrompreis, ist der Anreiz zum Eigenverbrauch gegeben. Je höher dabei der Netzstrompreis, desto mehr lohnt sich der Eigenverbrauch. Bei der im Berechnungsbeispiel günstigsten Annahme, d.h. der Standort München in Südausrichtung, Investitionskosten von 1.000 €/kWp, Fremdfinanzierung, 40 % Eigenverbrauchsanteil und einem Nettostrompreis von 25 ct/kWh würde sich die PV-Anlage nach 8 Jahren amortisiert haben.

12 Verbreitung der Ergebnisse

12.1 Veröffentlichungen

Das Forschungsprojekt wurde in folgenden Beiträgen erwähnt bzw. vorgestellt:

- Weller; Fischer; Hemmerle: Fassaden unter Strom, Deutsches IngenieurBlatt, Ausgabe 06/11, S. 22-24
- Fokus: Solartechnik, Detail Green, Ausgabe 01/12, S. 64
- Integration von Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme, ZDB-direkt, Ausgabe 02/12, S. 11
- Strom aus dem WDVS, Ausbau + Fassade, Bundesverband Ausbau und Fassade, Ausgabe 06/12, S. 8
- BMVBS/BBSR (Hrsg.): Zukunft bauen, Das Magazin der Forschungsinitiative Zukunft Bau, Ausgabe 3, zurzeit in Vorbereitung

12.2 Vorträge

19.01.2011	Bau 2011, München	Fassadentechnik: Wärmedämm- Verbundsystem mit CIS-Photovoltaik	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
28.02.2012	4. Anwenderforum Bauwerkintegrierte Photovoltaik, Bad Staffelstein	Integration flexibler Photovoltaik-Module in Wärmedämm- Verbundsysteme	Dipl.-Ing. Jasmin Fischer

Zudem wurde das Forschungsprojekt in Vorträgen zum Thema Fassaden auf den Messen Deubau 2012, Essen und bautec 2012, Berlin erwähnt.

12.3 Messeexponate

Der Prototyp wurde auf den Messen Deubau 2012 in Essen und auf der bautech 2012 in Berlin ausgestellt.



Abbildung 48

Ausstellung Prototyp auf der bautech 2012 in Berlin

Geplant ist zudem die Ausstellung eines PV-WDVS-Exponates auf der Messe Farbe – Ausbau & Fassade 2013 in Köln.

13 Literaturverzeichnis

- [1] Baade, W.: Brandschutzproblematik bei Photovoltaikanlagen, Beitrag in „ep Photovoltaik“, Hefte 1/2-2010 und 3/4-2010
- [2] Beer, Michael: Kein höheres Risiko, Beitrag in „Deutsches IngenieurBlatt“, Heft 10/2009
- [3] BMU: Erneuerbare Energien in Zahlen, 2010
- [4] BMWi/BMU: Energiekonzept, 2010
- [5] DIN 4102: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen
Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, 1998-05
Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, 1977-09
Teil 3: Brandwände und nichttragende Außenwände, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, 1977-09
Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, 1994-03
Teil 9: Kabelabschottungen; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, 1990-05
Teil 12: Funktionserhalt von elektrischen Kabelanlagen; Anforderungen und Prüfungen, 1998-11
- [6] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau – Anforderungen und Nachweise, 1989-11
- [7] DIN 18558: Kunstharzputze; Begriffe, Anforderungen, Ausführung, 1985-01
- [8] DIN 53294: Prüfung von Kernverbunden, Scherversuch, 1982-02
- [9] DIN 55699: Verarbeitung von Wärmedämm-Verbundsystemen, 2005-02
- [10] DIN EN 1464: Klebstoffe-Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen-Rollenschälversuch, 2010-06
- [11] DIN EN 1607: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene, 1997-01
- [12] DIN EN 13501-1: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2007+A1:2009
- [13] DIN EN 28510, Teil 1: Klebstoffe – Schälprüfung für flexibel/starr geklebte Proben, 1993-05
- [14] DIN EN 61646: Terrestrische Dünnschicht-Photovoltaik (PV)-Module-Bauartegnung und Bauartzulassung, 2009-03
- [15] DIN EN 62305-1: Blitzschutz

Teil 1: Allgemeine Grundsätze; Deutsche Fassung
EN 62305, 2006-01

Teil 2: Risiko-Management; Deutsche Fassung EN 62305, 2006-02

Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen, Deutsche Fassung EN 62305-3, 2006-03

Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen, Deutsche Fassung EN 62305, 2006-04

- [16] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement-Ökobilanz-Grundsätze und Rahmenbedingungen, 2009-11
- [17] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 31. Oktober 2008 mit Änderungen vom 11. August 2010
- [18] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e. V., Bundesverband Ausbau und Fassade im ZDB u.a., „ABC der Wärmedämmung“, Ausgabe 2009
- [19] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V., „Technische Systeminfo Nr. 7 Wärmedämm-Verbundsysteme zum Thema Schallschutz“, Eigenverlag, 2. Auflage November 2003
- [20] Frössel, F. /Haegeler, W. /Oberhaus, H. /Riedel, W.: Wärmedämm-Verbundsysteme, Baulino, 2. Auflage, Waldshut-Tiengen 2010
- [21] Häupl, P.: Bauphysik: Klima, Wärme, Feuchte, Schall, Ernst & Sohn, Berlin 2008
- [22] Haselhuhn, R./ Hartmann, U.: Photovoltaische Anlagen, 4. Auflage – Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2010 Berlin.
- [23] Jäger, A.: PV Status Report – Joint Research Centre and Institute for Energy, European Commission, August 2010.
- [24] Krause, Melanie: Ein neues Konzept zum Nachweis der Standsicherheit von Dübelbefestigungen in Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS), zugleich Dissertation, TU Dortmund 2010
- [25] Leitlinie für die europäische technische Zulassung für außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht (ETAG 004), Ausgabe 2000
- [26] Leitlinie für die europäische technische Zulassung für Bausätze aus vorgefertigten Wärmedämmelementen für Außenwandbekleidungen (ETAG 017), Ausgabe April 2008
- [27] Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, Report IEA-PVPS T12-01:2009
- [28] Musterbauordnung (MBO); Fassung November 2002 – zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008 (Einschl. Änderung von § 20 Satz 1 gem. Beschluss der FK Bauaufsicht vom Mai 2009)

- [29] Prognos AG/EWi/GWS: Studie - Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, 2010
- [30] Ross, M. et al.: Einfluss gebäudenaher Photovoltaik-Anlagen auf den Primärenergiebedarf von Gebäuden nach EnEV in: Bauwerk-integrierte Photovoltaik, 4. Anwenderforum, Bad Staffelstein 2012
- [31] Weller, B. /Hemmerle, C. /Jakubetz, S. /Unnewehr, S.: Photovoltaik - Technik, Gestaltung, Konstruktion, Edition Detail, Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, München 2009.

14 Abbildungsverzeichnis und -nachweis

Abbildung 1	PV-WDVS Testwand mit CIS-Photovoltaik (J. Fischer, TU Dresden)	10
Abbildung 2	Ursprünglich geplanter Arbeitsplan.....	17
Abbildung 3	Projekttreffen.....	19
Abbildung 4	Marktentwicklung PV in Deutschland (nach Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)	20
Abbildung 5	Marktentwicklung WDVS in Deutschland (nach Fachverband WDVS)	21
Abbildung 6	Gebäudebestand 2009 (nach Statistisches Bundesamt Deutschland)	22
Abbildung 7	Prognose zum zukünftigen WDVS-Markt (nach [20]).....	22
Abbildung 8	Einstrahlung unterschiedlicher Flächenorientierungen ([31])	23
Abbildung 9	Verschattungsursachen ([31]).....	24
Abbildung 10	Patentrecherche.....	26
Abbildung 11	Aufbau WDVS (Sto AG).....	28
Abbildung 12	Konstruktion des Elementes	34
Abbildung 13	Aufbau CIS-Solarmodul	35
Abbildung 14	CIS-Solarmodul (CIS Solartechnik)	35
Abbildung 15	Eigenschaften verschiedener Dämmstoffe	36
Abbildung 16	Relativer Wirkungsgrad von Solarmodulen	37
Abbildung 17	Rückseitige Temperatur eines Solarmoduls.....	38
Abbildung 18	Temperaturverlauf PV-Oberfläche an der Südfassade	39
Abbildung 19	Temperaturverlauf PV-Oberfläche an der Westfassade.....	39
Abbildung 20	Feuchtemassen total	40
Abbildung 21	Relative Luftfeuchte	41
Abbildung 22	Überhygroskopische Feuchtemasse	41
Abbildung 23	Geprüfte Klebstoffe	42
Abbildung 24	Universalmaschine mit Prüfkörper.....	43
Abbildung 25	Aufzeichnung der Last-Verschiebungskurve	44
Abbildung 26	Probekörper nach Versuchsdurchführung.....	44
Abbildung 27	Schälwiderstände und Versagensart.....	44
Abbildung 28	Versuchsaufbau nach DIN EN 1607.....	46
Abbildung 29	Aufbau Probekörper A1/A2.....	46
Abbildung 30	Probekörper Aufbau A1 nach Versuchsdurchführung	47
Abbildung 31	Aufbau Probekörper A3	48
Abbildung 32	Probekörper Aufbau A3 nach Versuchsdurchführung	48
Abbildung 33	Kraft-Schubverformungsdiagramm.....	49
Abbildung 34	Versuchsaufbau Scherversuch.....	50
Abbildung 35	Versuchsaufbau Entflammbarkeitsprüfung (Sto AG).....	50
Abbildung 36	PV-WDVS-Prototyp auf dem Testfeld (CIS Solartechnik)	52
Abbildung 37	Wirkungsgrad des PV-WDVS-Prototypen als Fkt. der Temperatur.....	52
Abbildung 38	Wirkungsgrad des PV-WDVS-Prototypen als Fkt. der Einstrahlung	53
Abbildung 39	Aufbau Togowand (Sto AG).....	55
Abbildung 40	Varianten Togowand.....	55
Abbildung 41	Aufbau A nach Versuchsdurchführung (Sto AG).....	56
Abbildung 42	Aufbau C nach Versuchsdurchführung (Sto AG).....	56

Abbildung 43	Visualisierung PV-Module horizontal	57
Abbildung 44	Visualisierung PV-Module vertikal	57
Abbildung 45	Jahreserträge verschiedener Standorte	62
Abbildung 46	Varianten Wirtschaftlichkeitsberechnung	63
Abbildung 47	Amortisationszeiten der Varianten.....	64
Abbildung 48	Ausstellung Prototyp (J. Fischer, TU Dresden)	66

Sofern nicht anders angegeben liegen die Rechte bei den Autoren.

15 Anhang

Nachweisverfahren nach ETAG 017

ER	Abschnitt der ETAG über Produktleistung	Produktmerkmal	Abschnitt der ETAG über Nachweisverfahren	
			Bausatz (eingebautes System)	Bestandteil
1	–	–	–	–
2	4.2.1 Brandverhalten	Brandverhalten	5.2.1 Brandverhalten	
3	4.3.1 Umwelt im Innern von Gebäuden, Feuchtigkeit	Wasserdichtigkeit Wasserdurchlässigkeit Wasserdampfdurchlässigkeit Verhalten bei Feuchtigkeit	5.3.1 Wasserdichtigkeit 5.3.2 Wasserdurchlässigkeit 5.3.4.2 hygrothermisches Verhalten 5.3.4.3 Frost-Tauwechselverhalten	5.3.3 Wasserdampfdurchlässigkeit (Deckschicht oder Wärmedämm- element) 5.3.4.1 Kapillaritätsprüfung (Wärmedämmelement) 5.3.4.2 hygrothermisches Verhalten (Wärmedämmelement) 5.3.4.3 Frost-Tauwechselverhalten (Wärmedämmelement)
	4.3.2 Äußere Umwelt	Freisetzung gefährlicher Stoffe	5.3.5 Freisetzung gefährlicher Stoffe	

Abschlussbericht

Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme

ER	Abschnitt der ETAG über Produktleistung	Produktmerkmal	Abschnitt der ETAG über Nachweisverfahren	
4	4.4 Nutzungssicherheit	Widerstand gegen Windlasten Mechanische Festigkeit Widerstand gegen horizontale Lasten Stoßfestigkeit Brucheigenschaften	5.4.1.1 Windsogversuch 5.4.1.2 Ermüdungsprüfung 5.4.1.3 Winddruckversuch 5.4.2.1 Haftvermögen zwischen Deckschicht und Dämmschicht (Wärmedämmelement) 5.4.2.2 Prüfung der Durchzugsfestigkeit der Befestigungen 5.4.2.2.1 Durchzug durch das Dämmmaterial 5.4.2.2.2 Durchzug durch die Deckschicht 5.4.2.3 Tragfähigkeit der Nutverbindung in der Deckschicht 5.4.2.4 Tragfähigkeit der Nutverbindung in der Wärmedämmschicht 5.4.2.5 Durchzug der Befestigungen durch die Profile 5.4.2.3 Eigenlast-Prüfung 5.4.2.4 Verschiebungsprüfung 5.4.3 Prüfungen der Haltvorrichtungen 5.4.4 Widerstand gegen horizontale punktuelle Lasten 5.4.5 Stoßfestigkeit 5.4.6 Brucheigenschaften	
5	4.5 Schallschutz	Luftschalldämmung	5.5 Schallschutz	
6	4.6 Energieeinsparung und Wärmeschutz	Wärmedurchlasswiderstand	5.6.1 Wärmedurchlasswiderstand	5.6.2 Wärmedurchlasswiderstand des Dämmstoffes 5.6.3 Wärmedurchlasswiderstand der Deckschicht
Aspekte der Dauerhaftigkeit und der Gebrauchstauglichkeit	4.7 Aspekte der Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit	Widerstand gegen Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit und Schwinden Feuchtigkeitsbeständigkeit Formbeständigkeit Widerstand gegen chemische und biologische Einflüsse Korrosion UV-Strahlung	5.7.1 Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit und Schwinden 5.7.1.1 Bausatz 5.7.2.2 Bausatz 5.7.3.3 Wärmeschock-Zyklen	5.7.1.2 Dämmstoff 5.7.2.1 Deckschicht 5.7.2.3 Klebstoff 5.7.3.1 Formbeständigkeit der Deckschicht 5.7.3.2 Formbeständigkeit des Dämmstoffes 5.7.4 Widerstand gegen chemische und biologische Einflüsse (Deckschicht) 5.7.5 Korrosion (Deckschicht, Profile und Befestigungselemente) 5.7.6 UV-Strahlung (Deckschicht)