

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

MSc Programm
"Renewable Energy in Central & Eastern Europe"



Untersuchung der thermischen Eigenschaften gebäudeintegrierter
Photovoltaik (GIPV) – Elemente im Vergleich zu herkömmlichen
Fassadenbaustoffen im Anwendungsgebiet Sanierung

Master Thesis zur Erlangung des akademischen Grades
„Master of Science“

eingereicht bei
ao.Univ.Prof. Dr. Reinhard Haas

Mag. Anna Katharina Gollob
0020912

Wien, 28.09.2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich, **Anna Katharina Gollob**, versichere hiermit

1. dass ich die vorliegende Master These, "Untersuchung der thermischen Eigenschaften gebäudeintegrierter Photovoltaik (GIPV) – Elemente im Vergleich zu herkömmlichen Fassadenbaustoffen im Anwendungsgebiet Sanierung", 76 Seiten, gebunden, selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfen bedient habe, und
2. dass ich diese Master These bisher weder im Inland noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Wien, 28.09.2011

Unterschrift

Abstract

Bei einer Verdoppelung der kumulierten installierten Leistung im GIPV-Sektor rechnet man in den nächsten 10 Jahren mit Systempreisen, welche unter jenen für konventionelle Fassadenbaustoffe liegen könnten.

Gebäudeintegrierte Photovoltaik bietet die Möglichkeit der umweltfreundlichen Energieerzeugung auf großen, meist ungenutzten Flächen sowohl im Neubau als auch bei Sanierungen von unterschiedlichsten Gebäuden. Neben den architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten bieten sich Synergieeffekte mit konventionellen multifunktionalen Bauelementen beispielsweise zur Schall- oder Wärmedämmung an.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den technischen Möglichkeiten zur Integration von PV bei Sanierungen und deren thermische Wirkungen auf die Wärmedämmung eines Gebäudes. Zu diesem Zweck werden die Fassadenbestandteile Verbundglas, Isolierglas und Dämmverbund XPS und deren thermische Charakteristika mit und ohne Integration von PV in einem Fallbeispiel verglichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Forschungsfragen	2
1.3	Hauptliteratur	2
1.4	Aufbau der Arbeit	3
2	Methodischer Ansatz	4
3	Was bedeutet gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV)	5
3.1	Vorteile und Gründe für die PV-Nutzung und Integration in Gebäuden.....	6
3.2	Nachteile der PV-Nutzung	7
3.3	Nutzungspotenziale multifunktionaler PV-Elemente	8
4	Konstruktive Integration der PV	9
4.1	PV und konventionelle Baumaterialien	9
4.2	PV-Integration in vorgefertigte Bauteile	10
4.3	PV in multifunktionalen Gesamtlösungen.....	10
5	Einsatzfelder der PV am Gebäude	11
5.1	PV-Fassadenintegration in der Sanierung	12
5.1.1	Wohnbauten aus der Gründerzeit.....	13
5.1.2	Wohnbauten der 20er und 30er Jahre	13
5.1.3	Wohnbauten der 40er und 50er Jahre	13
5.1.4	Wohnbauten der 60er und 70er Jahre	14
5.2	Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)	14
5.3	Doppelfassade	16
5.4	Lüftungssysteme	16
5.5	Leistungsfähigkeit der beiden Fassadenebenen	18
5.6	Weitere Konstruktionstypen für Glasfassaden.....	19
5.6.1	Kaltfassade mit PV	19
5.6.2	Warmfassade mit PV	19
5.6.3	Kalt/Warm-Fassade mit PV.....	19
5.6.4	Structural-Glazing-Fassade mit PV	20
6	Überblick über Photovoltaiksysteme	21

6.1	Technische Modulooptionen für GIPV	22
6.2	Gestalterische Modulooptionen für GIPV	24
7	Rahmenbedingungen für PV und thermische Sanierung	28
7.1	Standort und Leistung	28
7.2	Effizienzverluste	30
7.2.1	Auswirkung von Neigung und Orientierung	30
7.2.2	Auswirkung von Verschattung.....	32
7.2.3	Auswirkungen von Verschaltungen und Wechselrichterkonzepten.....	33
7.2.4	Auswirkung von Temperatureffekten und Hinterlüftung.....	34
8	Materialien für PV-Bauelemente.....	35
9	Thermische Eigenschaften von Fassadenbaustoffen und-elementen	36
9.1	Wärmedämmung klassischer Dämmstoffe	36
9.2	Mögliche Schichtaufbauten mit Verbundglas/Isolierglas zur thermischen Optimierung.....	39
9.3	Wärmedämmung und Energieertrag transparenter Bauteile sowie Dämmverbund in Verbindung mit PV	41
9.3.1	Zellen- und Betriebstemperaturen unterschiedlicher Bauelemente.....	44
9.4	Temperaturmodell für PV-Module	45
10	Fallbeispiel: Sanierung Drei- Familien-Haus in Herzogenburg.....	50
11	GIPV aus wirtschaftlicher Sicht	63
11.1	Preisentwicklung im GIPV-Sektor	65
11.2	Exkurs: Verwendung von Dünnschichtzellen in GIPV	68
12	Wirtschaftliche Aspekte des Fallbeispiels	69
13	Zusammenfassung	72
14	Literaturverzeichnis.....	75

Abbildungsverzeichnis

Tab. 2.1: Wirkungsgrade und Flächenbedarf verschiedener PV-Zellen

Tab. 9.1: Thermische Eigenschaften verschiedener Baumaterialien

Tab. 9.2: Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile - 24 mm Dicke

Tab. 9.3: Aussen – und Innentemperaturen der Module

Tab. 10.1: Thermische Eigenschaften der Bestandteile von GIPV

Tab. 10.2: Angaben zu horizontalem Wärmefluss in Abhängigkeit von Abmessungen des Fassadenzwischenraums

Tab. 10.3: Wärmeübergangswert (U-Wert), Transmissionsleitwert und Temperaturkorrekturfaktor (f) der einzelnen Bauteile des Gebäudes

Tab. 10.4: Wärmeabgabe der verschiedenen GIPV-Varianten in Sommer und Winter

Tab. 10.5: Solare Wärmegewinne in Abhängigkeit von Himmelsrichtungen

Tab. 10.6: Flächenbezogene Heizlast und Heizwärmebedarf

Tab. 11.1: Unterschiede in Produkthanforderungen zwischen klassischen PV-Modulen und GIPV

Tab. 12.1: Durchschnittliche Kosten für Fassadenelemente mit PV

Tab. 12.2: Temperaturverluste im Vergleich

Tab. 12.3: Ertrag und Kostenvergleich der Anlagen mit und ohne PV

Tab. 13.1: Ertrag und Kostenvergleich der Anlagen mit und ohne PV

Abb. 3.1: PV-Integration als Symbiose

Abb. 3.2: Zusatzfunktionen von PV-Bauelementen

Abb. 4.1: Entwicklungsrichtungen der GIPV

Abb. 5.1: Einsatzmöglichkeiten von PV-Elementen in Gebäuden

Abb. 5.2: Möglichkeiten zur Integration von PV

Abb. 5.3: Doppelfassade mit Lüftungskanälen; Querschnitt (links) und Vorderansicht (rechts)

- Abb. 5.4: Natürlich belüftete Fassade; Sommer (rechts) und Winter (links)
- Abb. 5.5: Fassade mit Hybridlüftung; Sommer (links) und Winter (rechts)
- Abb. 6.1: Aufbau einer Solarzelle
- Abb. 6.2: Leistung einer kristallinen PV-Zelle in Abhängigkeit von der Dicke der Antireflexschicht gemessen unter S:T.C.
- Abb. 6.3: Beispiele für Farbeffekte von PV-Modulen
- Abb. 6.4: Reflexionseigenschaften von Oberflächen
- Abb. 7.1: Reflexions-, Absorptions- und Streuvorgänge in der Atmosphäre
- Abb. 7.2 : Jährlich einfallende Globalstrahlung auf einer horizontalen Ebene
- Abb. 7.3: Sonnenbahnen für Europa
- Abb. 7.4: Diagramm der Sonneneinstrahlung und Flächen eines Gebäudes
- Abb. 7.5: Einsatzprinzipien von PV-Wechselrichtern
- Abb. 8.1: Materialien für PV-Bauelemente
- Abb. 9.1: U-Werte verschiedener Materialien für Fassadenbau
- Abb. 9.2: Grundeinheit mit kristallinen PV-Zellen
- Abb. 9.3: PV-Modul mit Verbundglas
- Abb. 9.4: PV-Modul mit Isolierglas
- Abb. 9.5: VSG Solarmodul
- Abb. 9.6: Darstellung der thermischen Kenngröße U-Wert
- Abb. 9.7: Darstellung der thermischen Kenngröße g-Wert
- Abb. 9.8: Zellen-/Betriebstemperatur der PV-Bauelemente im Vergleich mit konventionellen Bauprodukten im Sommer
- Abb. 9.9: Zusammenhang zwischen Energieeintrag und Leistung eines PV- Moduls
- Abb. 9.10: Bildliche Darstellung der Umwandlungen der eingestrahnten Leistungen in den drei Ebenen eines PV-Moduls
- Abb. 9.11: Validierung des PV-Moduls Glas-Glas
- Abb. 10.1: Vertikalschnitt durch eine Horizontalfuge einer Wetterschutzfassade mit stehender Luftschicht
- Abb. 11.1: Fassadenbaustoffe im Vergleich
- Abb. 11.2: Großhandelspreise PV-Module Stand Oktober 2011

Abb. 11.3: Systemkosten von PV-Anlagen, Halbierung bis 2020

Abb. 11.4: Kostenaufteilung eines GIPV Projektes mittlerer Größe

Abb. 13.1: Mögliche Eintragseinbußen beim Einbau

Abb. 13.2: Unterschiede bei Kosten und Energieeinsparung der verschiedenen Fassadenbaustoffe mit PV

Akronyme

BIPV = Building integrated Photovoltaik

CdTe = Kadmium-Tellurat

CIS = Kupfer-Indium-Diselenid

EFG-Verfahren = Edge-defined Film-fed Growth Verfahren

EVA Verkapselung = Ethylenvinylacetat-Verkapselung

GIPV = Gebäudeintegrierte Photovoltaik

g-Wert = Gesamtenergiedurchlassgrad bei transparenten Materialien

HIT = Heterojunction with Intrinsic Thin-layer

NOCT = Nennbetriebstemperatur (NOCT)

S.T.C. = Standard Test Conditions (1000 W/m²; AM=1,5; Zelltemperatur T=25°C)

U-Wert = Wärmedurchgangskoeffizient

VHF = vorgehängte hinterlüftete Fassade

XPS = Dämmplatten aus extrudiertem Polystyrolschaum

G_T = Solarstrahlung [W/m²]

G_{NOCT} = Solarstrahlung unter NOCT Bedingungen [W/m²]

γ, α, τ = Reflexions-, Absorptions-, Transmissionsgrad

f, b = Vorder-, Rückseite

PV = Photovoltaik

η = PV-Wirkungsgrad

α_{coeff} = Temperaturkoeffizient der Photovoltaik [1/K]

T_M = Modultemperatur [K]

T_{NOCT} = Modultemperatur unter NOCT Bedingungen [K]

$T_{Umg,NOCT}$ = Umgebungstemperatur unter NOCT Bedingungen, 293,15K

T_{STC} = Temperatur der Standard Test Condition [298,15 K]

T_{Umg} = Umgebungstemperatur [K]

T_j = Umgebungstemperatur an der Vorder- und Rückseite des Moduls [K]

C_M = Wärmekapazität des PV-Bauelements [J/K]

$U_{f,b}$ = Wärmedurchgangskoeffizient (W/m^2K)

U_L = Wärmedurchgangskoeffizient (W/m^2K)

$U_{L,NOCT}$ = Wärmedurchgangskoeffizient unter NOCT Bedingungen (W/m^2K)

h_j = Wärmeübergangskoeffizient (W/m^2K)

d_j = Dicke der jeweiligen Schicht (m)

λ_j = Wärmeleitfähigkeit der Schicht (W/mK)

1 Einleitung

Gebäudeintegrierte Photovoltaik bietet die Möglichkeit der umweltfreundlichen Energieerzeugung auf großen Flächen. In Neubau und Sanierung von unterschiedlichsten Gebäuden sind den architektonischen Möglichkeiten kaum Grenzen gesetzt. Zusätzlich können verschiedene Fassadenbaustoffe mit Photovoltaik kombiniert werden, um Zusatzfunktionen wie beispielsweise Schall- oder Wärmedämmung zu erhalten.

Im Bereich thermischer Sanierungen sind die Dämmfunktion und die damit verbundenen thermischen Eigenschaften verschiedener Fassadenbaustoffe von besonderem Interesse. Daher beschäftigt sich die vorliegende Arbeit hauptsächlich mit den thermischen Charakteristika von gebäudeintegrierter Photovoltaik. Diese haben naturgemäß einen entscheidenden Effekt auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage.

Aufgrund des Sanierungsthemas liegt der Fokus bei der Fassadenintegration auf vorgehängten hinterlüfteten Fassaden und Doppelfassaden. Beim Einsatz von Pfosten-Riegel-Fassaden oder Elementfassaden müsste die gesamte Fassade bis zum Rohbau abgerissen werden und dies würde eher einer neu errichteten Fassade als einer Sanierung gleichkommen.

Basierend auf den Erkenntnissen des Fraunhofer Instituts im Projekt „Multielement“ beleuchtet das Fallbeispiel beide Fassadenvarianten aus technischer und wirtschaftlicher Sicht unter Einbeziehung verschiedener Fassadenbaustoffe mit und ohne Photovoltaik.

1.1 Motivation

Unter der Voraussetzung der großflächigen Anlegung und ausreichenden Förderung kann die thermische Sanierung von Bürogebäuden und Privathaushalten in Österreich einen maßgeblichen Effekt auf den Klimaschutz und die Klimaschutzziele der kommenden Jahre haben. Die Offensive wurde schon vor einigen Jahren gestartet, hat aber immer noch nicht den gewünschten Erfolg gebracht. Aus diesem

Grund verliert das Thema nicht an Aktualität und kann in Verbindung mit Photovoltaik seine positiven Effekte auf die Umwelt noch erhöhen.

GLOBAL 2000 ist Partner der Initiative Umwelt, Bauen und Wohnen, welche sich um hohe Standards im Bereich Sanierung und Neubau von Gebäuden engagiert und wird das Thema thermische Sanierung auch schwerpunktmäßig im kommenden Jahr verfolgen. Gemeinsam mit GLOBAL 2000 habe ich mich für diesen Themenbereich entschieden, um einen Grundstein für die Evaluierung möglicher Projektideen im Bereich thermischer Sanierung in Verbindung mit PV zu legen.

1.2 Forschungsfragen

Die folgenden Forschungsfragen werden in dieser Arbeit erörtert:

1. Welche bautechnischen Lösungen stehen bei thermischer Sanierung von Gebäuden für die Integration von PV zur Verfügung?
2. Wie unterscheiden sich die thermischen Eigenschaften herkömmlicher Fassadenbaustoffe wie Glas (Verbundglas, Isolierglas) und Dämmverbund (XPS) von jenen multifunktionaler PV-Elemente in Verbindung mit den erwähnten Materialien?
3. Welchen wirtschaftlichen Effekt hat der Einsatz von PV in Gebäuden?

1.3 Hauptliteratur

Die folgende Auflistung beinhaltet die wichtigste Literatur für die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen:

- Falk, A.; Dürschner; Remmers, K.H: Photovoltaik für Profis, 2. Auflage, Solarpraxis AG, Berlin, 2009
- Fechner, Hubert; Sehnal Erik; Haas; Reinhard; Lopez-Polo, Assun: Gebäudeintegrierte Photovoltaik Teil II. Perspektiven, Potenziale und volkswirtschaftliche Betrachtung der GIPV Technologie, Klima- und Energiefonds, Wien, 2009

- Funtan, Peter; Henze Norbert; Glotzbach Thomas; Misara, Siwanand: Multifunktionale photovoltaische Bauteile Ergebnisse aus dem Projekt MULTIELEMENT, zweites Anwenderforum „Gebäudeintegrierte Photovoltaik“, 2010, Bad Staffelstein (Multielement I)
- Hagemann, Ingo B.: Gebäudeintegrierte Photovoltaik. Architektonische Integration der Photovoltaik in die Gebäudehülle, Rudolf Müller GmbH, Köln, 2002
- Henze, N.; Misara S.; Mazumdar, P.: Temperaturmodell multifunktionaler PV-Bauelemente aus dem Projekt MULTIELEMENT, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2010
- Misara S.; Henze N.; Sidelev A.: Thermische Eigenschaften multifunktionaler PV-Elemente – U-Wert, g-Wert, F_c -Wert, Drittes Anwenderforum gebäudeintegrierte Photovoltaik, Bad Staffelstein, 2011
- Roberts, Simon; Guariento, Nicolo: Gebäudeintegrierte Photovoltaik. Ein Handbuch, Birkhäuser, Basel, 2009

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 11 Hauptkapitel, welche zur besseren Übersicht in fünf Bereiche unterteilt werden können.

- Im ersten Teil der Arbeit werden Forschungsfragen und methodischer Ansatz dargelegt, welche die Grundlage für die folgenden Kapitel bilden.
- Der zweite Teil beschäftigt sich ausgehend von der vom hermeneutischen Kasten vorgegebenen Struktur mit den verschiedenen Möglichkeiten der Integration von Photovoltaik in Gebäude aus technischer Sicht. Die thermischen Eigenschaften verschiedener Baumaterialien werden dabei im Besonderen hervorgehoben. In weiterer Folge werden die Ergebnisse des Fraunhofer Insituts Temperaturmodells zu thermischen Eigenschaften von PV-Modulen mit einem konkreten Fallbeispiel in Herzogenburg verglichen.
- Der dritte Teil ist den wirtschaftlichen Aspekten von GIPV gewidmet.
- Im vierten und letzten Teil fließen die Ergebnisse der Arbeit in die Beantwortung der Forschungsfragen, gefolgt von einem Ausblick.

2 Methodischer Ansatz

Der Erkenntnisprozess stützt sich neben einer ausführlichen Quellen- und Dokumentenrecherche auf die Auswertung spezieller Fachartikel des Fraunhofer Instituts zu dem Projekt „Multielement“.

Die Grundlage für das methodische Vorgehen in der Arbeit bildet das klassische hermeneutische Verfahren der Geisteswissenschaften, dessen Grundsatz besagt, dass das Ganze aus dem Einzelnen und das Einzelne aus dem Ganzen verstanden werden muss. Dieses Prinzip wird traditionell als hermeneutischer Zirkel bezeichnet. Es ist auf die antike Rhetorik zurückzuführen, genauer auf den Topos: Es kann von den Teilen auf das Ganze geschlossen werden. Der Begriff „hermeneutischer Kasten“ wurde von der Autorin basierend auf diesem Prinzip gewählt.

Die Einzelteile sind die verschiedenen Kategorien, welche untersucht werden müssen, um das Thema GIPV als Ganzes zu erfassen. Sie sind in der Spalte ganz links zu finden. Wie bei einem Trichter sind die Auswahlmöglichkeiten zuerst sehr breit und werden dann nach unten hin immer konkreter. Die grünen Felder markieren eine Auswahlmöglichkeit, welche dann auch im Fallbeispiel verwendet wird. Gelb markiert sind jene Felder, welche eine Alternative im Themenbereich „multifunktionale Gesamtlösungen mit PV im Sanierungsbereich“ darstellen.

Tab. 2.1: Hermeneutischer Kasten (eigene Wortschöpfung)

Konstruktive Integration	PV + konventionelle Bauteile	PV + vorgefertigte Bauteile	multifunktionale Gesamtlösungen				
Funktionen von PV in Gebäuden	Witterungsschutz	Wärmedämmung	Abschattung	Schalldämmung	elektromagnetische Schirmdämpfung	Energiewandlung	u.a.
Einsatzfelder am Gebäude	Schrägdach	Flachdach	Oberlichter	Aussenwände	Glasfassaden und structural glazing	Sonnenschutz	
Bauart	Neubau	neu errichtete Fassade	Sanierung	Sanierung historischer Gebäude	neu errichtete Fassade		
Fassadensysteme	Verschattungselemente	VHF	Pfosten-Riegel-Fassade	Elementfassade	Doppelfassade	Atrien und Überdachungen	
Fassadentyp	Kaltfassade mit PV	Warmfassade mit PV	Kalt-/Warm Fassade mit PV	Doppelfassade mit PV	Structural glazing Fassade		
Dämmstoffe	Hartschaum XPS	Schiefer	Stahl	Gipsfaserplatte	Glas	u.a.	
Lüftung	Hybridlüftung	natürliche Lüftung	mechanische Lüftung				
Anbringung in Doppelfassade	Einfachverglasung aussen	Doppelverglasung aussen	Fassadenzwischenraum				
Ausrichtung	Nord	Nord/Ost	Ost oder West	Ost/Süd	Süd	Süd/West	
PV-Technik	Polykristalline Zellen	Monokristalline Zellen	Dünnschicht Zellen	HIT-Zellen			
Transparenz	semitransparent	transparent	nicht transparent				u.a.
Farbe	schwarz	blau	magenta	blaugrün	grau	grün	
Größe	100 x 100 mm	125 x 125 mm	150 x 150 mm	50 x 100 mm	75 x 150 mm	ua.	
Form	runde Zellen	pseudosquare Zellen	quadratische Zellen	sechseckige Zellen	achteckige Zellen	ua.	
PV-System	Inselsystem	Netzanschluss					
Wechselrichter	Zentral WR	String WR	Multistring WR				

3 Was bedeutet gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV)

Der Begriff „Integration“, definiert als „Einbeziehung in ein größeres Ganzes oder als Zusammenschluss zu einem größeren Ganzen“ wird in der PV-Branche ohne inhaltlichen Konsens häufig verwendet. Daher existiert auch keine allgemein anerkannte Definition des Ausdrucks „gebäudeintegrierte Photovoltaik“, abgekürzt GIPV.

Im Gegensatz zu Aufbau- oder additiven Lösungen, bei denen PV-Module auf ein Gebäude mittels Metallkonstruktion montiert werden, beschäftigt sich GIPV mit Photovoltaik als System, welches nicht nur der Stromerzeugung dient, sondern auch als Bauteil fungiert, welches das gesamte Erscheinungsbild eines Gebäudes aufwertet.

In der Architektur werden verschiedenen Bauelementen zu einem Ganzen verbunden, bei der Integration eines PV-Systems in ein Gebäude hingegen muss ,ausgehend von Nutzeranforderungen und finanziellen Mitteln, der Kompromiss zwischen den drei folgenden gleichwertigen Bezugsebenen berücksichtigt werden (Hagemann, 2002):

- Bautechnik
- Elektrotechnik
- Ästhetik
- Komfortbefinden des Menschen
- Nachhaltigkeit

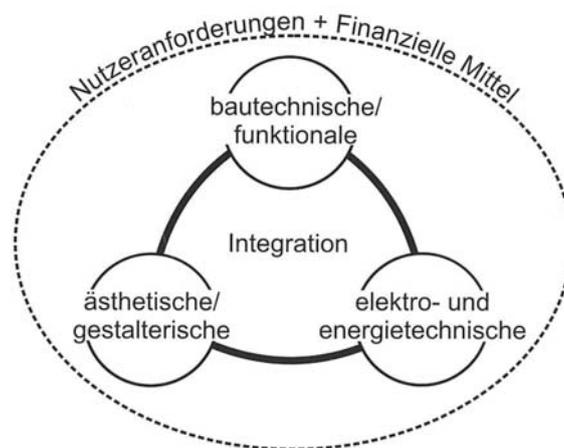


Abb. 3.1: PV-Integration als Symbiose (Hagemann, 2002)

Im Folgenden wird näher auf die verschiedenen Aspekte der PV-Integration mit einem Schwerpunkt auf bautechnische Rahmenbedingungen eingegangen.

3.1 Vorteile und Gründe für die PV-Nutzung und Integration in Gebäuden

Durch die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Energie, erlaubt die PV-Technologie die Nutzung einer kostenlosen, umweltfreundlichen und unerschöpflichen Energiequelle. Der Einsatz von gebäudeintegrierten PV-Systemen hat somit folgende ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber anderen Technologien.

Ökologische Vorteile:

- Die Installation eines gebäudeintegrierten PV Systems kann den Einsatz weiterer Solartechniken begünstigen.
- Multifunktionale PV-Systemkomponenten können konventionelle Baumaterialien ersetzen und somit zur Senkung des Primärenergiebedarfs beitragen.
- Bei Niedrig- bzw. Nullenergiehausstandards kann der erforderliche Restenergiebedarf umweltfreundlich über PV-Generatoren abgedeckt werden.
- Der Einsatz von GIPV führt zur Anregung der Öffentlichkeit zur Diskussion und Nachahmung (Hagemann, 2002)

Ökonomische Vorteile:

- Ungenutzte Gebäudeflächen statt kostenintensiven Bodenflächen führen dazu, dass gebäudeintegrierte PV-Systeme wirtschaftlicher und konkurrenzfähiger sind als freistehende Anlagen.
- Material- und Installationskosten für Fundamente oder Unterkonstruktionen auf Freiflächen vermindern sich um bis zu 25%. (Hagemann, 2002)

- Stromverteilungskosten (Netzgebühren) sind geringer, da der Verbraucher näher bei der Erzeugung ist.
- Mögliche Kosteneinsparungen durch Synergienutzung bei der Substitution einzelner Bauteile durch PV-Bauteile mit denselben Eigenschaften.

3.2 Nachteile der PV-Nutzung

Ein grundlegender Nachteil der PV-Technologie ist die Abhängigkeit der Verfügbarkeit des Sonnenlichts, welche zu Schwankungen bei der Energieausbeute und somit zu Versorgungsunsicherheit führt. Ein zusätzliches Speichersystem erhöht die Gesamtkosten immens und minimiert die positiven ökologischen Auswirkungen. Dies kann durch den Anschluss an das öffentliche Stromversorgungsnetz entschärft werden.

Ein weiterer Punkt ist der hohe Energieaufwand bei der Herstellung von Silizium-Wafern, welche für die PV Module benötigt werden, und die Investitionskosten in die Höhe treiben. Optimierungen im Herstellungsprozess, hauptsächlich beim Materialbedarf, sind Gegenstand der Forschung der letzten Jahre. Derzeit liegt die energetische Amortisation (Energieaufwände bei der Herstellung) von kristallinen Zellen zwischen 2,5 (polykristalline Zellen) und rund 5 Jahren (monokristalline Zellen). (<http://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/wirtschaftlichkeit/amortisation>; 07.08.2011)

Zellen aus amorphem Silizium liegen bei etwas über einem Jahr. Des Weiteren schwankt der Wirkungsgrad verschiedener Module zwischen 9% und 18%. Einzelne Zellen im Forschungsstadium erreichen bereits 31%. Allerdings kommt es einerseits durch das Modulalter und andererseits durch Erwärmung zu einem deutlichen Leistungsabfall. Ein zusätzlicher Nachteil bei der Integration in Fassaden ist der nicht optimale Einstrahlungswinkel von rd. 30%. (Falk, 2009)

3.3 Nutzungspotenziale multifunktionaler PV-Elemente

Funktionen von PV in Gebäuden | Energiewandlung | Wärmedämmung | Abschattung | Schalldämmung
u.a.

Zusätzlich zur Stromproduktion können PV-Bauelemente eine Reihe von Funktionen erfüllen, welche sie von herkömmlichen Aufdach-Anlagen unterscheiden. Diese sind abhängig von der Einbausituation sowie den verwendeten Materialien.



Abb. 3.2: Zusatzfunktionen von PV-Bauelementen (Funtan Multielement II, 2010)

In der folgenden Arbeit wird der Fokus auf den thermischen Eigenschaften von PV-Elementen und deren Nutzen für die für die Wärmedämmung liegen. Der mehrlagige Aufbau eines PV-Moduls begünstigt die Dämmung durch die Luftschicht hinter der PV-Vorhangfassade oder Doppelfassade sowie durch die Strahlungsabsorption der Zellen. In Kombination mit herkömmlichen Dämmstoffen können verbesserte Wärmedämmwerte (U-Wert) erreicht werden.

4 Konstruktive Integration der PV

Konstruktive Integration | **PV + konventionelle Bauteile** | PV + vorgefertigte Bauteile | **multifunktionale Gesamtlösungen**

Es bestehen unterschiedliche bautechnische Lösungsansätze für den Einsatz von PV in Gebäude. Neben der kostengünstigsten Variante – Integration durch Addition des PV-Moduls auf bestehende Bauelemente – existiert wie im Folgenden beschrieben die Möglichkeit der konstruktiven Integration.

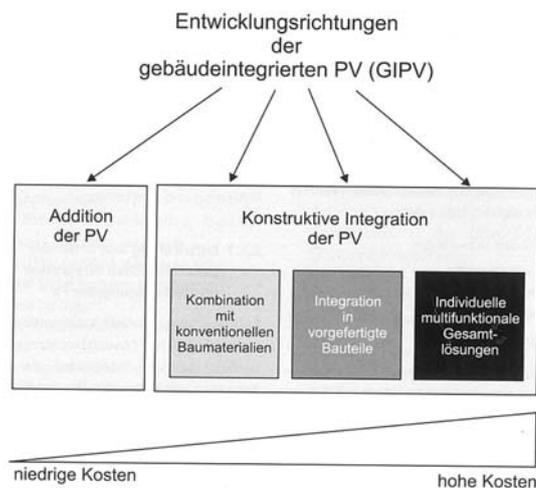


Abb. 4.1: Entwicklungsrichtungen der GIPV (Hagemann, 2002)

4.1 PV und konventionelle Baumaterialien

PV-Module werden in Form und Größe an modifizierte konventionelle Baumaterialien angepasst, um ein einheitliches Element zu erhalten. Das Einsatzgebiet dieser Entwicklungen konzentriert sich hauptsächlich auf Dachdeckungsmaterial wie Ziegel, Beton oder Faserzementschindel. Aus elektrotechnischer Sicht bringen die kleinteiligen Abmessungen bei der Zusammenschaltung allerdings Nachteile mit sich. Es existieren hingegen auch Lösungen, die sich von der Größenvorgabe konventioneller Dachdeckungs- und Wandverkleidungsmaterialien lösen. Größere PV-Module können z.B. durch Addition von Rahmenkonstruktionen konventionelle Materialien ergänzen oder ersetzen. Die Materialeinsparungen führen in weiterer Folge zu einer verbesserten

Ökobilanz und Gesamtkostenreduktion. Verkleidungsmaterialien mit integrierter PV lassen sich sowohl bei Neubauten als auch in der Sanierung einsetzen, haben allerdings den entscheidenden Nachteil, dass sie nur auf ebenen Flächen eingesetzt werden können. (<http://www.energytech.at>, 05.09.2011)

4.2 PV-Integration in vorgefertigte Bauteile

Der Trend PV-Systeme in großformatige vorgefertigte Bauteile fabrikseitig zu integrieren führt durch die Möglichkeit einer Massenproduktion sowohl zu einer Kostenreduktion als auch zu einer Verkürzung der Bauzeiten. Das Design in modularer Bauweise kann allerdings zu Konflikten an Übergängen und Kanten des Gebäudes führen. (Hagemann, 2002)

4.3 PV in multifunktionalen Gesamtlösungen

Multifunktionale Fassadenbauteile, welche komplexe und vielfältige Anforderungen erfüllen, rücken mehr und mehr in das Zentrum der Forschung. Die Erzeugung von Energie aus PV ist in diesem Konglomerat nur eine von vielen Funktionen, welche von den Komponenten der Gebäudehülle übernommen werden soll. Daher werden PV-Module mit multifunktionalen Eigenschaften entwickelt, wie z.B.

Sonnenschutzelemente oder Reflektoren zur Tageslichtmodulation.

Fassadensysteme der Zukunft werden in der Lage sein mittels Sensoren Umwelteinflüsse und Nutzeranforderungen wahrzunehmen und selbstständig auf diese zu reagieren. (Hagemann, 2002)

5 Einsatzfelder der PV am Gebäude

Einsatzfelder am Gebäude	Schrägdach	Flachdach	Oberlichter	Aussenwände	Sonnenschutz
--------------------------	------------	-----------	-------------	-------------	--------------

Unter Rücksichtnahme der Energieproduktion, gestalterischer und bautechnischer Anforderungen sind der Integration von PV in Gebäuden jeder Art keine Grenzen gesetzt. Die verschiedenen Integrationslösungen unterscheiden sich in Bezug auf Kosten, Komplexität, Planungsaufwand, Multifunktionalität und Zeitpunkt des Einsatzes (Neubau oder Sanierung). Diese Punkte sollten in der Planung unbedingt berücksichtigt werden. (Hagemann, 2002)

Grundsätzlich unterscheidet man folgende Einsatzfelder für die Integration von PV in Gebäuden:

Verwendung von PV-Bauelementen in Gebäuden			
Dach	Fassade	Verglasung	Sonnenschutz
<ul style="list-style-type: none"> ● Flachdach ● Schrägdach ● Sheddach 	<ul style="list-style-type: none"> ● Kaltfassaden ● Warmfassaden ● zusätzliche Gesattungselemente 	<ul style="list-style-type: none"> ● Überkopfverglasung ● Vertikale Verglasung ● Absturzsichernde Verglasung 	<ul style="list-style-type: none"> ● Starre Elemente ● Bewegliche Elemente ● Fensterläden ● Jalousien

Abb. 5.1: Einsatzmöglichkeiten von PV-Elementen in Gebäuden (Funtan Multielement I, 2010)

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Integration in Fassaden. Dabei unterscheidet Roberts folgende Möglichkeiten von Fassadensystemen (Roberts, 2009):

- „Verschattungselemente stellen die einfachste Möglichkeit zur Photovoltaikintegration dar, da es sich dabei im Wesentlichen um eine additive Konstruktion handelt, die eine Doppelfunktion erfüllen kann: Schutz vor übermäßiger solarer Erwärmung und Erzeugung von Strom.“
- „Vorgehängte hinterlüftete Fassaden kommen bei einer klassischen Bauweise zum Einsatz. Hier bilden Photovoltaik Elemente die äußere Schale.“

- „Eine Pfosten-Riegel-Fassade ist ein Typus einer leichten Vorhang-Fassade, die vor Ort montiert wird und somit ein Gerüst erforderlich macht. Solarmodule können sowohl die opaken als auch die transparenten Ausfachungen ersetzen.“
- „Elementfassaden sind ein anderer Typ von leichten Vorhangfassaden, zeichnen sich jedoch durch im Werk vorgefertigte Elemente aus, die ohne Gerüst installiert werden können. Werden typischerweise beim Hochhausbau verwendet.“
- „Doppelfassaden sind hochwertige Konstruktionen, die in verschiedensten Konfigurationen realisiert werden.“
- „Atrien und Überdachungen sind horizontale oder geneigte Oberflächen, die für die Integration von Photovoltaikmodulen genutzt werden können.“

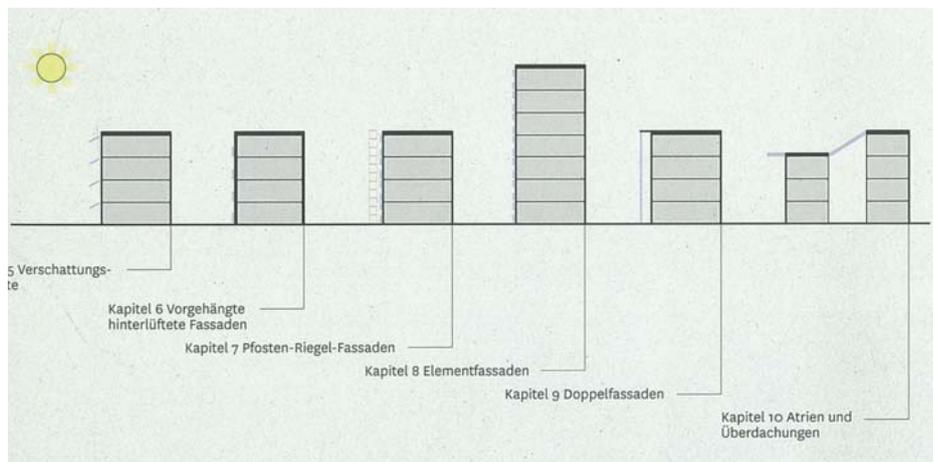


Abb. 5.2: Möglichkeiten zur Integration von PV (Roberts, 2009)

5.1 PV-Fassadenintegration in der Sanierung

Bauart	Neubau	neu errichtete Fassade	Sanierung	Sanierung historischer Gebäude
---------------	--------	------------------------	-----------	--------------------------------

Grundsätzlich muss bei der Integration von PV in Sanierungsfällen zwischen Vorhangfassaden und traditioneller Bauweise unterschieden werden. Bei einer Sanierung mit einer Vorhangfassade, wird die gesamte Fassade bis zum Rohbau abgetragen. Trotz der Bezeichnung Sanierung handelt es eigentlich um eine neu errichtete Fassade. In Abhängigkeit des Baujahres der Gebäude ergeben sich spezielle Anforderungen bei der Sanierung.

5.1.1 Wohnbauten aus der Gründerzeit

Eine geschlossene Bauweise als Blockrandbebauung ohne bevorzugte Orientierung ist ein typisches Merkmal von Gründerzeitbauten. Überdurchschnittliche Geschosshöhen und Haustiefen sowie Hinterhäuser und enge Hinterhöfe sind ebenfalls häufig. Die oftmals aufwendig gestalteten Straßenfassaden bieten mit ihrer kleinteiligen Gliederung eher Gelegenheit für PV-Anlagen als gestalterisches Motiv, während rückseitige Fassaden und Nebengebäude bei ausreichender Sonneneinstrahlung unterschiedliche Formen von PV-Anlagen zulassen. (Bendel, 2005)

Besonders bei historischen Gebäuden bleiben die Originalwände erhalten und sichtbar. Es kann lediglich eine äußere Glasschicht angebracht werden, welche der bestehenden Fassade Schutz bietet. Diese Ausführung entspricht einer neu errichteten Doppelfassade. Eine weitere Möglichkeit für Gebäude in traditioneller Bauweise ist die Sanierung mittels einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF), in welcher eine PV-Anlage integriert wird. Beide Lösungen werden im Anschluss näher beleuchtet. (Roberts 2009)

5.1.2 Wohnbauten der 20er und 30er Jahre

Kennzeichen für diese Bauten ist eine geschlossene Bauweise als Blockrandbebauung oder in Zeilen. Die Haustiefen und Geschosshöhen sind durch ihre Funktionen bestimmt. Die Strassenfassaden sind zwar mit zurückhaltenderen Applikationen ausgeführt als Gründerzeitbauten, dennoch setzten PV-Anlagen an der Strassenseite eine Neugestaltung der gesamten Fassade mit gestalterischem Motiv voraus. Für die Rückseite gilt selbiges wie für die Gründerzeitbauten. (Bendel, 2005)

5.1.3 Wohnbauten der 40er und 50er Jahre

Die Nachkriegszeit ist gekennzeichnet von Materialmangel und einfachen Gebäudeformen. Aufgrund der schlechten Gebäudesubstanz sind oftmals

energetische Sanierung notwendig, welche beispielsweise als vorgehängte hinterlüftete Fassade mit Dämmverbund ausgeführt werden kann. Die sparsame Gestaltung der Gebäude legt eine Neugestaltung mit PV nahe. (Bendel, 2005)

5.1.4 Wohnbauten der 60er und 70er Jahre

Mit dem zunehmenden Einsatz industrieller Herstellungsverfahren im Wohnungsbau wurden Großsiedlungen mit Hochhäusern, Gebäuden mittlerer Höhe und niedrigen verdichteten Einfamilienhausbereichen erreicht. *„Die Konzeption der Gebäude kommt durch die Betonung der Elementierung und der Rasterung sowie durch eine industrielle Herstellung der gestalterischen Integration von PV-Anlagen entgegen.“* (Bendel, 2005) Wintergärten und Balkone eignen sich bei entsprechender Orientierung hervorragend für die Integration von PV. Da die Betonfertigteile in Sandwichbauweise häufig bauphysikalisch unzureichend sind, gilt für die thermische Sanierung selbiges wie für die vorher genannten Gebäude. (Bendel, 2005)

Wie unter Punkt 5.1.1 erwähnt wird bei einer Sanierung in den meisten Fällen mit vorgehängten hinterlüfteten Fassaden oder mit Doppelfassaden gearbeitet. Beide Fassadentypen werden auch im Fallbeispiel verwendet.

Fassadensysteme	Verschattungselemente	VHF	Pfosten-Riegel-Fassade	Elementfassade	Doppelfassade	Atrien und Überdachungen
-----------------	-----------------------	-----	------------------------	----------------	---------------	--------------------------

5.2 Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)

Unter einer VHF versteht man die Anbringung einer hinterlüfteten Verkleidung auf ein neues oder bestehendes Gebäude in Form einer Doppelwandkonstruktion mit einer äußeren Witterungs-Schutzschicht und einer inneren Schicht, die als Wärmeschutz fungiert, übermäßigen Luftaustausche verhindert und Windlasten standhält. Die äußere Schicht atmet wie eine Haut, während die innere Energieverluste mindert. Die innere Schale wird mit einer dampfdichten Folie

abgedichtet, anschließend mit einer Wärmedämmung versehen und manchmal zusätzlich mit einer transfusionsoffenen Folie auf der kalten Seite der Wärmedämmung abgedichtet. Die äußere Schicht wird auch als Kaltfassade bezeichnet, da sie über keine Wärmedämmung verfügt. VHF werden an massiven Außenwänden aufgehängt und bestehen aus einer Unterkonstruktion und deren Verankerung. Die hinterlüftete Fassade bedeckt die Gebäudehülle mit opaken Elementen; diese eignen sich ohne Änderung der Konstruktionstechnik aufgrund der Kühlung der Module ebenfalls hervorragend für die Integration von PV. (Roberts, 2009)

Grundsätzlich sind alle plattenförmigen, hinterlüfteten Wandverkleidungen (Glas, Metall, Faserzement, Naturstein, Keramik oder Ziegelsysteme) für eine Kombination mit PV geeignet. Großflächige Verkleidungstafeln mit einer geringeren Anzahl von Befestigungspunkten führen zu Kosteneinsparungen für die gesamte Wandkonstruktion. Eine weitere Möglichkeit ist es die Module völlig getrennt von den Wärmedämmverbundsystemen auf eigenen Unterkonstruktionen zu installieren. Ein Durchdringen des Wärmedämmverbunds mit den Verankerungselementen ist allerdings dringend zu vermeiden. (Bendel, 2005)

Kontroverse Diskussionen gibt es zum Thema offene Fugen in der vorgehängten Außenwandverkleidung, um eindringende Feuchtigkeit und diffundierenden Wasserdampf zu kontrollieren. Bei höheren Gebäuden wurde untersucht, dass die Feuchtigkeit manchmal bis zum Dämmstoff durchdringen kann. Eine Alternative wäre eine wind- und regendichte Außenhaut wie in der Pfosten-/Riegel-Bauweise, welche allerdings einen negativen Einfluss auf die Hinterlüftung der Module und deren Wirkungsgrad hat. (Hagemann, 2002)

Bei den Befestigungssystemen unterscheidet (Hagemann,2002) folgende Möglichkeiten:

- Gerahmte PV-Module
- PV-Lamine
- PV-Verbundkonstruktionen

5.3 Doppelfassade

Doppelfassaden werden auch als „Haus-in-Haus-Prinzip“ bezeichnet und wurden in den 1970er Jahren zum ersten Mal eingesetzt, um die thermischen Eigenschaften von Gebäuden zu verbessern. Sie bestehen aus zwei Schichten. Die innere Schicht der Fassade ist dabei sichtbar von der äußeren Schicht getrennt. So entsteht eine ungeheizte thermische Pufferzone. Luft strömt mittels natürlicher oder mechanischer Belüftung durch den Zwischenraum und reduziert die Wärmelasten. Gegebenenfalls wird die Wärmeenergie, die sich in dem Fassadenzwischenraum bildet, nicht nur passiv, sondern auch aktiv genutzt. (Roberts, 2009) Im Winter wird die Luft im Zwischenraum durch die Sonneneinstrahlung erwärmt, wodurch eine Verbesserung der thermischen Eigenschaften der Fassade erreicht wird. Im Sommer wiederum können mittels natürlicher Lüftung (Nachtkühlung) Kosten für Gebäudeklimatisierung eingespart werden. (Rozynski, 2003)

Fassaden dieser Art werden üblicherweise bei mehrgeschossigen Gebäuden angebracht, welche eine hohe Sonneneinstrahlung verzeichnen. Die äußere Schale bietet eine perfekte Möglichkeit für die Integration von PV, da die Module als Sonnenschutz fungieren und gleichzeitig durch die Hinterlüftung effizienter arbeiten. In der Regel werden Verschattungselemente im Fassadenzwischenraum angebracht, um übermäßige solare Energieerträge oder Blendung zu vermeiden. (Roberts, 2009)

5.4 Lüftungssysteme

Lüftungssysteme	Hybridlüftung	natürliche Lüftung	mechanische Lüftung
-----------------	---------------	--------------------	---------------------

Bei einer hinterlüfteten Fassade ohne mechanische Lüftung beruht die Luftbewegung auf den von Wind und Kamineffekt verursachten Druckunterschieden, welche aufgrund des thermischen Auftriebs zwischen den Fassadenschichten entstehen. Kalte Luft dringt von unten ein, erwärmt sich, strömt nach oben und tritt auf einer höheren Ebene wieder aus. Das Gebäude steuert lediglich die Lüftungsklappen, die in die Öffnungen der beiden Gebäudeschichten eingebaut

sind. Der Kamineffekt und somit die Effektivität der natürlichen Lüftung kann mit folgendem Konstruktionsprinzip gesteigert werden: Hierbei wird der Zwischenraum in Kammern unterteilt. Am Fußpunkt der Kammern wird die Zuluft eingelassen und mittels Lüftungskanälen durch weitere Kammern geführt bevor sie den Fassadenzwischenraum wieder verlässt. (Roberts, 2009)

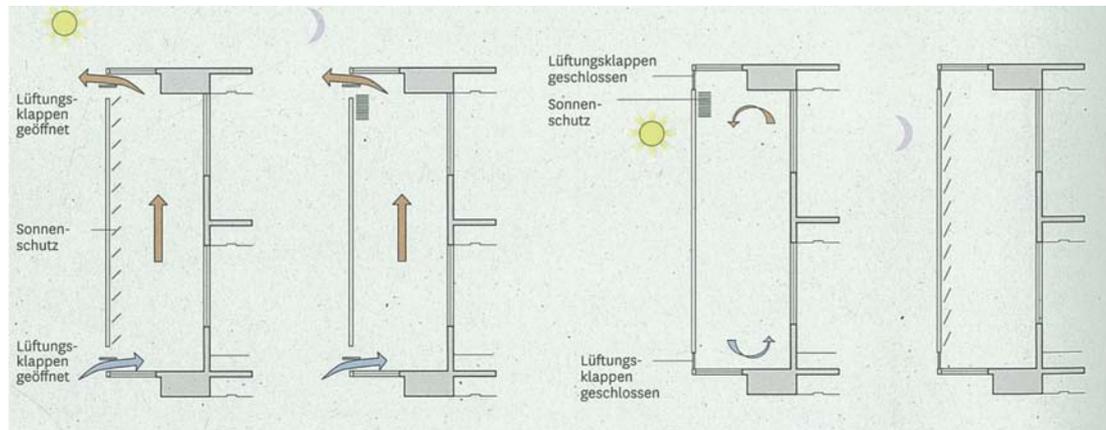


Abb. 5.3: Natürlich belüftete Fassade; Sommer (rechts) und Winter (links) (Roberts, 2009)

In einem typischen mitteleuropäischen Klima ist die Unterstützung von Ventilatoren im Zwischenraum meist nicht erforderlich, da im Sommer Außenluft zugeführt und wieder abgegeben wird, was sich kühlend auf die Verschattungselemente auswirkt. Im Winter hingegen werden die Lüftungsklappen geschlossen und der Fassadenzwischenraum dient als Pufferzone, die den Wärmedurchgang reduziert und somit die Wärmeverluste des Gebäudes mindert. (Roberts, 2009)

Bei einer Doppelfassaden-Konstruktion empfiehlt sich meist eine Hybridlüftung, welche die natürliche Lüftung im Sommer mit einer mechanischen Lüftung im Winter verbindet wie in den Abbildungen 5.4 und 5.5 dargestellt. (Roberts, 2009)

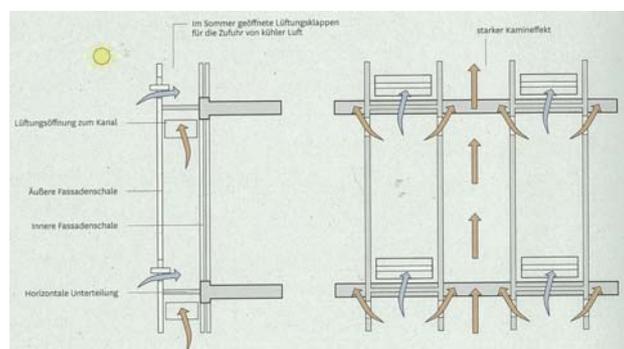


Abb. 5.4: Doppelfassade mit Lüftungskanälen; Querschnitt (links) und Vorderansicht (rechts) (Roberts, 2009)

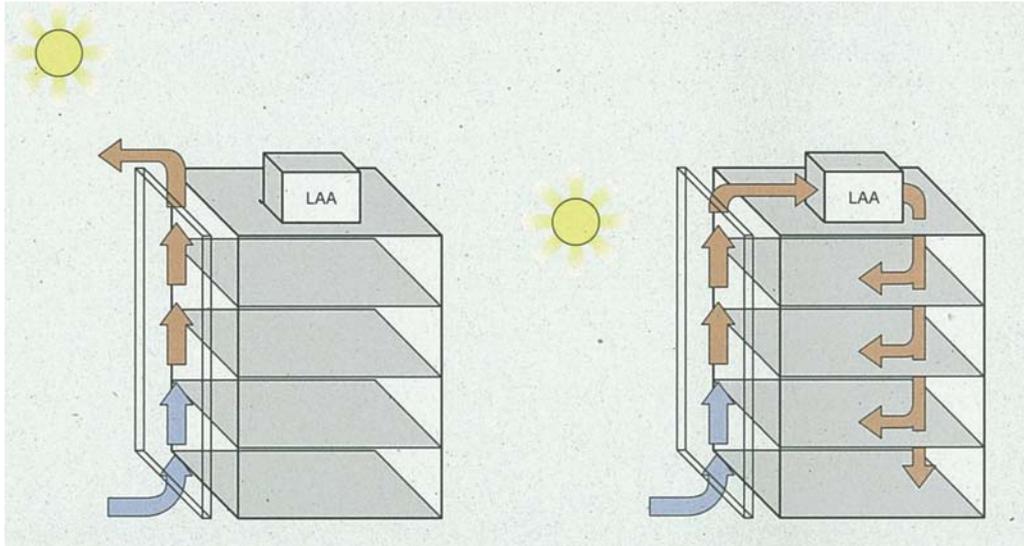


Abb. 5.5: Fassade mit Hybridlüftung; Sommer (links) und Winter (rechts) (Roberts, 2009)

5.5 Leistungsfähigkeit der beiden Fassadenebenen

Anbringung in Doppelfassade	Einfachverglasung aussen	Doppelverglasung aussen	Fassadenzwischenraum
-----------------------------	--------------------------	-------------------------	----------------------

Eine der beiden Fassadenebenen besteht meist aus einer Doppelverglasung mit beschichtetem Glas mit geringer Emissivität und ist daher in thermischer Hinsicht leistungsfähiger. Die zweite Schicht dient meist lediglich der Schaffung eines Luftzwischenraums. Die thermisch leistungsfähige Schicht ist beeinflusst vom Luftströmungskonzept des Gebäudes. Beim Kontakt der Innenraumluft und der kalten Außenschale besteht das Risiko der Kondenswasserbildung. Durch Integration von Photovoltaik und die damit verbundene Modulerwärmung kann dieses Risiko vermindert werden. (Roberts, 2009)

5.6 Weitere Konstruktionstypen für Glasfassaden

Fassadentyp	Kaltfassade mit PV	Warmfassade mit PV	Kalt-/Warm Fassade mit PV	Doppelfassade mit PV	Structural glazing Fassade
--------------------	--------------------	--------------------	---------------------------	----------------------	----------------------------

Neben der Doppelfassadenkonstruktion bestehen noch weitere Möglichkeiten zur Integration von PV in Glasfassaden. Man unterscheidet dabei zwischen folgenden Aufbauten:

5.6.1 Kaltfassade mit PV

Meist sind Bauten mit Kaltfassade in der Pfosten-Riegelbauweise ausgeführt und bestehen aus einer mehrschaligen hinterlüfteten Konstruktion. Die PV-Module sind in der dichten Aussenhaut integriert. Die Fassade ist in Brüstungs- und Fensterflächen geteilt. Ein klarer Vorteil sind kurze Bauzeiten. (Hagemann, 2002)

5.6.2 Warmfassade mit PV

Die Warmfassade übernimmt mit der geschlossenen Aussenhülle aus transparenten und opaken Fassadenflächen nicht nur die Funktion des Witterungsschutzes der Kaltfassade, sondern zusätzlich Funktionen wie Wärme- oder Schalldämmung. (Hagemann, 2002)

5.6.3 Kalt/Warm-Fassade mit PV

In der Kombination der beiden Typen sind die transparenten Fassadenteile als Warmkonstruktion ausgeführt und die opaken Fassadenteile entsprechen dem Aufbau einer Kaltfassade. (Hagemann, 2002)

5.6.4 Structural-Glazing-Fassade mit PV

Im Gegensatz zu den übrigen Konstruktionstypen besteht diese Fassade komplett aus Glas. Die Glasscheiben sind dabei entweder mit einem punktförmigen Halterungssystem oder mit geklebtem Rand mit einander verbunden. Für die Integration von PV steht ein Maximum der Fassadenfläche zur Verfügung.
(Hagemann, 2002)

6 Überblick über Photovoltaiksysteme

Der Photovoltaik Prozess beruht auf dem Zusammenschluss von Solarmodulen, welche aus mehreren Solarzellen bestehen und den photovoltaischen Effekt in Halbleitermaterialien wie Silizium ausnutzen. Durch die Absorption des einfallenden Lichts werden in Halbleitermaterialien Elektronen freigesetzt, welche den Fluss einer elektrischen Ladung durch das Material ermöglichen. Durch die kontrollierte Eindringung von Verunreinigungen (Dotierung mit Phosphor oder Bor) zwingt man die Elektronen in eine bestimmte Richtung. Mittels Metallgitter an der Ober- und Unterseite der Zellen kann der erzeugte Strom durch einen externen Stromkreis geleitet und nutzbar gemacht werden. Dieses Gitter ist immer ein Kompromiss zwischen Verschattungsverlusten durch Lichtreflexion und Leistungsverlusten durch elektrischen Widerstand. (Quatschnig, 2005)

Bei Wirkungsgraden in der Praxis von 5-20% wandelt sich das einfallende Licht zu 80% und mehr in Wärme um. (Roberts, 2009)

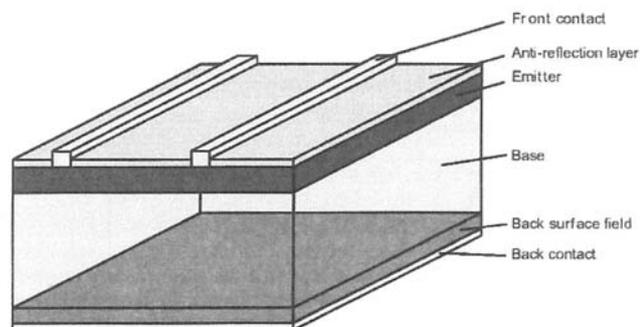


Abb. 6.1: Aufbau einer Solarzelle (Goetzberger, 2005)

6.1 Technische Modulooptionen für GIPV

PV-Technik	Polykristalline Zellen	Monokristalline Zellen	Dünnschicht Zellen	HIT-Zellen
------------	------------------------	------------------------	--------------------	------------

Monokristalline Zellen

Bei der Herstellung von monokristallinen Zellen wird ein Einkristallblock von einem Durchmesser von bis zu 15 cm in dünne Scheiben (0,2 – 0,4 mm) gesägt. Um Materialverlust zu verhindern können die Kristalle mittels EFG- (Edge-defined Film-fed Growth) Verfahren oder String Ribbon Prozess gezüchtet werden, bis sie die passende Größe haben. (Roberts, 2009)

Polykristalline Zellen

Polykristalline Zellen werden hingegen aus multikristallinem Silizium hergestellt. Das Ausgangsmaterial wird geschmolzen und beim Erstarren bilden sich Kristalle. Ähnlich wie bei der einkristallinen Herstellung werden dann dünne Wafer abgesägt. Polykristallines Silizium ist kostengünstiger, allerdings weist es auch einen geringeren Wirkungsgrad auf. (Kaltschmitt, 2009)

Dünnschicht Zellen

Für die Herstellung dieser Zellen werden extrem dünne Schichten von amorphen Silizium, Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) oder Cadmium-Tellurat (CdTe) auf ein Superstrat – das Frontglas oder ein Substrat - die Modulrückseite aufgedampft. Die Verbindung der Zellen erfolgt bereits im Fertigungsprozess. Durch die geringeren Temperatur bei der Herstellung und die Möglichkeit eines automatisierten Prozesses sowie dem geringeren Materialbedarf bieten sich enorme Kostenvorteile gegenüber kristallinen Zellen. Allerdings ist auch der Wirkungsgrad deutlich niedriger. Für die GIPV ist die Forschung in Richtung direkte Beschichtung von traditionellen Bauelementen von besonderem Interesse. (Kaltschmitt, 2009)

Hochleistungszellen

Zahlreiche Studien und Forschungsprojekte beschäftigen sich mit dem Thema PV-Zellen noch effizienter zu machen, um den Ressourcenverbrauch zu minimieren und die Zellen somit nicht nur kostengünstiger, sondern auch umweltfreundlicher zu machen. Eine der bereits etablierten Technologien nennt sich HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Es handelt sich hierbei um monokristalline Silizium-Wafer mit einer Beschichtung aus amorphen Silizium. Durch den Übergang zwischen zwei unterschiedlichen Halbleitern ist keine Dotierung mehr erforderlich. Die doppelseitigen Zellen werden in Glas-Glas-Lamine montiert und erzeugen somit mindestens 10% mehr Energie als herkömmliche Zellen. Sie eignen sich beispielsweise für den Einsatz an Lärmschutzwänden. In Gebäuden kann mit einem weißen Hintergrund die reflektierendes Licht und Umgebungslicht genutzt werden. (Roberts, 2009) Allerdings weist (Hagemann, 2002) darauf hin, dass durch Verschmutzung der äußeren Schicht der Energieertrag um bis zu 50% reduziert werden kann.

Tab. 6.1: Wirkungsgrade und Flächenbedarf verschiedener PV-Zellen (Roberts, 2009)

Typ	Wirkungsgrad des Moduls	Erforderliche Fläche
	%	m ² /kWp
HIT (High-performance Hybrid Silicon)	17-18	6-7
Monokristallines Silizium	12-15	7-9
Polykristallines Silizium	11-14	7-10
Dünnschicht-CIS	9-11	9-11
Dünnschicht-CdTe	6-8	12-17
Dünnschicht - amorphes Silizium	5-7	14-20

6.2 Gestalterische Modulooptionen für GIPV

Transparenz	semitransparent	transparent	nicht transparent
-------------	-----------------	-------------	-------------------

PV-Module stehen aufgrund ihrer Integration in die Fassadenhülle mit Farbe, Form, Struktur, Transparenz und Anordnung im Fokus des gestalterischen Interesses. Um die maximale Leistung der PV-Module zu nutzen, müssen sie in die äussere Fassadenschale integriert werden, welche bei einer Doppelfassade üblicherweise aus vollverglasten Elementen besteht. Beim Einsatz von GIPV in Doppelfassaden werden diese Elemente meist durch vorgefertigte, doppelte verglaste PV-Module ersetzt. Die beiden Schalen könnten aber auch separat als Pfosten-Riegel- oder Elementfassade gebaut werden. Die Module bilden die äussere Scheibe einer transparenten Doppelverglasung mit geringer Emissivität und Sonnenschutzbeschichtung oder anderer hochleistungsfähiger Beschichtungen.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin die Module als Verschattungselemente in den Fassadenzwischenraum einer Doppelfassade zu integrieren, um somit den Gebäudeinnenraum vor Sonneneinstrahlung zu schützen. Durch die Absorption erwärmen sich die Module allerdings und verlieren konsequenterweise an Leistungsfähigkeit. (Roberts, 2009)

Glas:

Die Glaseinheiten werden in der Regel aus thermisch vorgespanntem Glas zusammengebaut, um Glasbruch im Zuge eines thermischen Schocks zu vermeiden. Standardmodule sind meist mit einer EVA (Ethylenvinylacetat)-Verkapselung versehen, bestehend aus frontseitigen EVA-Laminat und einer dünnen Schicht lichtundurchlässigen Materials an der Rückseite. Alternativ kann aus Gründen der Transparenz auch Glas verwendet werden. Eine Doppelverglasung der PV-Module führt zusätzlich zu einer höheren Widerstandskraft gegen Wind- und Anpralllasten. (Roberts, 2009)

Größe, Form

Größe	100 x 100 mm	125 x 125 mm	150 x 150 mm	50 x 100 mm	u.a.
--------------	--------------	--------------	--------------	-------------	------

Form	runde Zellen	pseudosquare Zellen	quadratische Zellen	sechseckige Zellen	u.a.
-------------	--------------	---------------------	---------------------	--------------------	------

Die Form und Größe von kristallinen Zellen leitet sich direkt aus dem Produktionsprozess der Wafer ab und ist beliebig wählbar, solange sich die Form einer einzelnen Zelle aus überstumpfen Außenwinkeln ($>180^\circ$) zusammensetzt. Generell gilt je größer die Zellen, desto weniger Verschnitt und Verschaltungsaufwand bei maximaler Belegungsdichte der gewünschten Fläche. Bei amorphen Silizium-Modulen hingegen, welche als quasi endloses Band durch den Produktionsprozess geführt werden, wird das Trägermaterial auf flexiblen Folien aufgebracht und führt somit zu individuellen Gestaltungsmöglichkeiten in Form und Größe. (Hagemann, 2002)

Für opake Brüstungsfelder können opake oder semitransparente Verglasungen verwendet werden, in welche die PV-Module integriert sind. Bei Doppelverglasungen kann eine der Glasscheiben auch keramisch beschichtet oder lackiert werden. (Roberts, 2009)

Folienfarbe

Farbe	schwarz	blau	magenta	blaugrün	grün	u.a.
--------------	---------	------	---------	----------	------	------

Die Färbung einer Zelle wird durch die Strukturierung der Zellenoberfläche und die Dicke der Anti-Reflexionsschicht bestimmt. Glatte Oberflächen erzeugen stärkere Farben, bewirken allerdings gleichzeitig eine hohe Reflexion und damit verbundenen Leistungsverlust. Der Farbton durch eine Anti-Reflexions-Beschichtung aus Siliziumnitrat oder Titanoxid bestimmt. Es kann allerdings bei verschiedenen Farbtönen zu Leistungsabweichungen von bis zu 10% kommen.

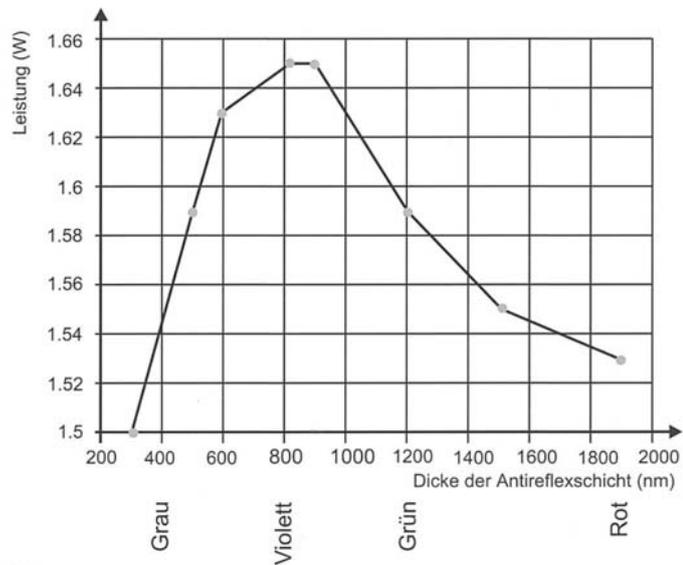


Abb. 6.2: Leistung einer kristallinen PV-Zelle in Abhängigkeit von der Dicke der Antireflexschicht gemessen unter S:T.C. (Hagemann, 2002)

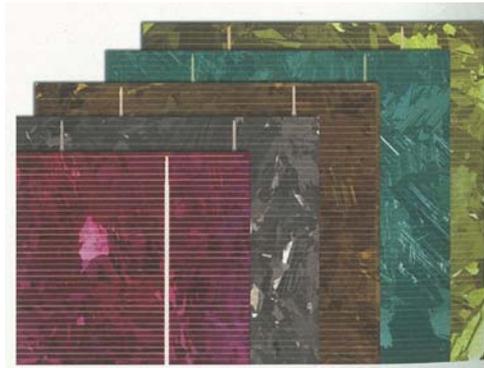


Abb. 6.3: Beispiele für Farbeffekte von PV-Modulen (Roberts, 2009)

Bei einer GIPV-Fassade kann aus optischen Gründen auf die AR-Beschichtung verzichtet werden, was einerseits zu Reflexionsverlusten von 3 auf 30 Prozent führt und andererseits die Zellen in einem natürlichen dunkelgrau erscheinen lässt. Bei jedem anderen Farbton sinkt der Wirkungsgrad ebenfalls um einige Prozentpunkte. (Roberts, 2009) Selbiges gilt für einen dunklen Modulhintergrund, da dieser sich stärker erhitzt.

Um den Wirkungsgrad zu verbessern, wird die gesamte Oberfläche der Zellen mit Aluminium beschichtet – welche bei Glas-Glas-Laminaten als schwarz glänzende Oberfläche sichtbar ist. (Kaltschmitt, 2009)

Baumaterialien		Metalle	
Weißer Gipskalkputz	93 %	Glänzende Aluminiumfolie	95 %
Polierter Marmor	40 bis 50 %	Poliertes Aluminium	85 %
Granit	45 %	Verwittertes Aluminium	47 %
Nadelholz	40 %	Kupferblech	36 %
Roter Dachziegel	30 bis 40 %	Verzinktes Eisenblech	10 bis 20 %
Roter Ziegelstein	30 bis 40 %		
Ungefärbter Beton	30 bis 40 %		
Schwarze Teerpappe	7 %		
Farbanstrich		Umgebung	
Weiß, glänzend	79 %	Neuschnee	75 bis 95 %
Hellgrau	60 %	Weißer Sand	55 %
Silber	75 %	Gras	20 bis 30 %
Hellgrün	53 %	Grauer Sand	18 %
Blau	49 %	Fels	16 %
Gelb	43 %	Wasser	3 bis 10 %
Orange	42 %		
Rot, leuchtend	35 %		
Braun	16 %		
Dunkelgrau	9 %		
Schwarz, glänzend	8 %		
Schwarz	5 %		

Abb. 6.4: Reflexionseigenschaften von Oberflächen (Hagemann, 2002)

Glasfarbe

Bei der Farbauswahl der Glasmodule können durch Beschichtung, Sandstrahlen, farbige Folien oder Siebdruckmuster unterschiedliche Akzente gesetzt werden. Die Beschichtung der äußeren Abdeckung der Solarmodule kann zu einer Leistungssteigerung oder zusätzlichen Eigenschaften führen. Entspiegeltes Glas beispielsweise erhöht die Lichttransmissionsrate. Edelmetallbeschichtungen hingegen filtern langwelliges Licht im Infrarotbereich, welches von den PV-Zellen nicht absorbiert wird, sondern nur in Wärme umgewandelt. In jedem Fall müssen die Beschichtungen kondenswasserbeständig sein und eine thermische Vorspannung des Glases zulassen. Die Siebdrucktechnik wird oftmals verwendet um die sichtbaren, aber nicht genutzten Flächen eines PV-Moduls (z.B. Zellenschwischenräume, Modulränder) zu gestalten. (Hagemann, 2002)

7 Rahmenbedingungen für PV und thermische Sanierung

Die Integration einer PV-Anlage in die Fassade im Zuge einer Sanierung bietet sich unter folgenden Bedingungen an:

- Es bestehen Beschädigungen der Fassade, die behoben werden müssen.
- Es besteht Verbesserungsbedarf bei der Leistung von Fassade
- Ein Gebäude soll für potentielle Mieter attraktiver werden.

Neben bautechnischen Anforderungen an die Gebäudehülle spielen sowohl das Solarpotenzial am Standort sowie potenzielle Effizienzverluste eine bedeutende Rolle bei der Integration von PV in die Fassade eines Gebäudes.

7.1 Standort und Leistung

Ausgangspunkt für die Bestimmung der elektrischen Leistung einer PV-Anlage sind die Einstrahlungsdaten an einem bestimmten Standort. Die Strahlungsenergie wird auf dem Weg durch die Atmosphäre durch Absorptions-, Streuungs- und Reflexionsvorgänge vermindert. Daher kommen nur etwa zwei Drittel der Strahlungsenergie auf der Erdoberfläche an. Diesen Strahlungsanteil bezeichnet man als Globalstrahlung. Sie besteht aus einem direkten und einem diffusen Strahlungsanteil, der sich aus der Himmels- und Reflexstrahlung zusammensetzt. (Roedel, 2000)

Das Solarenergieangebot variiert im Verlauf der Jahreszeiten. Bei höherem Sonnenstand im Sommer werden rund 5,5 kWh pro m² waagrecht Fläche eingestrahlt, im Winter hingegen sinkt dieser Wert bei Sonnenschein auf 0,8 kWh pro m². Dieser Umstand ergibt sich aus dem flachen Einfallswinkel der direkten Einstrahlung. (Frey, 1994)

7.2 Effizienzverluste

Weitere Schlüsselfaktoren zur Beurteilung der Eignung eines Gebäudes für die Integration von PV sind potenzielle Effizienzverluste in Verbindung mit Neigung und Orientierung sowie Verschattung, Hinterlüftung und Wechselrichterkonzept.

7.2.1 Auswirkung von Neigung und Orientierung

Ausrichtung	Nord	Nord/Ost	Ost oder West	Ost/Süd	Süd/West	Süden
--------------------	------	----------	---------------	---------	----------	-------

Neigung und Orientierung sind wichtige Parameter, um die Höhe der Globalstrahlung auf ein bestimmtes Gebäude zu bestimmen. Diese wird als Insolation bezeichnet. Es ist die Gesamtmenge an Lichtenergie, die bei einem bestimmten Winkel über einen bestimmten Zeitraum einfällt.

Die maximale Leistung wird bei einer Sonneneinstrahlung im rechten Winkel erzielt. Da die Sonne im Tages- und Jahresverlauf ständig ihre Position ändert, sollte mit dem gewählten Neigungswinkel ein optimaler Mittelwert erreicht werden. Die Sonne erreicht ihren Höchststand im Süden. Daher ist eine Orientierung nach Süden mit einer Neigung von 30° am besten geeignet. Grundsätzlich entspricht die optimale Neigung gegen die Horizontale dem Breitengrad minus ungefähr 20°. (Roberts, 2009)

Bei dieser Variante werden nicht nur die maximale Sonneneinstrahlung im Sommer berücksichtigt, sondern auch die Erträge durch die tiefstehende Wintersonne. Wie in der unten stehenden Grafik ersichtlich, ist bei einem flacheren Neigungswinkel der Module die Ausrichtung nach Süden sekundär. Bei

einem steileren Winkel wird die Abhängigkeit von der Neigung größer und der Winteranteil steigt. (Fechner TEIL I, 2009)

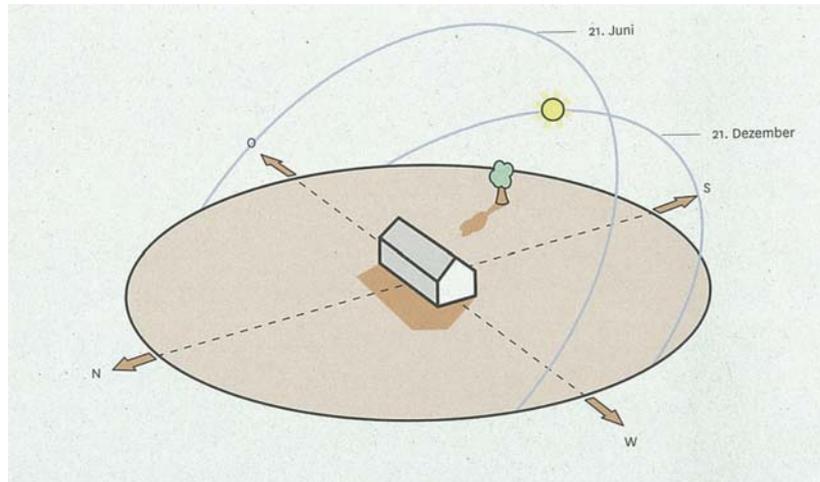


Abb. 7.3: Sonnenbahnen für Europa (Roberts, 2009)

Besteht aus bautechnischen Gründen oder wegen Verschattung nicht die Möglichkeit die Module nach Süden auszurichten, sollten diese wie in der unten stehenden Grafik beschrieben, nach Westen oder nach Osten ausgerichtet werden. Eine nach Süden orientierte Dachintegration ist aufgrund der höheren Erträge als positiver anzusehen als eine Fassadenintegration. Um die Planung zu vereinfachen kann ein Globalstrahlungsdiagramm für den Standort verwendet werden, welches man auf die verschiedenen Flächen eines Gebäudes übertragen kann. Das Gebäude im untenstehenden Beispiel verfügt auf den drei nach Süden orientierten Dachflächen über eine Maximalleistung über 90%. Man erkennt deutlich, dass eine vertikale Neigung der Module sich stärker auf die Leistung auswirkt, als eine Orientierung nach Süd/Osten oder Süd/Westen. (Roberts, 2009)

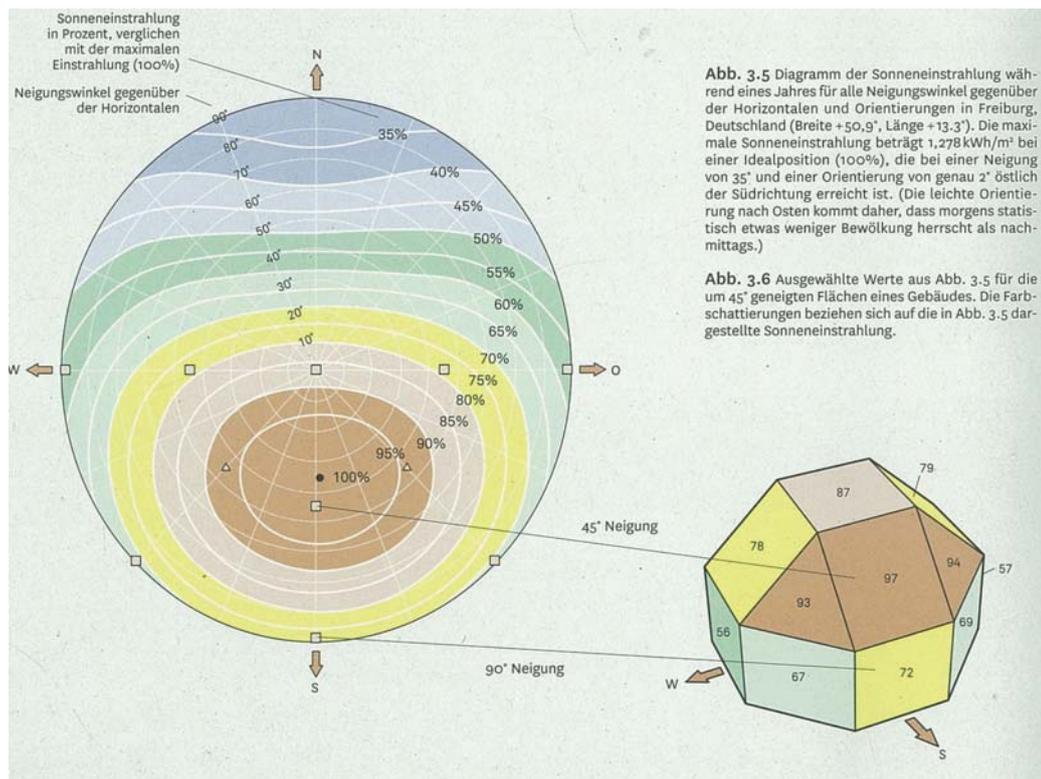


Abb. 7.4: Diagramm der Sonneneinstrahlung und Flächen eines Gebäudes (Roberts, 2009)

7.2.2 Auswirkung von Verschattung

Bereits geringe Verschattungen durch nebenstehende Gebäude, Vegetation oder Verschmutzungen können zu einem erheblichen Leistungsverlust der PV-Anlage führen oder im schlimmsten Fall zu einer Zerstörung der Module führen. Temporäre Verschattungen wie Verschmutzungen können die Leistung um 2-5% mindern, dauerhafte Nahverschattungen wie beispielsweise durch einen Hausvorsprung oder eine Antennen können Verlusten zwischen 60% und 80% hervorrufen. (Hagemann, 2002)

In der Planungsphase eines Neubaus sollte darauf geachtet werden, dass bei einem nach Süden orientierten Gebäude Hindernisse (z.B. Kamine, Lüftungsschächte) auf Dachanlagen im Norden angeordnet werden. Wenn Solarfelder in die Fassade integriert werden, sollten Treppenhäuser ebenfalls im Norden geplant werden. Bäume sollte im möglichst großen Abstand zur PV-Anlage gepflanzt werden. (Roberts, 2009)

7.2.3 Auswirkungen von Verschaltungen und Wechselrichterkonzepten

Wechselrichter Zentral WR String WR Multistring WR

Kann eine Verschattung nicht vermieden werden, sollte die preiswertere Variante der Reihenschaltung von mehreren Modulen vermieden werden, da es bei der Beeinträchtigung eines Moduls durch Verschattung sonst zu erheblichen Spannungserhöhung in den übrigen Modulen und damit verbundenen Leistungsverlusten kommt. (Fechner TEIL I, 2009)

Im Wechselrichterkonzept sollte berücksichtigt werden, dass immer das schlechteste Glied in der Kette die Leistung des Gesamtsystems bestimmt. Daher sind bei prognostizierten Verschattungen String-, Multistring- oder Modulwechselrichterkonzepte zu empfehlen, da somit auf die Verschattungen individuell eingegangen werden kann und sie das übrige System nicht belasten. (Fechner TEIL I, 2009)

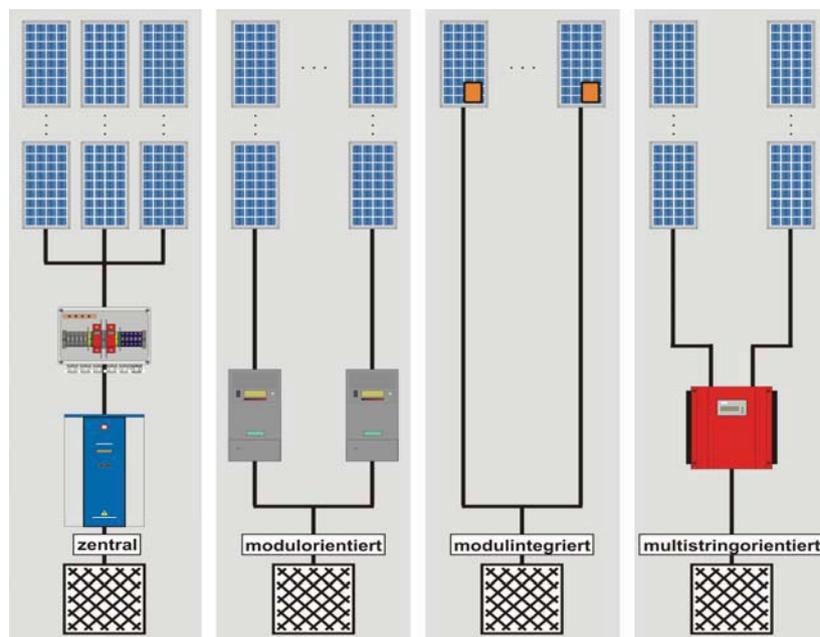


Abb. 7.5: Einsatzprinzipien von PV-Wechselrichtern (Bendel, 2008)

7.2.4 Auswirkung von Temperatureffekten und Hinterlüftung

Der Temperaturkoeffizient, die Abnahme des Wirkungsgrads bei steigender Temperatur, ist bei Dünnschichtzellen wesentlich geringer als bei herkömmlichen Modulen. Dieser Umstand bedingt unter anderem die höhere Leistung. Bei Erwärmung um einen Grad Celsius fällt der Wirkungsgrad bei kristallinen Zellen um 0,4% ab; bei Dünnschicht Modulen hingegen nur um 0,2%. (Fechner TEIL I, 2009)

Modulhersteller geben eine Nennbetriebstemperatur (NOCT) an, welche unter S.T.C. Bedingungen getestet wird. Die tatsächliche Temperatur des Moduls hängt von der Dämmung bzw. Hinterlüftung der Rückseite ab. (Kaltschmitt, 2009)

Aufgrund der geringeren Temperaturerhöhung ist die Leistungsreduktion bei Anlagen auf Freiflächen am geringsten. Im Gegensatz dazu steht die schlecht hinterlüftete Version der Fassadenintegration.

8 Materialien für PV-Bauelemente

Das gesamte PV-Bauelement wird je nach Herausforderung mit verschiedenen Baumaterialien kombiniert. Aufgrund der Transparenz und des Deckmaterials bei Standardmodulen, ist Glas eines der wichtigsten Materialien für Fassadenanwendungen.

Materialien der PV-Bauelemente			
Metall	Glas	Beton	Kunststoff
<ul style="list-style-type: none"> • Stahl-, Alu-, oder Zinkblech mit PV • Metallleichtbauelemente • Dach- und Fassadenelemente • Sandwichaufbau mit Wärmedämmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Isolierglaselemente mit PV für Pfosten-Riegel Konstruktionen • Punktförmig gelagerte Elemente • Fassaden- und Dachelemente 	<ul style="list-style-type: none"> • Betonfertigteil als Dachelement • Holz-Beton-Verbundkonstruktionen als Dachelemente • Verbund-Dachziegel 	<ul style="list-style-type: none"> • PV-Elemente mit Kunststoffrahmen (PUR) • Flexible Elemente, Einbettung in ETFE/PTFE

Abb. 8.1: Materialien für PV-Bauelemente (Futon, 2010)

9 Thermische Eigenschaften von Fassadenbaustoffen und-elementen

Im folgenden Kapitel werden die thermischen Eigenschaften verschiedener Fassadenbaustoffe näher beleuchtet. Glas als Vergleichsmaterial für PV wird dabei besonders hervorgehoben.

9.1 Wärmedämmung klassischer Dämmstoffe

Dämmstoffe	Hartschaum XPS	Schiefer	Stahl	Gipsfaserplatte	Glas
------------	----------------	----------	-------	-----------------	------

u.a.

Wie bereits erwähnt werden für Sanierungsprojekte meist vorgehängte hinterlüftete Fassaden oder Doppelfassaden errichtet. Für die Errichtung von Doppelfassaden wird meist Glas verwendet. Im Falle eines vorgehängten Fassadensystems kommen verschiedene Materialien für die Dämmung in Frage, welche im Folgenden mit Glas verglichen werden, um einen Anhaltspunkt für die Vergleichbarkeit mit GIPV zu schaffen.

Folgende Materialien wurden zum Vergleich ausgewählt -Dicke 24 mm

(<http://www.u-wert.net>, 11.09.2011):

- **Hartschaum XPS:** Dämmplatten aus extrudiertem Polystyrolschaum (Markennamen z.B. Styrodur). Sie sind im Vergleich zu EPS feinporiger, sehr druckfest und unempfindlich gegen Feuchtigkeit. XPS eignet sich gut als Perimeterdämmung, d.h. zur Dämmung von erdberührten Bauteilen.
- **Schiefer:** Guter Wärmeleiter und -speicher
- **Stahl:** Guter Wärmeleiter, in der Regel nicht rostfrei und muss deshalb behandelt, z.B. verzinkt, werden.
- **Isolierglas:** Zwei-Scheiben-Isolierglas, erstmals in den 60er Jahren eingesetzt. $U_G=2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- **Verbundglas:** Guter Wärmeleiter, praktisch diffusionsdicht.

Tab. 9.1: Thermische Eigenschaften verschiedener Baumaterialien (<http://www.u-wert.net>, 11.09.2011):

Material	Dichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeübergangswiderstand	Wärmeübergangswiderstand Bauteil
	kg/m ²	J/kgK	W/mK	m ² K/W	m ² K/W
Hartschaum XPS	35	1450	0,04	0,6	0,86
Schiefer	2400	760	2,2	0,011	0,271
Stahl	7850	470	50	0	0,26
Gipsfaserplatte	1150	1100	0,32	0,075	0,335
Verbundglas	2500	500	0,76	0,008	0,292
Isolierglas	1400	840	0,075	0,203	0,447

Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

Dichte: Je geringer die Dichte eines Materials, desto höher ist der Wärmedämmwert. Stahl hat zwar die höchste Dichte, ist aber auch ein guter Wärmeleiter und daher für die Dämmung nicht geeignet. Im Gegensatz dazu steht XPS. Glas befindet sich im Mittelfeld.

Spez. Wärmekapazität: Diese Kennzahl gibt an wie viel Wärme ein Stoff je kg bei einer Temperaturveränderung von 1 K aufnehmen kann und steht wiederum im engen Zusammenhang mit der Wärmeleitfähigkeit. Gipsfaserplatten und XPS eignen sich aus dieser Sicht am besten.

Wärmeleitfähigkeit: Ein niedriger U-Wert kann auch bei einer hohen Wärmeleitfähigkeit erreicht werden, wenn ein Stoff genügend dick ist. Im Gegensatz dazu kann allerdings ein Stoff mit großer Dicke und geringer Wärmeleitfähigkeit zu einem hohen U-Wert führen. Stahl, Schiefer und Glas sind gute Leiter.

Wärmeübergangswiderstand: Dabei handelt es sich um den Widerstand den ein Bauteil der Wärmeleitung entgegenstellt. XPS und Isolierglas sind dabei im Vorteil, wobei XPS einen fast doppelt so hohen Wert für das gesamte Bauteil aufweist wie Glas.

Tab. 9.2: Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile - 24 mm Dicke (<http://www.u-wert.net>, 11.09.2011):

Material	Wärmespeicherfähigkeit Bauteil	Wärmespeicherfähigkeit Bauteil
	kJ/m ² K	kWh/m ² K
Hartschaum XPS	0,6	0,000
Schiefer	22,0	0,006
Stahl	44,0	0,012
Gipsfaserplatte	15,4	0,004
Verbundglas	25,0	0,007
Isolierglas	8,5	0,002

Wärmespeicherfähigkeit : Die Wärmespeicherfähigkeit ist besonders wichtig für den sommerlichen Wärmeschutz und drückt aus wie viel Wärmeenergie ein kg aufnehmen muss, um seine Temperatur um ein K zu erhöhen. Diese Kennzahl steht in direktem Zusammenhang mit der Dichte eines Dämmstoffs. (Frey, 1994)

Generell ist ein hoher Wert besser, um einen besserer Puffer gegen hohe Temperaturen zu erhalten. Dies gilt allerdings wiederum nur für Stoffe mit geringer Wärmeleitfähigkeit. Polyester, wie XPS, haben eine geringe Wärmespeicherfähigkeit, wohingegen Stahl und Verbundglas einen hohen Wert aufweisen.

Der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) ist ein Maß für die thermische Qualität eines Bauteils und gibt den Durchgang der Wärme durch einen Quadratmeter eines Bauteils bei einer Temperaturdifferenz von 1 K an. (Misara, 2011)

Der U-Wert basiert auf den einzelnen Wärmewiderständen und berechnet sich wie folgt:

$$R = h_i + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + h_e$$

Der Wärmewiderstand R berechnet sich aus der Summe der Widerstände der einzelnen Bauteile und der Wärmeübergangskoeffizienten h_i und h_e (horizontal: 0,13 m²K/W innen und 0,04 m²K/W aussen). (ÖNORM EN ISO 6946)

Aus dem Kehrwert von R ergibt sich der U-Wert. Es zeigt sich, dass Isolierglas sich weit besser für die Wärmedämmung eignet als Verbundglas.

$$U = \frac{1}{R}$$

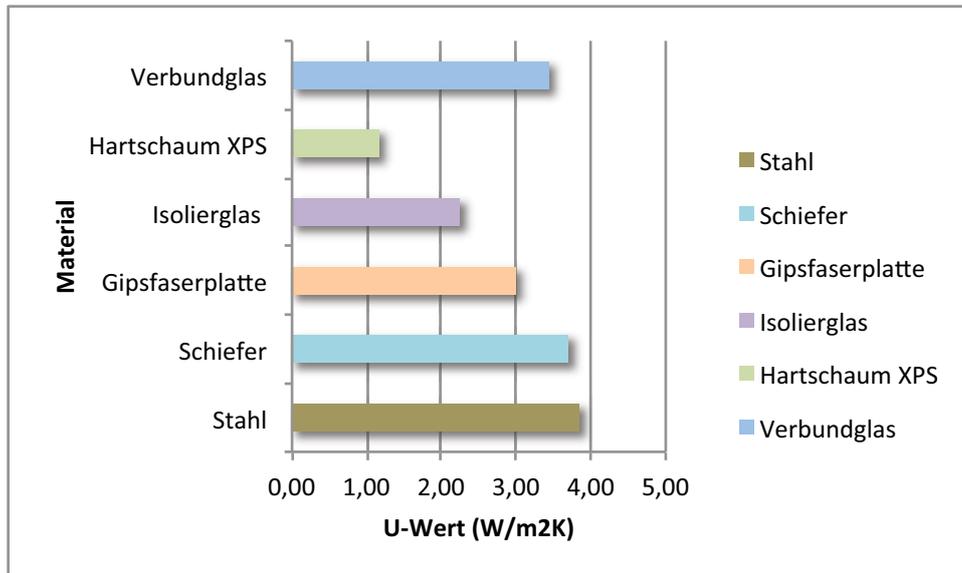


Abb.9.1: U-Werte verschiedener Materialien für Fassadenbau

9.2 Mögliche Schichtaufbauten mit Verbundglas/Isolierglas zur thermischen Optimierung

Ausgehend von den Grundeinheit für kristalline PV-Zellen bestehen zwei Möglichkeiten der Erweiterung, um einen zusätzlichen Wärmeschutz zu erreichen (Hagemann, 2002).

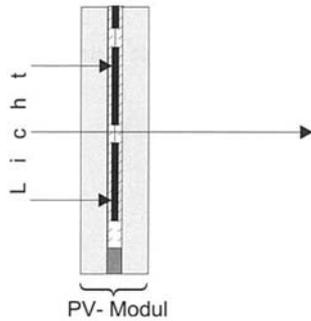


Abb. 9.2: Grundeinheit mit kristallinen PV-Zellen (Hagemann, 2002)

- Max. Größe: 2,1m x 3,2m
- Dicke: 10-18mm
- Gewicht: 22 kg/m² – ca. 40 kg/m²

Eigenschaften:

- Semitransparent
- Höheres Modulgewicht
- Kombination mit versch. Funktionsgläsern möglich
- Optional: versch. Hintergrundfarben der PV-Zellen

<p style="text-align: center;">L i c h t</p> <p style="text-align: center;">PV-Modul Grundeinheit PVB-Folie mit zusätzlicher Glasscheibe</p> <p style="text-align: center;">Abb. 9.3: PV-Modul mit Verbundglas (Hagemann, 2002)</p>	<p style="text-align: center;">L i c h t</p> <p style="text-align: center;">PV-Module Grundeinheit Isolierglas Erweiterung</p> <p style="text-align: center;">Abb. 9.4: PV-Modul mit Isolierglas (Hagemann, 2002)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Weißglas (Floatglas, ESG, TVG) • Mono- und polykristalline Zellen mit Randverschaltung, eingebettet in transparentem Gießharz • Floatglas, ESG oder TVG + PVB Folie + Floatglas oder TVG 	<ul style="list-style-type: none"> • Weißglas (Floatglas, ESG, TVG) • Mono- und polykristalline Zellen mit Randverschaltung, eingebettet in transparentem Gießharz • Floatglas, ESG oder TVG + Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung + low -E-Beschichtung + Floatglas (ESG)

Verbundglas ist für die Verbindung mit PV grundsätzlich besser geeignet als Isolierglas, da sich zweiteres bei intensiver Sonneneinstrahlung stärker erwärmen und somit der erzielte spezifische Jahresertrag aufgrund der auftretenden Verluste geringer werden kann. (Krawietz, 2003)

Der Zwischenraum hinter den PV-Modulen muss entwässert werden, druckausgleichend sein und mit Wärmedämmung und Dampfsperre abgeschlossen sein. (Roberts, 2009)

9.3 Wärmedämmung und Energieertrag transparenter Bauteile sowie Dämmverbund in Verbindung mit PV

Wie bereits eingangs erwähnt können multifunktionale PV-Elemente sowohl in der Fassade als auch im Dach neben der Stromerzeugung auch zur Wärmedämmung herangezogen werden. Dabei spielen die thermischen Eigenschaften der Module eine wichtige Rolle, welche bis dato oft vernachlässigt wurden. Bei herkömmlichen Annahmen hat man in der Vergangenheit bei gebäudeintegrierten PV-Modulen auf Werte für Glas bezüglich g-Wert und U-Wert zurückgegriffen. Diese Vorgehensweise hat die Nutzungspotenziale von GIPV eingeschränkt.

Das Fraunhofer IWES (Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik) hat sich erstmals 2008 mit diesem Thema im Rahmen des Projekts „Multielement“ auseinandergesetzt.

Im Rahmen des Projekts wurden thermische Eigenschaften wie Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) und Wärmedurchlassgrad (g-Wert) von multifunktionalen PV-Elementen in der Verbindung mit Glas, wie in Abbildung 9.5 ersichtlich, und Dämmverbund untersucht.

- Verbundglas
- Isolierglas (Glas-Glas-Zwischenraum-Glas)
- Dämmverbund (Glas-Glas-Dämmung)

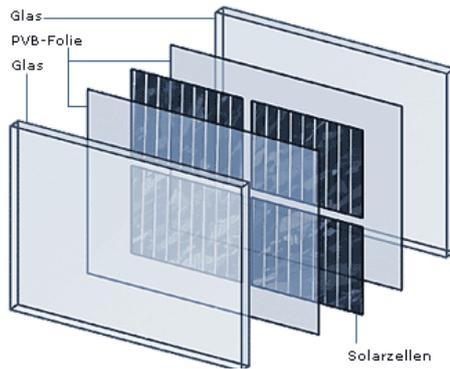


Abb. 9.5: VSG Solarmodul (Bad Staffelstein, 2007)

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt ergeben die Wärmedurchlasskoeffizienten der einzelnen Schichten (h_t) sowie der innere und äußere Wärmeübergangskoeffizient (h_i , h_e) zusammen den U-Wert.

$$U = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t}$$

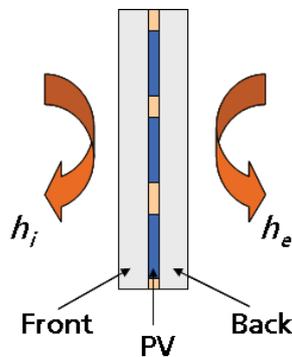


Abb. 9.6: Darstellung der thermischen Kenngröße U-Wert (Misara, 2011)

„Der g-Wert ist der Gesamtenergiedurchlassgrad eines transparenten Bauteils. Dieser setzt sich zusammen aus der direkten Transmission durch Sonneneinstrahlung (τ_e) und der inneren sekundären Wärmeabgabe (q_i), die in den Innenraum emittiert wird.“ (Misara, 2011)

Die g-Werte für Verbundglas und Isolierglas wurden aus dem Leitfaden für EnergieberaterInnen (Datenblätter) entnommen und betragen für Verbundglas bei einem (2-4 cm Scheibenabstand) 0,79 und für Isolierglas (1,2 cm Scheibenabstand)

0,64. Da sich der g-wert nur auf transparente Bauteile bezieht, ist dieser bei Dämmverbund gleich null. Um die sekundäre Wärmeabgabe (q_i) nach Innen zu berechnen benötigt man den Absorptionsgrad (%) der verschiedenen Materialien (Misara, 2011):

- Verbundglas: 0,13
- Isolierglas: 0,24
- Dämmverbund: 0,92

$$q_i = \alpha_e \times \frac{h_i}{h_i + h_e}$$

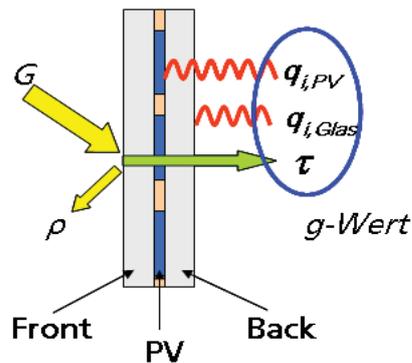


Abb. 9.7: Darstellung der thermischen Kenngröße g-Wert (Misara, 2011)

Ein weiterer interessanter Punkt ist der Abminderungsfaktor F_c . Er ergibt sich aus dem Verhältnis des g- Werts der Sonnenschutzeinrichtung zu dem g-Wert der unverschatteten Verglasung und berechnet sich folgendermaßen (Misara, 2011):

$$F_c = \frac{g_{total}}{g_{Glas}}$$

9.3.1 Zellen- und Betriebstemperaturen unterschiedlicher Bauelemente

Aus den Berechnungen des IWES ergaben sich Zelltemperaturunterschiede von ca. 8-10°C im Winter und 18-30°C im Sommer. Der geringe Unterschied im Winter ergibt sich aus dem überwiegenden Einfluss der Umgebungstemperatur.

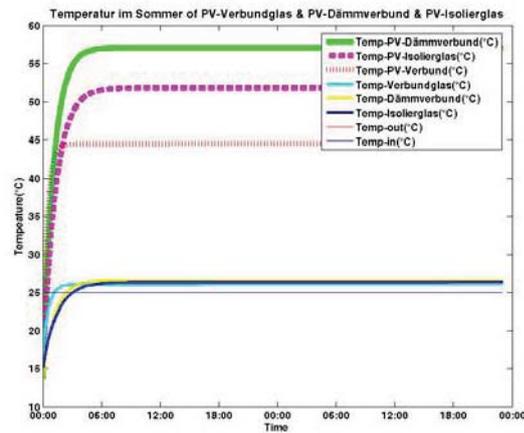


Abb. 9.8: Zellen-/Betriebstemperatur der PV-Bauelemente im Vergleich mit konventionellen Bauprodukten im Sommer (Misara, 2011)

Der innere Wärmeübergangskoeffizient ist bei Bauelemente mit PV im Winter 7-12% tiefer und im Sommer 17-39% höher als ohne PV. Je besser die Wärmedämmung desto kleiner der Unterschied. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient liegt aufgrund der hohen Windgeschwindigkeit einheitlich deutlich höher als im Sommer. Allgemein gilt: Je höher die Betriebstemperatur, desto höher die prozentualen Veränderungen. Wie in der Tabelle unten ersichtlich ist der Wärmedurchlasswiderstand nur im Fall von Isolierglas relevant (5% im Winter und 12% m Sommer), da der Transport der Wärme im Zwischenraum mit steigender Temperatur erhöht wird. (Misara, 2011)

Tab. 9.3: Aussen – und Innentemperaturen der Module (Misara, 2011)

		Verbundglas	PV-Verbundglas	Differenz	ISO-Glas	PV-ISO-Glas	Differenz	Dämmverbund	PV-Dämmverbund	Differenz
Zellen/Betriebstemperatur (°C)	Winter	9,37	17,43	8,06	7,31	17,46	10,15	5,76	16,66	10,9
	Sommer	26,08	44,46	18,38	26,35	51,84	25,49	26,66	57,09	30,43
hi (W/m2K)	Winter	7,99	7,01	-12,27%	7,47	6,61	-11,51%	8,40	5,94	-7,19%
	Sommer	6,91	9,59	38,78%	6,67	8,84	32,53%	8,06	7,07	16,67%
he (W/m2K)	Winter	23,5	23,58	0,34%	23,48	23,58	0,43%	23,47	23,57	0,43%
	Sommer	12,27	13,01	6,03%	12,28	13,30	8,31%	12,29	13,51	9,93%
hs (m2K/W)	Winter	0,0075	0,0075	0,00%	0,2030	0,1920	-5,42%	3,0379	3,0379	0,00%
	Sommer	0,0075	0,0075	0,00%	0,1810	0,1590	-12,15%	3,0379	3,0379	0,00%

Daraus ergeben sich realistische U-Werte und g-Werte für die untersuchten Bauteile im Vergleich zu herkömmlichen normativen Kenngrößen der Hersteller (h_i und $h_e = 8$ und $23 \text{ W/m}^2\text{K}$). Je schlechter der Dämmstandard des konventionellen Bauprodukts, desto mehr sinkt der U-Wert im Winter (bis zu 9% bei Verbundglas). Ebenso ist der g-Wert des PV-Elements im Winter schlechter als mit den vorgegebenen Kenngrößen (-11% bei PV-Verbundglas und -15% bei Isolierglas). Der Abminderungsfaktor (Fc-Wert) zeigt im Sommer ebenfalls eine Verminderung (+61% für Verbundglas und + 50% für Isolierglas). Tendenziell zeigt sich, dass ein dickerer Aufbau des PV-Elements zu einem schlechteren g-Wert und einem besseren Fc-Wert führt. (Misara, 2011)

9.4 Temperaturmodell für PV-Module

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben ist die Zelltemperatur, neben Randbedingungen für die Integration von PV in die Gebäudehülle, wie etwa schlechte Hinterlüftung oder nicht optimale Einstrahlungswinkel, ein entscheidender Faktor für den Energieertrag der Zellen. Daher hat das IWES ein Temperaturmodell für multifunktionale PV-Bauelemente entwickelt, womit g-Wert und Wärmerückgewinnung berücksichtigt werden können.

Für die Beurteilung der Modultemperatur wurde bisher die NOCT (Nominal operating cell temperature) herangezogen, welche allerdings von einer identischen Umgebungstemperatur an der Vorder- und Rückseite des Moduls sowie eines konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten ausgeht. (DIN EN 61215)

In einer Versuchsreihe des IWES wurde nachgewiesen, dass dies ist allerdings nur für den Standardmodulaufbau Glas/Glas und Glas/Tedlar¹ verwendet werden kann. Bei einem Modulaufbau mit anderen Dämmstoffen wie bei Glas/Glas/XPS (Polystyrolextruderschaum)² eignet es sich hingegen nicht. PV-Module geben Wärme ab und verändern zusätzlich die Temperatur der Vorder- und Rückseite im Verlauf der Jahreszeiten. Im Winter ist die Aussenseite kühler; im Sommer hingegen die Innenseite. Die NOCT bezieht sich in der Literatur auf folgende Bedingungen:

¹ Tedlar = Schutzschicht auf der Rückseite eines PV-Moduls bestehend aus Polyvinylfluorid. Wird auch als „Back-Sheet“ bezeichnet.

² Annahmen: Dämmstoff 50 mm Dicke; Wärmeübergangskoeffizient $h_{f,b} = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$ aus (DIN EN 673, 2002)

„Diese Temperatur wird als die mittlere Temperatur des PV-Moduls für Außenaufstellung bei den SOC Referenzumgebungsbedingungen (Standard Operating Conditions - Bestrahlungsstärke 800W/m2, Umgebungstemperatur von 20 °C, Leerlaufbetrieb, 45° Neigungswinkel für Außenaufstellung und Windgeschwindigkeit 1m/s) definiert.“ (Henze, 2010)

Die Temperatur der Solarzellen wird nach herkömmlichen Verfahren durch folgende Gleichung ermittelt (Henze, 2010):

$$T_m = T_{umg} + \left(\frac{G_t}{G_{NOCT}} \right) \cdot \frac{U_{L,NOCT}}{U_L} \cdot (T_{NOCT} - T_{Umgebung,NOCT}) \cdot \left[1 - \left(\frac{\mu}{\tau \alpha} \right) \right]$$

Die Energiebilanz eines GIPV-Bauelements berücksichtigt Energieeintrag und Energieabgabe und fungierte als Ausgangsbasis für das neue Temperaturmodell, welches beispielsweise auf Glas/Glas/XPS (Polystyrolextruderschaum)-Module anwendbar ist. Als Energieeintrag bezeichnet man die Strahlung, welche durch das Frontglas transmittiert bzw. von ihm reflektiert wird. Die Energieabgabe ist die Umwandlung der Einstrahlung in Strom und Wärme, welche wiederum Einfluss auf Temperatur und Leistung der Zelle hat. Der Zusammenhang wird im Folgenden bildlich dargestellt (Götzberger, 2005):

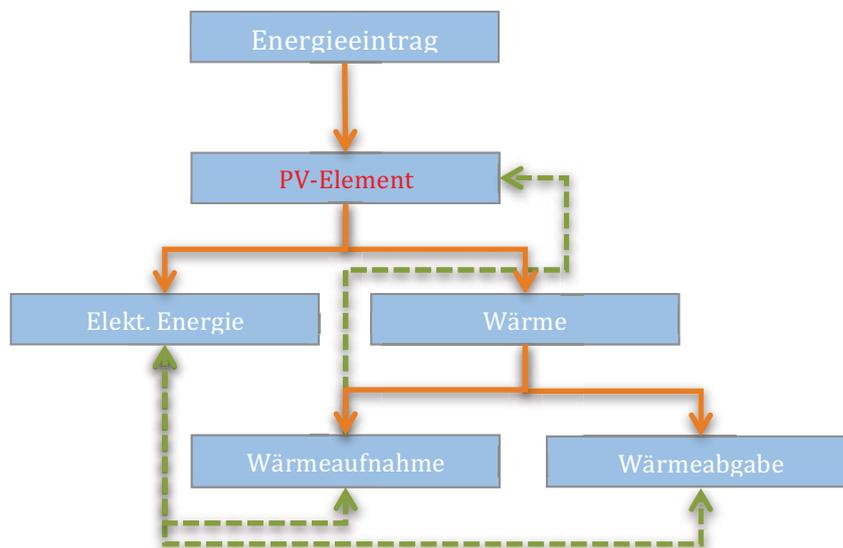


Abb. 9.9: Zusammenhang zwischen Energieeintrag und Leistung eines PV- Moduls

Daher müssen die eingebetteten Solarzellen bei der sekundären Wärmeabgabe berücksichtigt werden, um ein PV-Element korrekt zu beschreiben.

Unter Berücksichtigung der Temperaturunterschiede an Vorder- und Rückseite hat das IWES folgende Gleichungen für die drei Ebenen eines PV-Moduls entwickelt (Henze, 2010):

Ebene I (Vorderseite)

$$G \cdot A = [(\gamma_f G) + (\alpha_f G) + (\tau_f G)] \cdot A$$

Ebene II (PV-Modul)

$$(\tau_f G) \cdot A = \alpha_{PV} (\tau_f G) \cdot A + \tau_{PV} (\tau_f G) \cdot A$$

$$\alpha_{PV} (\tau_f G) \cdot A = (P_{el\text{ek}} + P_{th\text{erm}})$$

$$P_{el\text{ek}} = [\eta \cdot (1 - \alpha_{\text{cosff}} \cdot (T_M - T_{STC})) \cdot (\tau_f G) \cdot A]$$

$$P_{th\text{erm}} = \left[\sum_j^{f,b} U_j \cdot (T_M - T_j) \cdot A \right] + \left[C_M \left(\frac{\Delta T_M}{\Delta t} \right) \right]$$

$$\frac{1}{U_j} = \frac{1}{h_j} + \frac{d_j}{\lambda_j}; j = f, b$$

Ebene III (Hinterseite)

$$\tau_{PV} (\tau_f G) A = \alpha_b \tau_{PV} (\tau_f G) A + \tau_b \tau_{PV} (\tau_f G) A$$

Die eingestrahelte Leistung $G \cdot A$ auf Ebene I setzt sich zusammen aus einem reflektierten, einem absorbierten und einem transmittierten Anteil. Der auf die Ebenen II und III transmittierte Anteil setzt sich dann folgendermaßen fort:

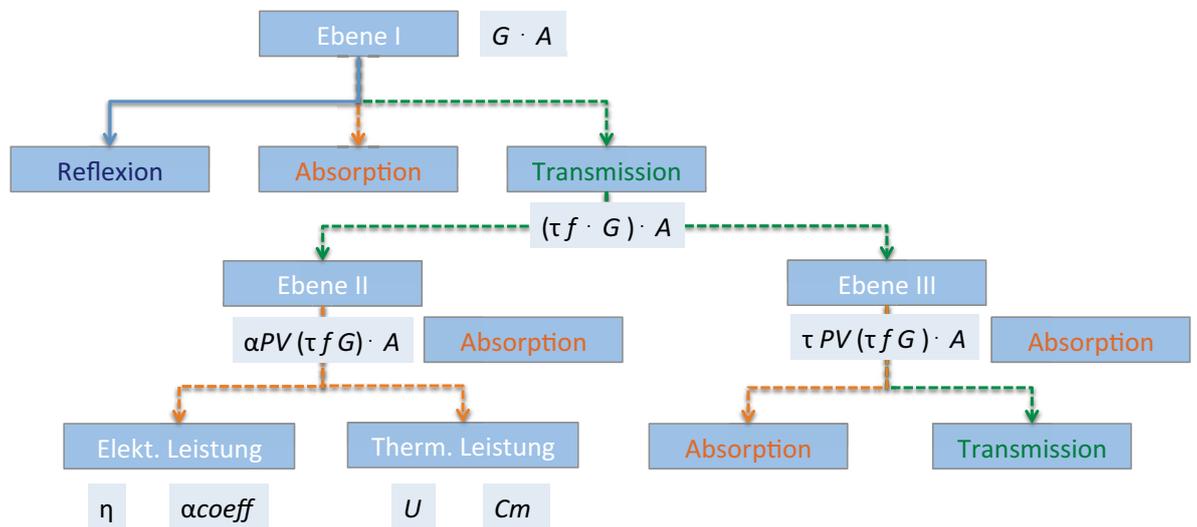


Abb. 9.10: Bildliche Darstellung der Umwandlungen der eingestrahelten Leistungen in den drei Ebenen eines PV-Moduls

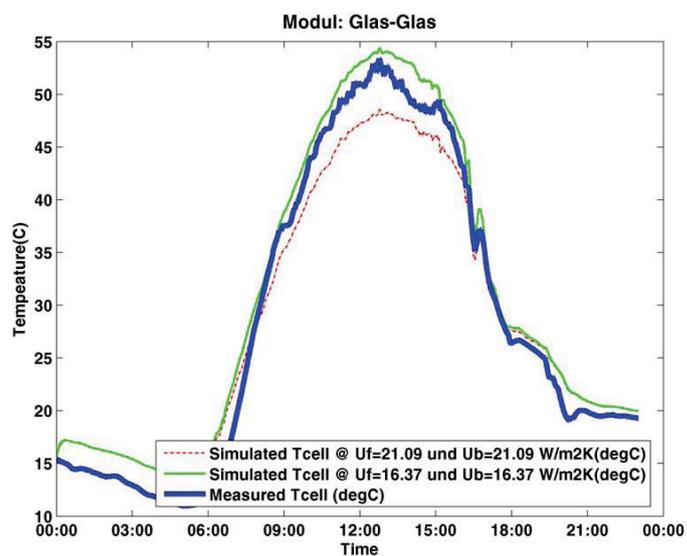


Abb. 9.11: Validierung des PV-Moduls Glas-Glas (Henze, 2010)

Anhand der Messreihe für das Glas/Glas Modul kann man erkennen, dass der Wärmedurchgangskoeffizient U_j der Vorder- und Rückseite individuell verändert

werden muss, um den Temperaturunterschieden gerecht zu werden. Der konstante Wärmedurchlasswiderstand lässt allerdings nur eine Korrektur des Wärmeübergangskoeffizienten h_j zu. Der Wärmeübergangskoeffizient wird in herkömmlichen Verfahren von der Norm DIN EN 673 übernommen. Dieser ist allerdings nicht für GIPV-Module geeignet, da er abhängig ist von Temperatur, Modulgröße und Umgebungstemperatur. Daraus ergeben sich folgende Werte, welche als Richtwerte für das thermische Verhalten zu verstehen sind (Henze, 2010):

- Glas/Tedlar: $16,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Glas/Glas: $17,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Glas/Glas/XPS: $20,0 \text{ W/m}^2\text{K}$

Anhand der IWES Studie ist ersichtlich, dass thermische Eigenschaften bei den unterschiedlichen Aufbauten eines GIPV-Moduls eine zentrale Rolle spielen und eine Auswirkung auf die Wärmekapazität des PV-Bauelements haben, wodurch zeitliche Verschiebungen in Bezug auf die Zelltemperatur in die Berechnungen miteinbezogen werden müssen.

10 Fallbeispiel: Sanierung Drei- Familien-Haus in Herzogenburg

Anhand des Beispiels eines sanierungsbedürftigen Drei-Familien-Hauses in Herzogenburg soll veranschaulicht werden, welche Auswirkungen die Errichtung einer Doppelfassade mit GIPV in Verbindung mit Verbundglas oder Isolierglas und einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade mit klassischen Dämmmaterial (XPS) ohne Rücksichtnahme auf das Temperaturmodell des Fraunhofer Instituts auf die thermischen Eigenschaften des Hauses haben könnte.

Der Heizwärmebedarf dient hierbei als Vergleichswert. Um den Heizwärmebedarf bzw. die flächenbezogene Heizlast des Gebäudes zu berechnen, benötigt man neben den Transmissionswärme- und Lüftungswärmeverlusten, die internen und solaren Gewinne.

In der Berechnung wird von folgenden Basisdaten ausgegangen:

- Drei-Familien-Haus bestehend aus KG, EG, OG, nicht ausgebautes Dachgeschoss
- Baujahr 1940
- ca. 200 m² beheizte Bruttogeschossfläche
- Aussenwand: Vollziegelmauerwerk (40 cm); auf Westseite Eternitfassade ohne Dämmung
- Obere Geschossdecke: Ziegeldecke mit Aufbeton (6 cm EPS)
- Kellerdecke: Betonhohlkörperdecke mit Beschüttung, Estrich

Klimadaten (Leitfaden OIB, 2007):

- HGT (Heizgradtage) = 3660 Kd
- HT (Heiztage) = 218 d
- T_{ne} (Temperatur am kältesten Tag) = -14
- I_s (Einstrahlung) = 378 kWh/m²a
- I_N (Einstrahlung) = 233 kWh/m²a
- I_{ow} (Einstrahlung) = 158 kWh/m²a

Bruttogeschossfläche

EG und OG: Vollgeschosse: $2 \times (10,7 \times 9) = 2 \times 96,3 = 192,6 \text{ m}^2$

Bruttovolumen

$$96,3 \times 6 = 577,8 \text{ m}^3$$

Flächenberechnung der Bauteile

Fensterflächen

- Süd: $6,5 \text{ m}^2$
- Ost: $12,0 \text{ m}^2$
- Nord: $3,4 \text{ m}^2$
- West: $14,5 \text{ m}^2$
- Gesamt: $36,4 \text{ m}^2$

Die Fenster haben einen Glasanteil von 70% der Glasfläche.

Aussenwand Westseite mit Eternit: $49,7 \text{ m}^2$

Aussenwand ohne Eternit: $150,3 \text{ m}^2$

Kellerdecke: $96,3 \text{ m}^2$

Obere Geschossdecke: $96,3 \text{ m}^2$

Tab. 10.1: Thermische Eigenschaften der Bestandteile von GIPV (Misara, 2011)

Material	Dichte (ρ)	spez. Wärmekapazität (cp)	Wärmeleitfähigkeit (λ)
	kg/m ²	J/kgK	W/mK
Modulaufbau			
PV	2330	677	0,800
Glas	2500	500	0,760
Tedlar	33	1500	0,033
Luft	1,15	1000	0,026
Verbundglas	2500	500	0,760
Isolierglas	1400	840	0,075
Hartschaum XPS	35	1450	0,040

Elementaufbau (mm):

- PV/Verbundglas: 3-1-3
- PV/Isolierglas: 3-1-3-16-6
- PV/Dämmverbund: 3-1-3-100

Ohne mathematisches Modell kann die Berechnung vereinfacht mit folgenden bereits erwähnten Formeln durchgeführt werden (Werhardt, 2011):

$$R = h_i + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + h_e$$

Daraus ergeben sich für Wärmeleitungswiderstand folgende Werte:

$$R_{\text{PV/Verbund}} = R_{\text{Glas}} + R_{\text{PV}} + R_{\text{Tedlar}} + R_{\text{Luft}} = \mathbf{0,943 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$R_{\text{PV/Iso}} = R_{\text{Glas}} + R_{\text{PV}} + R_{\text{Tedlar}} + R_{\text{Luft}}^3 = \mathbf{1,266 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$R_{\text{PV/DV}} = R_{\text{Glas}} + R_{\text{PV}} + R_{\text{Tedlar}} + R_{\text{xps}} = \mathbf{2,686 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$R_{\text{Verbund}} = R_{\text{Glas}} + R_{\text{Luft}} = \mathbf{0,928 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$R_{\text{Iso}} = R_{\text{Glas}} + R_{\text{Luft}} = \mathbf{1,250 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$R_{\text{DV}} = R_{\text{xps}} = \mathbf{2,500 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

³ Isoliergläser sind meist nicht mit Luft, sondern mit Edelgasen gefüllt. Dieser Umstand wurde hier vernachlässigt.

Der Raum zwischen neuer Doppelfassade und alter Gebäudesubstanz beträgt 150 mm und ermöglicht eine hybride Lüftung, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, innerhalb der Fassade. Im Sommer wird mittels natürlicher Belüftung die einströmende Aussenluft zur Kühlung der PV-Module genutzt, bevor diese wieder nach draussen abgegeben wird. In den Wintermonaten hingegen arbeitet man mit mechanischer Belüftung, um die vorgewärmte Luft aus dem Fassadenzwischenraum zu einem Wärmerückgewinnungssystem zu leiten, um die zugeführte Frischluft zu erwärmen. Mit dieser Lösung wird einerseits Wärme gewonnen und andererseits die Leistung der PV-Zellen verbessert. (Roberts, 2009)

Die vorgehängte hinterlüftete Fassade wird mit einer stehenden Luftschicht im Zwischenraum konstruiert, damit nur begrenzt Wasser hinter die Fassadenbekleidung eindringen kann und die Werte annähernd vergleichbar sind mit der Hybrid-Lüftung der Doppelfassade.

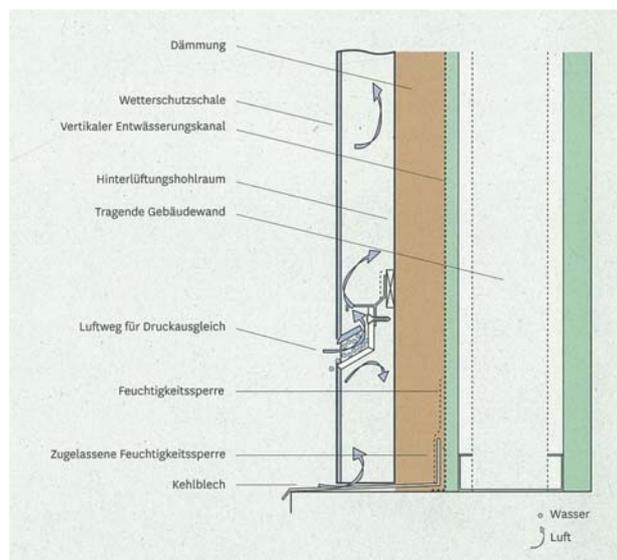


Abb. 10.1: Vertikalschnitt durch eine Horizontalfuge einer Wetterschutzfassade mit stehender Luftschicht (Roberts, 2009)

Im Fallbeispiel wird der Widerstand im Fassadenzwischenraum aus dem Datenblatt der ÖNORM EN ISO 6946 entnommen und beträgt somit für einen Abstand von 150 mm $0,145 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$:

Tab. 10.2: Angaben zu horizontalem Wärmefluss in Abhängigkeit von Abmessungen des Fassadenzwischenraums (Werhardt, 2011)

Abstand Fassadenzwischenraum	Horizontaler Wärmefluss	
	nach oben	nach unten
mm	m ² K/W	
0,005	0,11	0,12
0,010	0,14	0,16
0,020	0,15	0,19
0,040	0,16	0,22

Diese Widerstände werden zu den bereits vorhanden Widerständen der Aussenwände sowie der Wärmeübergangswiderstände⁴ des Beispielgebäudes addiert und ergeben damit folgende neue U-Werte⁵:

Tab. 10.3: Wärmeübergangswert (U-Wert), Transmissionsleitwert und Temperaturkorrekturfaktor (f) der einzelnen Bauteile des Gebäudes

Gebäudeteile	Fläche (A)	U-Wert	f	Transmissionsleitwert
	m ²	W/m ² K		W/K
Aussenwand I alt	150,3	1,4	1	210,42
Aussenwand I PV/Verbundglas	150,3	0,527	0,8	63,35
Aussenwand I PV/Isolierglas	150,3	0,450	0,7	47,37
Aussenwand I PV/Dämmverbund	150,3	0,275	1	41,28
Aussenwand II alt	49,7	1,240	1	61,63
Aussenwand II PV/Verbundglas	49,7	0,496	0,8	19,70
Aussenwand II PV/Isolierglas	49,7	0,427	0,7	14,86
Aussenwand II PV/Dämmverbund	49,7	0,266	1	13,21
Aussenwand I Verbundglas	150,3	0,531	0,8	63,86
Aussenwand I Isolierglas	150,3	0,454	0,7	47,71
Aussenwand I Dämmverbund	150,3	0,289	1	43,50
Aussenwand II Verbundglas	49,7	0,499	0,8	19,85
Aussenwand II Isolierglas	49,7	0,430	0,7	14,96
Aussenwand II Dämmverbund	49,7	0,280	1	13,90
Kellerdecke	96,3	1,2	0,7	80,89
obere Geschoßdecke	96,3	0,5	0,9	43,34
Dachschräge	0	0	1	0,00
Fenster	36,4	2,3	1	83,72

⁴ Aus Gründen der vereinfachten Darstellung wurden die Wärmeübergangswiderstände aus der ÖNORM EN ISO 6946 herangezogen

⁵ Die Wärmeübergangswiderstände müssen nicht erneut addiert werden, da sie bereits in den U-Werten des alten Gebäudes enthalten sind.

Der f-Faktor wird als Temperaturkorrekturfaktor bezeichnet und berücksichtigt höhere Umgebungstemperaturen von Kellern, Dachräumen und Wintergärten. Um der Glaskonstruktion der Doppelfassade sowie stehenden Luftschicht hinter der Wetterschutzfassade im Fallbeispiel gerecht zu werden, wurde die Werte für die Verglasung eines nicht beheizten Wintergartens verwendet. (Werhardt, 2011)

Der Transmissionsleitwert wird mit folgender Formel berechnet (Werhardt, 2011):

$$L_T = L_e + L_u + L_g + L_\psi + L_\chi$$

$$L_e + L_u + L_g = \sum A \times U \times f$$

- L_T für Gebäude ALT = **480,00 W/K**
- L_T für Gebäude NEU mit PV/Verbundglas = **291,00 W/K**
- L_T für Gebäude NEU mit PV/Isolierglas = **270,18 W/K**
- L_T für Gebäude NEU mit PV/Dämmverbund = **262,44 W/K**
- L_T für Gebäude NEU mit Verbundglas = **291,65 W/K**
- L_T für Gebäude NEU mit Isolierglas = **270,62 W/K**
- L_T für Gebäude NEU mit Dämmverbund = **265,35 W/K**

Um den **Transmissionswärmeverlust Q_T** zu berechnen benötigt man zusätzlich die Leitwertzuschläge für Wärmebrücken (Werhardt, 2011):

$$L_\psi + L_\chi = 0,2 \times \left(0,75 - \frac{L_e + L_u + L_g}{A} \right) \times (L_e + L_u + L_g)$$

Die **Leitwertzuschläge für Wärmebrücken** sind bei dem ursprünglichen Gebäude negativ und damit zu vernachlässigen. Bei den übrigen Sanierungen hingegen

betragen sie für Verbundglas (4,07/4,08 W/K), für Isolierglas (6,48/6,49 W/K) und für Dämmverbund (6,9/7,35 W/K).

Der **Transmissionswärmeverlust** Q_T beträgt somit (Werhardt, 2011):

$$Q_T = 0,024 \times L_T \times HGT$$

- Q_T für Gebäude ALT = **42.163 kWh/a**
- Q_T für Gebäude NEU mit PV/Verbundglas = **25.922 kWh/a**
- Q_T für Gebäude NEU mit PV/Isolierglas = **24.302 kWh/a**
- Q_T für Gebäude NEU mit PV/Dämmverbund = **23.698 kWh/a**
- Q_T für Gebäude NEU mit Verbundglas = **25.977 kWh/a**
- Q_T für Gebäude NEU mit Isolierglas = **24.342 kWh/a**
- Q_T für Gebäude NEU mit Dämmverbund = **23.915 kWh/a**

Weitere Verluste ergeben sich durch den Lüftungswärmeverlust Q_V , welcher auf dem Gesamtluftvolumen des Hauses V_V und einem Lufttausch n_L von 40% beruht. Die optimierten Varianten mit Isolierglas und Verbundglas wurden mit einem Wärmebereitstellungswert von 50% für die mechanische Lüftung berechnet.⁶ (Werhardt, 2011)

$$V_V = 0,8 \times BGF \times 2,6$$

$$V_V = 400,6 \text{ m}^3$$

$$n_L \text{ für Gebäude ALT und NEU mit PV/Dämmverbund} = \mathbf{0,4}$$

$$n_L \text{ für Gebäude NEU mit PV/Isolierglas und PV/Verbundglas} = \mathbf{0,2}$$

⁶ Die Lüftungssysteme der Doppelfassade werden in der Berechnung damit berücksichtigt.

Daraus ergibt sich anhand folgender Formel der **Lüftungsleitwert L_V** (Werhardt, 2011)

$$L_V = c_{p,L} \times \rho_L \times n_L \times V_V$$

L_V für Gebäude ALT und NEU mit PV/Dämmverbund = **54 W/K**

L_V für Gebäude NEU mit PV/Isolierglas und PV/Verbundglas = **27 W/K**

Der **Lüftungswärmeverlust Q_V** berechnet sich wie folgt (Werhardt, 2011):

$$Q_V = 0,024 \times L_V \times HGT$$

Q_V für Gebäude ALT und NEU mit PV/Dämmverbund = **4.743 kWh/a**

Q_V für Gebäude NEU mit PV/Isolierglas und PV/Verbundglas = **2.372 kWh/a**

Um die **internen Wärmegewinne** zu ermitteln, benötigt man den Wert der sekundären Wärmeabgabe nach Innen q_i . Man benötigt hierfür den Absorptionsgrad der verschiedenen Materialien aus Kapitel 9.3 sowie die internen und externen Wärmeübergangskoeffizienten für Sommer und Winter aus Tabelle 10.4.

$$q_i = \alpha_e \times \frac{h_i}{h_i + h_e}$$

Tab. 10.4: Wärmeabgabe der verschiedenen GIPV-Varianten in Sommer und Winter (Misara, 2011)

qi PV-Verbundglas Winter	2,98%
qi PV-Verbundglas Sommer	5,52%
qi PV-ISO-Glas Winter	5,25%
qi PV-ISO-Glas Sommer	9,58%
qi PV-Dämmverbund Winter	18,52%
qi PV-Dämmverbund Sommer	31,61%
qi Verbundglas Winter	3,30%
qi Verbundglas Sommer	4,68%
qi ISO-Glas Winter	5,79%
qi ISO-Glas Sommer	8,45%
qi Dämmverbund Winter	19,71%
qi Dämmverbund Sommer	30,38%

Die Formel für interne Wärmegewinne Q_i lautet wie folgt (Werhardt, 2011):

$$Q_i = 0,024 \times q_i \times BGF \times 0,8 \times HT$$

Zur Berechnung werden die Jahresmittelwerte der sekundären Wärmeabgabe nach Innen q_i verwendet:

- Q_i für Gebäude ALT⁷ = **3.023 kWh/a**
- Q_i für Gebäude NEU mit PV/Verbundglas = **3.424 kWh/a**
- Q_i für Gebäude NEU mit PV/Isolierglas = **5.981 kWh/a**
- Q_i für Gebäude NEU mit PV/Dämmverbund = **20.204 kWh/a**
- Q_i für Gebäude NEU mit Verbundglas = **3.217 kWh/a**
- Q_i für Gebäude NEU mit Isolierglas = **5.739 kWh/a**
- Q_i für Gebäude NEU mit Dämmverbund = **20.192 kWh/a**

⁷ Für die Berechnung des ursprünglichen Gebäudes wurde für q_i 3,75 W/m³ angenommen (Frey, 1994)

Die solaren Wärmegewinne Q_s richten sich nach der Ausrichtung der Aussenwände und deren Einstrahlungen I_j , sowie der Fensterfläche A_g und deren Energiedurchlassgrad g_w . Mit dem Faktor F_s wird der Verschattungsgrad der Fenster miteinbezogen (Werhardt, 2011):

$$Q_s = \sum_j I_j \times \left(\sum A_g \times g_w \times F_s \right)$$

Der Energiedurchlassgrad der Fenster berücksichtigt die Verschmutzung mit einem Faktor von 0,9 und den Einfallswinkel mit 0,98.⁸

$$g_w = 0,9 \times 0,98 \times g$$

Daraus ergeben sich folgende Werte für die solaren Wärmegewinne Q_s :

Tab. 10.5: Solare Wärmegewinne in Abhängigkeit von Himmelsrichtungen (Werhardt, 2011)

Orientierung	I_j kWh/m2a	A_g m2	gw ALT %	gw NEU %	F_s %	Q_s ALT kWh/a	Q_s NEU kWh/a
Süd	378	4,55	0,57	0,53	0,85	833	775
Ost	233	8,4	0,57	0,53	0,85	948	882
West	233	10,15	0,57	0,53	0,85	1.146	1.065
Nord	158	2,38	0,57	0,53	0,85	182	169

- Q_s für Gebäude ALT = **3.110 kWh/a**
- Q_s für Gebäude NEU = **2.891 kWh/a**

Wenn man nun die nutzbaren Energiegewinne von den Energieverlusten abzieht erhält man den Heizwärmebedarf der Gebäude. *„Der Heizwärmebedarf ist jene Nutzenergie, die im Laufe der Heizsaison dem Haus vom Heizsystem zugeführt werden muss, um es auf eine Rauminnentemperatur von 20°C zu halten.“* (Werhardt, 2011)

⁸ Der Energiedurchlassgrad der Verglasung g wird für die optimierten Gebäude mit 0,60 und für das ursprüngliche Gebäude mit 0,65 angenommen. (Werhardt, 2011)

Um den Heizwärmebedarf eines Gebäudes zu berechnen benötigt man den Ausnutzungsgrad η^9 der gesamten monatlichen oder jahreszeitlichen Gewinne (innere oder passive-solare) auf den nutzbaren Teil der Wärmegewinne reduziert.¹⁰

$$Q_h = (Q_T + Q_V) - \eta \times (Q_i + Q_s)$$

- Q_h für Gebäude ALT = **40.773 kWh/a**
- Q_h für Gebäude NEU mit PV/Verbundglas = **22.610 kWh/a**
- Q_h für Gebäude NEU mit PV/Isolierglas = **18.689 kWh/a**
- Q_h für Gebäude NEU mit PV/Dämmverbund = **5.346 kWh/a**
- Q_h für Gebäude NEU mit Verbundglas = **22.852 kWh/a**
- Q_h für Gebäude NEU mit Isolierglas = **18.947 kWh/a**
- Q_h für Gebäude NEU mit Dämmverbund = **5.575 kWh/a**

Die Heizlast P_{tot} eines Gebäudes ist hingegen die Leistung, die dem Haus bei der Norm-Aussentemperatur θ_{ne} zugeführt werden muss, um es auf 20°C Rauminnentemperatur θ_i zu halten. Dabei werden solare Gewinne und interne Gewinne nicht beachtet, weil nicht davon ausgegangen werden kann, dass am kältesten Wintertag die Sonne scheint oder genügend interne Gewinne vorhanden sind. (Werhardt, 2011)

$$P_{tot} = (L_T + L_V) \times (\theta_i + \theta_{ne})$$

⁹ $\eta = 1,00$ für schwere Bauweise; $\eta = 0,98$ für mittelschwere Bauweise; $\eta = 0,90$ für leichte Bauweise (Werhardt, 2011)

¹⁰ Der Ausnutzungsgrad wird für die optimierten Gebäude mit Glas mit 0,90, für Dämmverbund und das ursprüngliche Gebäude mit 1,00 angenommen. (Werhardt, 2011)

- P_{tot} für Gebäude ALT = **18.156 kWh/a**
- P_{tot} für Gebäude NEU mit PV/Verbundglas = **10.812 kWh/a**
- P_{tot} für Gebäude NEU mit PV/Isolierglas = **10.104 kWh/a**
- P_{tot} für Gebäude NEU mit PV/Dämmverbund = **10.759 kWh/a**
- P_{tot} für Gebäude NEU mit Verbundglas = **10.834 kWh/a**
- P_{tot} für Gebäude NEU mit Isolierglas = **10.119 kWh/a**
- P_{tot} für Gebäude NEU mit Dämmverbund = **10.858 kWh/a**

Der Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und Heizlast besteht in den Klimadaten des Hausstandortes. Die flächenbezogenen Werte für den spezifischen HBW und die spezifische Heizlast beziehen sich auf die Brutto-Grundfläche und lauten wie folgt:

Tab. 10.6: Flächenbezogene Heizlast und Heizwärmebedarf

	flächenbezogener HWB	flächenbezogene Heizlast
	kWh/m ² a	W/m ² a
Gebäude ALT	212	94
Gebäude NEU mit PV/Verbundglas	117	56
Gebäude NEU mit PV/Isolierglas	97	52
Gebäude NEU mit PV/Dämmverbund	28	56
Gebäude NEU mit Verbundglas	119	56
Gebäude NEU mit Isolierglas	98	52
Gebäude NEU mit Dämmverbund	29	56

Anhand des Jahres-Heizwärmebedarfs und der errechneten Heizlast für das Fallbeispiel ist deutlich ersichtlich, dass ohne Berücksichtigung des Temperaturmodells des Fraunhofer Instituts die Unterschiede zwischen den Materialien ohne PV und GIPV in Verbindung mit Verbund und Isolierglas sowie Dämmverbund vernachlässigbar sind. Der flächenbezogene HWB konnte allein mit

einer Doppelfassade aus Verbundglas beinahe um die Hälfte reduziert werden. Den besten Dämmeffekt erzielt die vorgehängte hinterlüftete Fassade in Verbindung mit XPS.

11 GIPV aus wirtschaftlicher Sicht

PV-Module ersetzen als Fassadenbaustoff Materialien wie Glas oder Stein. Bei einer Bewertung der Wirtschaftlichkeit von PV-Fassaden müssen daher die ersetzten Materialien miteingerechnet werden, um die Kostensynergien korrekt zu berücksichtigen.

Die dargestellten Richtwerte für unterschiedliche Fassadenmaterialien (inklusive Montage) gehen von rund 800 EUR/m² für eine PV-Fassade in Österreich aus. Die Investitionskosten einer PV-Fassade sind rund 13% höher als die einer Steinfassade und rund 20% höher als die einer Glas- oder Keramikfassade. (Fechner TEIL II, 2009)

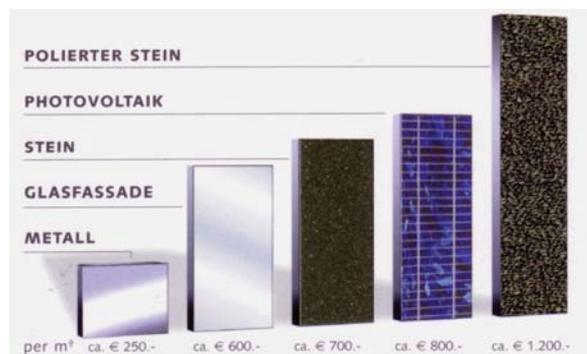


Abb. 11.1: Kostenvergleich Fassadenbaustoffe (Hornbacher, 2007)

Die Kostenunterschiede zwischen herkömmlichen Fassaden- und Gebäudekomponenten und PV-Modulen werden immer geringer.

Mit einer Preisreduktion von rund 20% des PV-Standardpreises ist bei Verdoppelung der kumulierten installierten Leistung zu rechnen (Fechner TEIL II, 2009). Der Baupreisindex zeigt die Entwicklung der von den Bauherren gezahlten Baupreise. In den nächsten 10 Jahren könnte gebäudeintegrierte Photovoltaik günstiger als herkömmliche hochwertige Fassadenmaterialien wie Keramik oder Stein sein. (<http://www.solarserver.de>, 12.08.2011).

In Deutschland beläuft sich der Marktanteil von GIPV auf 1 Promille des PV-Gesamtmarktes. (Hornbacher, 2007) In Österreich sind maximal 10% der Anlagen gebäudeintegriert. Hauptgrund für den geringen Anteil sind ungünstige Marktbedingungen, welche sich in einem Exportanteil von mehr als 90%

widerspiegeln. Gesamt wurden in Österreich 2008 beispielsweise etwa 65,4 MW produziert (entspricht einer Steigerung zum Vergleichsjahr 2007 von 38%) – davon aber nur 4.6 MW im Inland installiert. (Fechner TEIL II, 2009)

Die Ursachen für den geringen Marktanteil liegen einerseits in der mangelnden politischen Unterstützung erneuerbarer Energien in Österreich und andererseits an generellen hohen Anforderungen bezüglich der Produktionseigenschaften sowie dem hohen Planungsaufwand von gebäudeintegrierten Anlagen im Gegensatz zu Standard-Aufdach-Anlagen.

Die Produkthanforderungen unterscheiden sich wie folgt:

Tab. 11.1: Unterschiede in Produkthanforderungen zwischen klassischen PV-Modulen und GIPV (Hornbacher, 2007)

	Klassische PV-Module	GIPV
Produkteigenschaften	Preis pro Wp	Ästhetik
	Hoher Flächenertrag	Variable Abmessungen, Sonderformen
	Einfache Montage	Große Elementflächen
		Variable Aufbauten und Produkteigenschaften (U-Wert, Statik)
		Sicherheitstechnische Anforderungen
		Preis pro m ²
Altersbeständigkeit	Geringe Leistungseinbußen	Geringe optische Veränderungen
Fertigung	Kostengünstige Massenproduktion	Kostengünstige Kleinserien- und Einzelstückproduktion

GIPV erfordert daher die Ausweitung auf unterschiedliche Technologien sowie eine eindeutige Produkt- und Marktdifferenzierung. Das „ideale“ Modul für GIPV sollte sich nicht an bestehenden PV-Modulen orientieren, sondern an der Vorstellung einer „Strom erzeugenden Glasplatte“ mit unterschiedlichem Erscheinungsbild und Formaten, um für verschiedene bautechnische Anforderungen gerüstet zu sein. Beispiele für bereits eingeführte innovative Produkte sind Verbundsicherheitsglas-Module, Dünnschicht-Module und semitransparente Glasbeschichtungen.

11.1 Preisentwicklung im GIPV-Sektor

Faktoren wie die zunehmende Standardisierung der PV-Module und anderen Systemkomponenten sowie der Preiseinbruch im PV-Sektor seit 2009 durch die Überflutung des europäischen Markts mit Modulen aus China und dem Preisverfall von Silizium, führten zur Reduktion der Gesamtkosten für gebäudeintegrierte Systeme.

Wie in Abbildung 11.2 ersichtlich sanken die Großhandelspreise für kristalline Module aus Europa und Japan im vergangenen Jahr um rund 25%; kristalline Module aus China waren sogar um 37% günstiger. CdS/CdTe Dünnschichtmodule, amorphe und mikrokristalline Dünnschichtmodule verbilligten sich um rund 30%. (<http://www.solarserver.de>, 12.08.2011).

Preistrends Oktober 2011

Modultyp, Herkunft	€ / Wp		Trend seit 09/11		Trend seit 01/11
Kristallin Deutschland	1,29		- 3,0 %		- 24,5 %
Kristallin China	0,92		- 6,2 %		- 37,6 %
Kristallin Japan	1,22		- 3,7 %		- 25,3 %
Dünnschicht CdS/CdTe	0,84		- 8,8 %		- 32,8 %
Dünnschicht a-Si	0,74		- 4,5 %		- 31,6 %
Dünnschicht a-Si/μ-Si	0,89		- 3,9 %		- 29,2 %

Abb. 11.2.: Großhandelspreise PV-Module Stand Oktober 2011

(<http://www.solarserver.de/service-tools/photovoltaik-preisindex.html>, 11.11.11)

Auch auf Systemebene wird eine Kostenhalbierung bis zum Ende des Jahrzehnts prognostiziert: von ca. 3.000 EUR/kWp in 2010 auf unter 1.500 EUR/kWp in 2020. (<http://www.solarserver.de>, 12.08.2011).

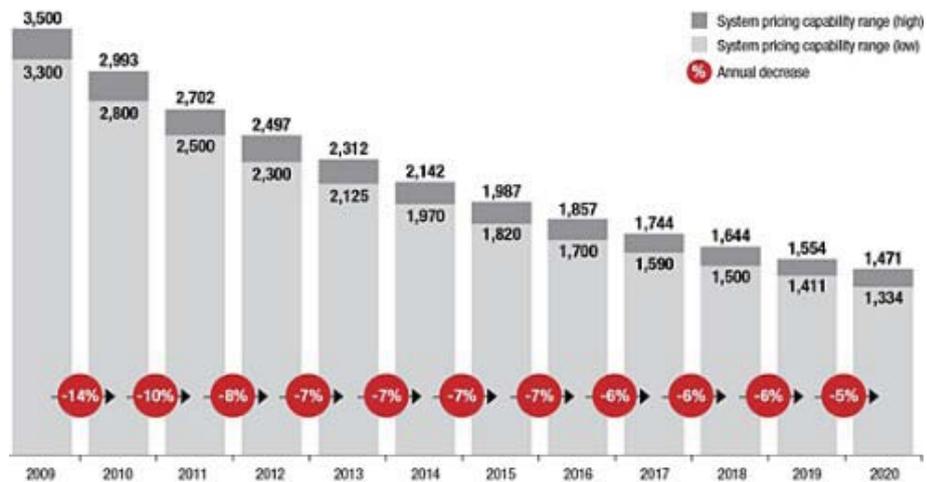


Abb. 11.3: Systemkosten von PV-Anlagen, Halbierung der Kosten bis 2020 – von ca. 3000 EUR/kWp 2010 auf unter 1500 EUR/kWp 2020 (<http://www.solarserver.de>, 12.08.2011).

Wie in Abbildung 11.4 ersichtlich haben die Modulkosten bei GIPV Installationen einen geringeren Einfluss auf die Gesamtkosten als bei Aufstellungen auf Freiflächen. Bei PV-Anlagen auf Freiflächen betragen die Modulkosten rund 75% der Gesamtkosten, die Modulkosten bei GIPV hingegen belaufen sich auf rund 38%. Bei kleineren Projekten können sie jedoch auf bis zu 51% steigen. (<http://www.solarserver.de>, 12.08.2011).

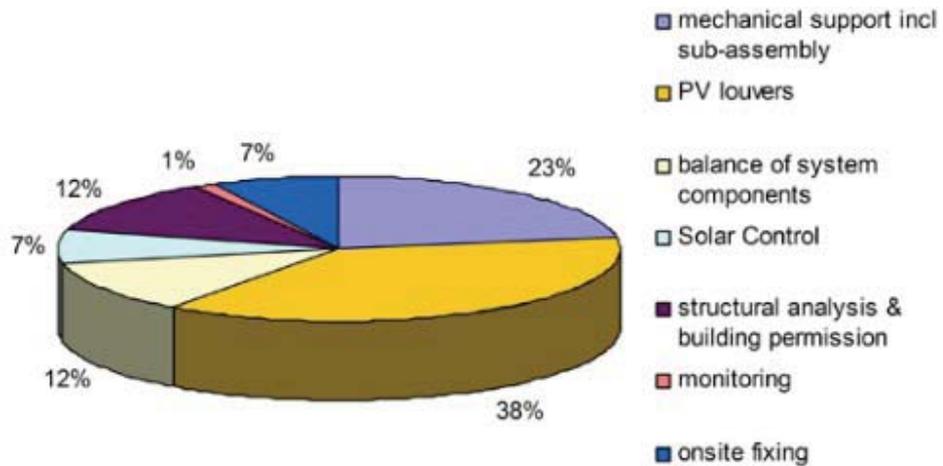


Abb. 11.4: Kostenaufteilung eines GIPV Projektes mittlerer Größe bei Gesamtkosten von 36,8 EUR/Wp (<http://www.solarserver.de>, 12.08.2011).

Aus europäischer Sicht erweisen sich insbesondere die Märkte Frankreich und Italien aufgrund der hohen Einspeisevergütung und einem Bonus für die Gebäudeintegration als interessant. Zusätzlich verfügt Italien nicht nur über hohe Einstrahlungswerte, sondern auch über einen überdurchschnittlichen Strompreis (Italien: 0,21 €/kW; Deutschland: 0,18 €/kW; Frankreich: 0,12 €/kW; Griechenland: 0,07 €/kW). Mit der Verwendung von GIPV ist auch immer eine Imagegewinn und somit eine Wertsteigerung der Immobilie verbunden. Dieser Effekt ist schwer quantifizierbar. Es existieren hingegen bereits Softwareprogramme, welche den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes und dessen Kosten erfassen: vom Bau, Instandhaltung und Betrieb inkl. Primärenergiebedarf, bis hin zum Abriss des Gebäudes. Programme wie BLCC-Programm (Building Life-Cycle Costs) in den USA und LEGEP-Programm in Europa unterstützen bereits heute Architekten bei der integralen Planung eines Gebäudes. (<http://www.solarserver.de>, 12.08.2011).

11.2 Exkurs: Verwendung von Dünnschichtzellen in GIPV

Aufgrund der geringeren Materialintensität von Silizium ergeben sich klare Kostenvorteile im Vergleich zu kristallinen Modulen. Mit der Weiterentwicklung der Lasertechnik, als Ersatz für Drahtsägen mit hoher Ausschussquote, ist ein Potenzial für zusätzliche Kostensenkungen bei der Produktion von Dünnschichtmodulen vorhanden.

Tab. 12.1: Durchschnittliche Kosten für Fassadenelemente mit PV (Fechner TEIL I, 2009)

Modul- Fassadenelement	Typ	Fläche je kW	Leistung je m ²	Preis EUR/m ²
a-Si Glas/Folie	asi	19,2m ²	52W	456
a-Si-OPAK	asi	19,2m ²	52W	565
a-Si-THRU	asi	22,2m ²	45W	575
Standardmodul	kristallin	8,2m ²	120W	793
a-Si-OPAK-Isolier	asi	19,2m ²	52W	843
a-Si-THRU-Isolier	asi	22,2m ²	45W	886

Neben kristallinen Standard-Modulen wurden bisher nur amorphe Siliziumzellen (a-Si) erfolgreich in der Gebäudeintegration eingesetzt, da CdTe- und CIS- bzw. CIGS-Dünnschichtsolarzellen nur vereinzelt in der erforderlichen Größe hergestellt werden können. (Hagemann, 2002)

Wie in Kapitel 6.1 erwähnt verfügen amorphe Siliziumzellen über einen geringeren Wirkungsgrad als kristalline Zellen. Gerade in der GIPV spielt aber die potenzielle Erwärmung der damit verbundene Leistungsverlust eine tragende Rolle. Wenn die Module sich erwärmen, verlieren Dünnschichtmodule weniger Leistung als herkömmliche kristalline Module.

Tab. 12.2: Temperaturverluste im Vergleich (Hornbacher, 2007)

Temperaturkoeffizienten	Dünnschicht (a-Si)	Kristallin
Leistung	-0,2 %/K	-0,47 %/K
Leerlaufspannung	-0,33 %/K	-0,38 %/K
Kurzschlussstrom	+0,08 %/K	+0,10 %/K

12 Wirtschaftliche Aspekte des Fallbeispiels

Um die Kosten für die Sanierung mit den im Fallbeispiel verwendeten Materialien (Verbundglas, Isolierglas und Dämmverbund) erheben zu können, wird von folgenden Faktoren zur Bestimmung der elektrischen Leistung ausgegangen:

- Bei einer durchschnittlichen Einstrahlung von 1.100 kWh/m^2 für den Standort St. Pölten ergibt sich eine tägliche Sonneneinstrahlung von $3,0 \text{ kWh/m}^2/\text{Tag}$ bei einer horizontalen Fläche und $3,5 \text{ kWh/m}^2/\text{Tag}$ bei einer Fläche mit ertragsoptimierter Neigung.
- Da im Fallbeispiel eine vertikale nach Süden orientierte Fläche behandelt wird, geht man von einem relativen Wirkungsgrad von 72% gegenüber der optimal geneigten Fläche aus.
- Der südliche Teil der Fassade ist verschattungsfrei.
- Die Verluste durch die übrigen Systemkomponenten betragen im Durchschnitt 15%.
- Wie in Abbildung 13.1 ersichtlich, verringert sich die Leistung der PV-Anlage durch Erwärmung bei guter Hinterlüftung um rund 4% (bei schlechter Hinterlüftung um rund 5%).

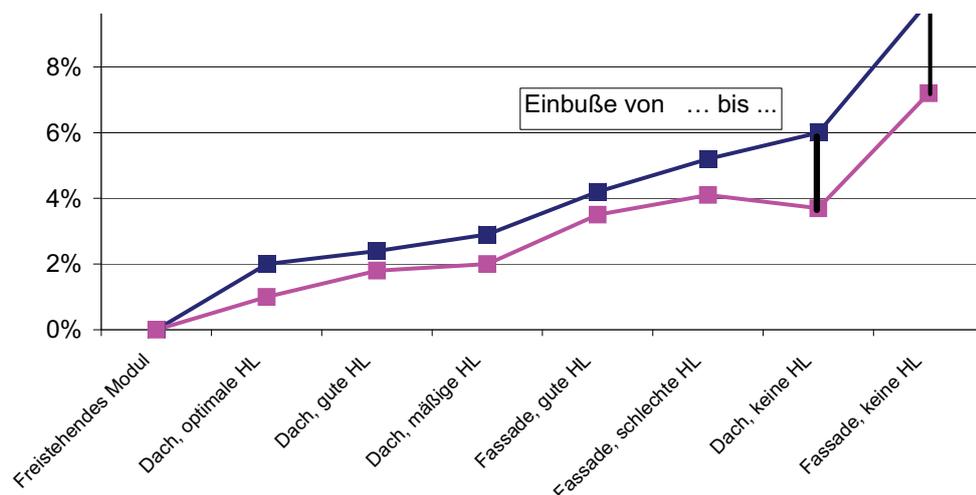


Abb. 13.1: Mögliche Eintragungseinbußen beim Einbau (Becker, 2008)

Diese Annahmen führen zur Ermittlung der geschätzten Jahresleistung pro kW_p:

$$365 \text{ d} \times 3,5 \text{ kWh/m}^2 \times 0,72 \times 0,96 \times 0,85 = \mathbf{750,6 \text{ kWh (elektrisch)/Jahr}}$$

Für das Solarfeld der Fassade wird monokristallines Silizium mit einer Fläche von 8 m²/kW_p verwendet. Das entspricht einer Leistung von 93,8 kWh/Jahr/m² sowie 3.846 kWh/Jahr (bei 5,1 kW_p) für die Fassadenfläche von 41 m². Die angenommenen Kosten der GIPV-Anlage setzten sich wie in Abbildung 11.4. beschrieben zusammen.

Der Vergleich von Kosten und Ertrag der PV-Anlage sowie der unterschiedlichen Dämmmaterialien bezieht sich auf einen Zeitraum von 20 Jahren:

Tab. 15.1: Ertrag und Kostenvergleich der Anlagen mit und ohne PV

mit Dämmung		Verbundglas	Isolierglas	Dämmverbund	mit Dämmung, mit PV		PV/Verbundglas	PV/Isolierglas	PV/Dämmverbund
Investition	KWh Spareffekt	22.852	18.947	5.575	KWh Spareffekt	22.610	18.689		5.346
	Kosten Energie	1.920	1.592	468	Investition Hülle PV	103.736	109.866		66.956
	Material pro m ²	600	650	300	Abschreibung	5.187	5.493		3.348
	Investition gesamt	98.160	106.340	49.080	Kosten Energie red. pa		10.546	10.934	4.802
	Abschreibung	4.908	5.317	2.454					
Kosten Energie red. pa		6.828	6.909	2.922					
mit Dämmung					mit Dämmung, mit PV				
Differenz KWh (Ersparnis)		-17.921	-21.826	-35.198	Differenz KWh (Ersparnis)		-18.163	-22.084	-35.427
Differenz Kosten		3.403	3.484	-503	Differenz Kosten		7.121	7.509	1.377

Unterschied PV zu ohne PV				
Differenz KWh (Ersparnis)		-242	-258	-229
Differenz Kosten		3.718	4.025	1.879

Daraus ergibt sich unter Annahme eines Heizölpreises von 83,6 EUR/100l und eines Einspeisetarifs für PV von 0,38 EUR/kWh¹¹ folgendes Bild:

Es ist deutlich zu erkennen, dass XPS (Dämmverbund) am besten für die Sanierung geeignet ist, da in diesem Fall nicht nur das größte Potenzial bei der energetischen Einsparung besteht, sondern es sich auch um die günstigste Variante handelt. Dies betrifft allerdings nur die Variante ohne PV.

¹¹ Die Einspeisetarife für PV-Anlagen, die ausschließlich an oder auf einem Gebäude oder einer Lärmschutzwand angebracht sind belaufen sich auf 0,38 EUR/kWh für 5-20 kW_p und 0,33 EUR/kWh für über 20 kW_p. (<http://www.pvaustria.at>, 08.08.2011)

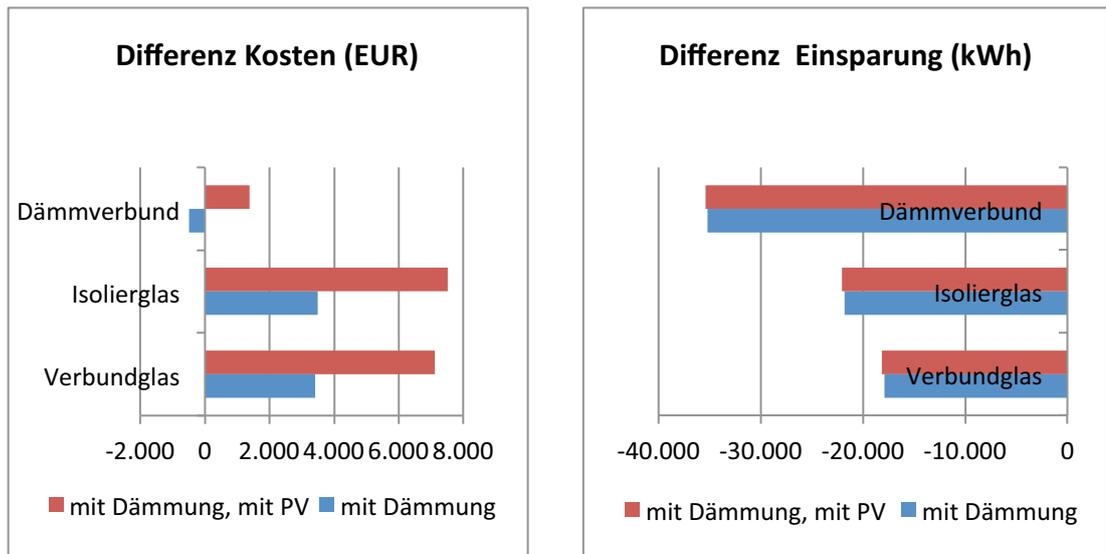


Abb. 13.2: Unterschiede bei Kosten und Energieeinsparung der verschiedenen Fassadenbaustoffe mit PV

13 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage basiert auf dem Aufbau des hermeneutischen Kastens. Ausgehend davon hat sich herausgestellt, dass bei einem Einsatz von gebäudeintegrierter Photovoltaik in Fassaden zwei Möglichkeiten bestehen die Sanierung umzusetzen.

Bei der ersten Möglichkeit handelt es sich um die Errichtung einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade, welche die PV-Elemente in der äußeren Schale integriert. Die hinterlüftete Fassade bedeckt die Gebäudehülle im Fallbeispiel mit opaken Elementen und wird zusätzlich mit einem Dämmverbund aus XPS isoliert. Der Kamineffekt zwischen den Schichten begünstigt die natürliche Lüftung.

Die zweite Möglichkeit ist der Aufbau einer Doppelfassade. Hier ist die innere Schicht sichtbar von der äußeren getrennt. Die PV-Module werden ebenfalls in der äußeren Schale integriert, da die semitransparenten Module dann als Sonnenschutz fungieren und gleichzeitig durch die Hinterlüftung effizienter arbeiten. Idealerweise arbeitet eine Doppelfassade mit Hybridlüftung, welche im Sommer natürlich belüftet und im Winter mechanisch.

Für das Fallbeispiel wurde polykristalline Zellen ausgewählt, da bei gutem Wirkungsgrad ihre Herstellungskosten am geringsten sind. Dünnschichtzellen verfügen zwar über einen geringeren Wirkungsgrad eignen sich aber ebenfalls hervorragend für GIPV, da sie sich nicht so schnell erwärmen und damit geringere Leistungsverluste zu verzeichnen haben.

Beim Aufbau der Anlage und dem Wechselrichterkonzept ist unbedingt auf mögliche Nahverschattungen zu achten, welche zu Leistungsverlusten zwischen 60 und 80% führen können. Im Fallbeispiel wurden ausschließlich PV-Systeme beleuchtet, welche über einen Wechselrichter an das lokale Stromnetz angeschlossen sind. Inselsysteme mit Akkuladung werden vernachlässigt, da es kostengünstiger ist die überschüssige Energie ins Netz einzuspeisen und die Akkus nicht ersetzt werden müssen.

Der zweite Forschungsfrage hat sich mit den thermischen Eigenschaften verschiedener Fassadenbaustoffe auseinandergesetzt. Dabei wurde festgestellt, dass Wärmespeicherfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Materialien den größten Einfluss auf die thermische Qualität eines Stoffs haben. Somit ergibt sich hinsichtlich

des Wärmedurchgangskoeffizienten für XPS der beste Wert, gefolgt von Isolierglas, Gipsfaserplatten und Schiefer. Das Schlusslicht ist Stahl, welcher zwar einen hohen Wärmespeicherwert hat, aber naturgemäß auch ein guter Wärmeleiter ist.

Im Vergleich der thermischen Eigenschaften von Isolierglas und Verbundglas, schneidet Isolierglas zwar besser ab; Verbundglas hingegen ist für die Verbindung mit PV grundsätzlich besser geeignet, da es sich weniger stark erwärmt und somit geringere Verluste aufweist. Die Untersuchungen des IWES zeigen ebenfalls, dass der Wärmedurchlasswiderstand nur für Isolierglas relevant ist, da die Zelltemperaturunterschiede in Sommer und Winter mit höherer Betriebstemperatur immer größer werden. Je schlechter der Dämmwert des konventionellen Bauprodukts, desto schlechter werden U-wert und g-Wert im Winter. Tendenziell zeigt sich, dass ein dickerer Aufbau des PV-Elements zu einem schlechteren g-Wert führt.

Mit dem Temperaturmodell für multifunktionale PV-Bauelemente des IWES wird unter Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung und unterschiedlichen Umgebungstemperaturen an Vorder- und Rückseite des Moduls bewiesen, dass thermische Eigenschaften bei den unterschiedlichen Aufbauten eines GIPV Moduls (Isolierglas, Verbundglas, Dämmverbund XPS) eine zentrale Rolle spielen und eine Auswirkung auf die Wärmekapazität des PV-Bauelements haben.

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs und der flächenbezogenen Heizlast des Gebäudes im Fallbeispiel wurde ohne das mathematische Modell des IWES durchgeführt und zeigte vernachlässigbare Ergebnisse bei der Unterscheidung der Fassadenbaustoffe mit und ohne PV hinsichtlich der thermischen Wirksamkeit.

Die dritte Forschungsfrage beschäftigte sich mit der wirtschaftlichen Dimension von GIPV. Grundsätzlich zeigt sich, dass zurzeit die Investitionskosten einer PV-Fassade um rund 13% höher sind als bei einer Steinfassade und 20% höher als die einer Glasfassade. Man rechnet allerdings mit einer starken Preisreduktion der PV-Fassaden bei einer Verdoppelung der kumulierten installierten Leistung in den kommenden 10 Jahren. Der geringe Marktanteil zum heutigen Zeitpunkt erklärt sich durch die hohen Anforderungen bei den Produktionseigenschaften sowie dem Planungsaufwand.

Im Fallbeispiel zeigt sich, dass bei einer geschätzten Jahresleistung von 750,6 kWh/Jahr pro kW_p, bei einem Heizölpreis von 83,6 EUR/100l und einem

Einspeisetarif von 0,38 EUR/kWh für eine 5,1 kW-Anlage kaum Unterschiede den energetischen und wirtschaftlichen Einsparungen bei den Dämmungen mit und ohne PV zu erkennen sind. Dämmverbund schneidet in jeder Hinsicht am besten ab, gefolgt von Isolierglas und schließlich Verbundglas. Zusammenfassend ist zu sagen, dass ausschließlich die Errichtung einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade ohne PV aus wirtschaftlicher Sicht empfohlen werden kann. Allerdings ist zu beachten, dass in der Realität eine Doppelfassade für ein Gebäude dieser Größenordnung nicht in Frage kommen würde.

Aus den Ergebnissen der Arbeit lässt sich ableiten, dass bei der thermischen Sanierung von Gebäuden in traditioneller Bauweise im Sinne der Wirtschaftlichkeit und technischen Umsetzung vorgehängte hinterlüftete Fassaden, insbesondere bei der Integration von PV, Doppelfassaden vorzuziehen sind. Aufbauend auf einer Schicht aus klassischen Dämmmaterialien wie etwa XPS eignet sich Verbundglas in Verbindung mit PV aus wirtschaftlicher und technischer Sicht am besten für die Sanierung.

14 Literaturverzeichnis

Becker, Gerd: Gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV/GIPV),
Solarenergieförderverein Bayern, 2008

Bendel, Christian; Hullmann, Heinz: Gebäudeintegrierte Photovoltaik bei der
Sanierung und Modernisierung. In: PV + Bau 05. Technisches Merkblatt des
Arbeitskreises „Photovoltaik in Gebäuden“, Studiengemeinschaft für Ferigbau
e.V., 2005, S. 3-17

Bendel, Christian: Multifunktionale Photovoltaikprodukte – Strategien und
Lösungen zu neuen Produkten mit hohem Kostensenkungspotenzial, 23.
Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2008

BMVIT Tagungsband 8. Österreichische Photovoltaik Tagung: Photovoltaik –
Innovationen für Produktion und urbane Anwendungen, Oktober 2010, Wien

Chemisana, Daniel: Building Integrated Concentrating Photovoltaics: A review.
In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2011, S. 603-610

Falk, A.; Dürschner; Remmers, K.H: Photovoltaik für Profis, 2. Auflage,
Solarpraxis AG, Berlin, 2009

Fechner, Hubert; Sehnal Erik; Haas; Reinhard; Lopez-Polo, Assun:
Gebäudeintegrierte Photovoltaik Teil I. Technologiestatus, Erfahrungen, Best-
practice Beispiele und Visionen der GIPV Technologie, Klima- und Energiefonds,
Wien, 2009 (TEIL I)

Fechner, Hubert; Sehnal Erik; Haas; Reinhard; Lopez-Polo, Assun:
Gebäudeintegrierte Photovoltaik Teil II. Perspektiven, Potenziale und
volkswirtschaftliche Betrachtung der GIPV Technologie, Klima- und
Energiefonds, Wien, 2009 (TEIL II)

Frey, K; Haas, J; Könighofer, H.: Handbuch für Energieberater, Institut für
Energieforschung, Graz, 1994

Funtan, Peter; Henze Norbert; Glotzbach Thomas; Misara, Siwanand:
Multifunktionale photovoltaische Bauteile Ergebnisse aus dem Projekt

MULTIELEMENT, zweites Anwenderforum „Gebäudeintegrierte Photovoltaik“, 2010, Bad Staffelstein (Multielement I)

Funtan, Peter; Henze Norbert; Glotzbach Thomas; Misara, Siwanand:
MULTIELEMENT - Untersuchungen zur Entwicklung von Fertigungs-, Prüf- sowie Einbaumethoden von multifunktional nutzbaren Photovoltaik Bauelementen/Baugruppen in der Gebäudetechnik, zweites Anwenderforum „Gebäudeintegrierte Photovoltaik“, 2010, Bad Staffelstein (Multielement II)

Goetzberger, A.; Hoffmann V.: Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer, Berlin, 2005

Hagemann, Ingo B.: Gebäudeintegrierte Photovoltaik. Architektonische Integration der Photovoltaik in die Gebäudehülle, Rudolf Müller GmbH, Köln, 2002

Henze, N.; Misara S.; Mazumdar, P.: Temperaturmodell multifunktionaler PV-Bauelemente aus dem Projekt MULTIELEMENT, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2010

Hornbacher, Dieter; Kirschner, Markus; Malin Dominik: Vom PV-Modul zur stromerzeugenden Glasplatte – Anforderungen an die zukünftige PV-Technik aus Sicht der Glasindustrie, Bad Staffelstein, 2007

Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang: Regenerative Energien in Österreich. Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009

Krawietz, Silke: Gebäudeintegration von Photovoltaik (GIPV) in Europa, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2003

Misara S.; Henze N.; Sidelev A.: Thermische Eigenschaften multifunktionaler PV-Elemente – U-Wert, g-Wert, F_c -Wert, Drittes Anwenderforum gebäudeintegrierte Photovoltaik, Bad Staffelstein, 2011

Roberts, Simon; Guariento, Nicolo: Gebäudeintegrierte Photovoltaik. Ein Handbuch, Birkhäuser, Basel, 2009

Roedel, W.: Physik unserer Umwelt, Springer, Berlin, Heidelberg, 2000

Rozynski, M.; Fisch, M.N.: Doppelfassade mit PV-Integration. Energie- und komfortgerechte Sanierung eines Bürogebäudes. In: TAB TECHNIK AM BAU, Fraunhofer IRB, 2003, S. 59-64

Swoboda, Natalie: Ökologische Wärmedämmung. Ein Überblick über Dämmstoffe und alternative Energien, Land Niederösterreich, 2009

Quaschnig, Volker: Understanding renewable energy systems, Earthscan, London, 2005

Werhardt, Ulrike: Leitfaden für EnergieberaterInnen, Umweltberatung, 2011

DIN EN 61215 - Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval, VDE (IEC 61215:2005)

DIN EN 673 Glas im Bauwesen: Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) Berechnungsverfahren, VDE, (enthält Änderung A1:2000 + Änderung A2:2002)

Leitfaden „Energietechnisches Verhalten von Gebäuden“, OIB-300.6-039/07, 2007

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmeps/eur.htm>, 06.07.2011

<http://www.energytech.at>, 05.09.2011

<http://www.solarserver.de/solar-magazin/solar-report/gebaeudeintegrierte-photovoltaik-auf-dem-weg-zum-massenprodukt.html> , 08.09.2011

<http://www.u-wert.net>, 11.09.2011

http://www.uni-due.de/ibpm/Aufgabensammlung/NeuNorm_A4.pdf (ÖNORM EN ISO 6946), 08.08.2011

<http://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/wirtschaftlichkeit/amortisation;>

07.08.2011