

Manfred Hegger

**Forschungsprojekt energy:shell –  
Leitfaden zur Integration  
energiegewinnender Systeme  
in die Gebäudehülle  
Solar Decathlon 2007**



## F 2730

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8200-1

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

### **Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)



## **Forschungsprojekt energy:shell**

*Leitfaden zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle*

Abschlussbericht

## Forschungsinitiative ZukunftBau

### **Abschlussbericht**

*Im Rahmen der Forschungsinitiative ZukunftBAU des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesministeriums für Bauwesen und Raumordnung (BBR) und anlässlich der Teilnahme des Fachgebiets Entwerfen und Energieeffizientes Bauen (ee), Fachbereich Architektur der Technischen Universität Darmstadt (TUD) am internationalen Studenten-Wettbewerb Solar Decathlon 2007.*

*Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.  
Aktenzeichen: Z6 – 10.08.18.7 – 06.23/II 2 – F20-06-018*

*Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.*

### **Verfasser**

Fachbereich Architektur  
Fachgebiet Entwerfen und  
Energieeffizientes Bauen  
Prof. Manfred Hegger  
Dipl.-Ing. M. Sc. Econ

El-Lissitzky-Straße 1  
64287 Darmstadt  
Tel +49 6151 16 2046  
Fax +49 6151 16 5247  
[www.ee.tu-darmstadt.de](http://www.ee.tu-darmstadt.de)

### Bearbeitung

Prof. Dipl.-Ing. M. Sc. Econ. Manfred Hegger (hg)  
Dipl.-Ing. Jörg Wollenweber  
Dipl.-Ing. Isabell Schäfer  
Dipl.-Ing. Johanna Henrich  
Dipl.-Ing. Joost Hartwig  
Dipl.-Ing. Tanja Klippert  
cand. arch. Therese Heidecke  
cand. arch. Simon Schetter

## Forschungsgruppe energy:projekte am Fachgebiet ee

Die Erarbeitung des Forschungsprojektes energy:base erfolgt im Verbund von drei Forschungsprojekten am Fachgebiet ee unter der Leitung von Prof. Manfred Hegger. Der Bearbeitungszeitraum der Projekte war von Februar 2007 bis Ende März 2008.

### energy:base

Theoretische und konzeptionelle Entwicklung einer gebäudetechnischen Plattform für Gebäude mit extrem niedrigem Energieverbrauch

### energy:shell

Leitfaden zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle

### energy:label

Ganzheitliche Bewertung eines Plusenergiehauses und Prüfung der DIN 18599 anhand der Planung und des Betriebes

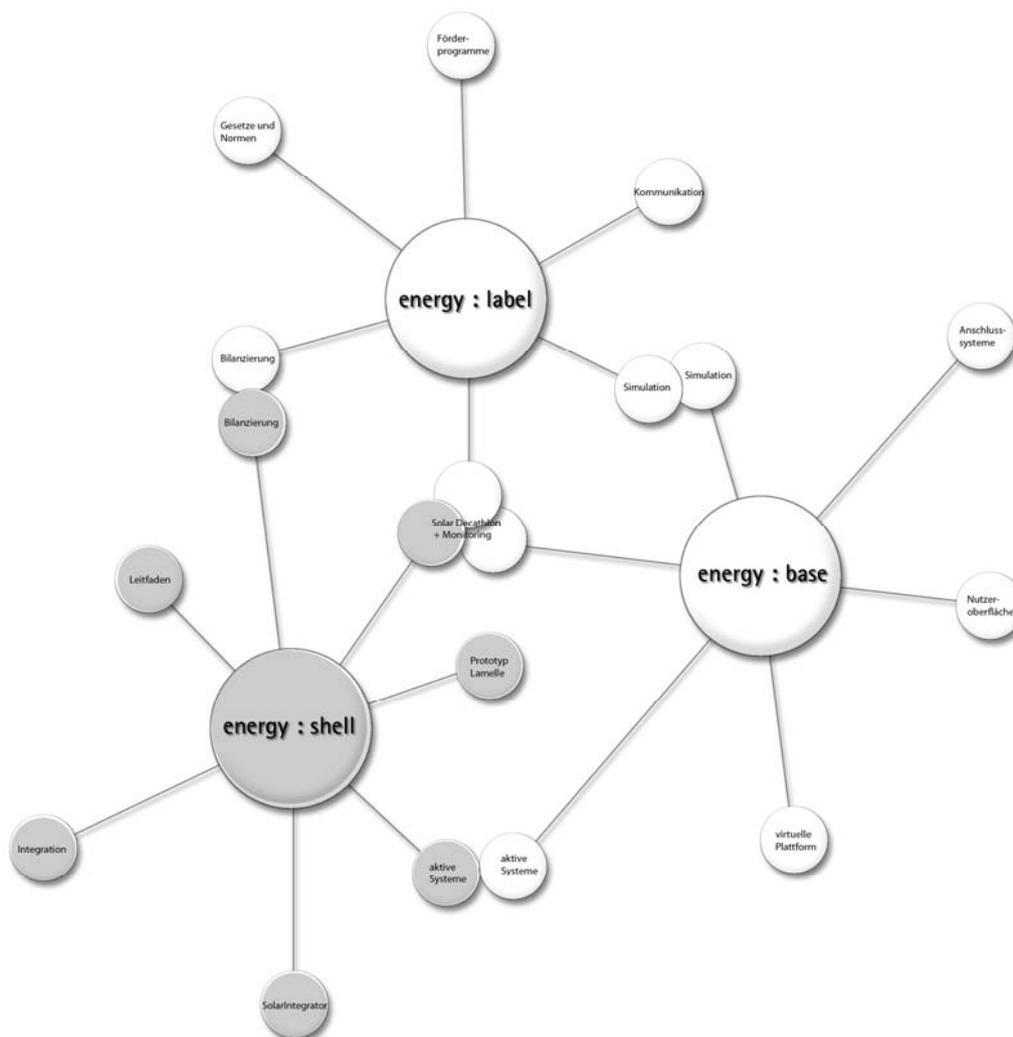


Abb 1 Vernetzung der drei Forschungsprojekte, Quelle: FG. ee

## Inhaltsverzeichnis

Forschungsprojekt energy:shell	1
Forschungsinitiative ZukunftBau	2
Abschlussbericht	2
Verfasser	2
Forschungsgruppe energy:projekte am Fachgebiet ee	3
1    Forschungsziel Energy:Shell	7
1.1    Leitfaden zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle.	7
2    Untersuchungsmethodik	9
2.1    Recherche und systematische Analyse sowie Dokumentation der am Markt vorhandenen Systeme, Dokumentation in Form eines Leitfadens.	9
2.2    Methodische Analysen vorhandener Solarrechner sowie Vorstudie für ein Berechnungstool zur Integration solarer Systeme im Wohnungsbau (Solarintegrator).	10
2.3    Produktentwicklung, Prototyp und Test für die Lamellenfassade.	10
3    Leitfaden zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle	11
3.1    Planungsgrundlagen	12
3.1.1    Geographische Lage	12
3.1.2    Ausrichtung	16
3.1.3    Verschattung	18
3.1.4    Rechtliche Parameter	20
3.1.5    Thermisches Verhalten	21
3.2    Grundlagen Gebäudeintegration	22
3.2.1    Integrationsformen	23
3.2.2    Solarthermische Fassaden und Dächer	24
3.2.3    Solarstromaktivierte Fassaden und Dächer	25
4    Integration Photovoltaik	29
4.1    Projektbeispiele	29
4.1.1    Flachdach	30
4.1.2    Geneigtes Dach	34
4.1.3    Fassade	36
4.1.4    Fassade / Sonnenschutz	47
4.1.5    Flachdach / Sonnenschutz	51
4.1.6    Systeme in der Entwicklung	53

4.2	Grundlagen Photovoltaik	54
4.2.1	Funktionsprinzip	54
4.2.2	Solarzellen	55
4.2.3	Kristalline Solarzellen	56
4.2.4	Dünnschichttechnologie	57
4.2.5	Wirkungsgrad	58
4.2.6	Photovoltaikmodule	60
4.2.7	Anlagenkomponenten	60
4.2.8	Kostenentwicklung	61
4.2.9	Vergütung	62
4.3	Zelltypen	64
4.3.1	Monokristalline Siliziumzellen   c-Si	64
4.3.2	Polykristalline Siliziumzellen   c-Si	65
4.3.3	Amorphe Siliziumzellen   a-Si	66
4.3.4	Kupfer-Indium-Selen-Zellen   CIS Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Zellen   CIGS	67
4.3.5	Cadmium-Tellurid-Zellen   CdTe	68
4.3.6	Farbstoffsolarzelle   Grätzel-Zelle	69
4.3.7	Organische Solarzellen	70
5	Solarthermie	71
5.1	Grundlagen Solarthermie	71
5.1.1	Funktionsprinzip	71
5.1.2	Wirkungsgrad / Nutzungsgrad	72
	Systemkomponenten	73
5.2	Projektbeispiele – Solarthermie (flüssigkeitsgeführte Solarkollektoren)	79
5.2.1	Fassadenintegration	80
5.2.2	Geneigtes Dach	82
5.2.3	Flachdach	86
5.3	Grundlagen Luftkollektor (luftgeführter Solarkollektor)	87
5.3.1	Funktionsprinzip	87
5.3.2	Systeme	88
5.3.3	Wärmespeichernde Elemente – kollektorintegriert oder gesondert	89
5.3.4	Kenndaten	90
5.3.5	Synergien	90
5.4	Projektbeispiele Luftkollektor	92
	Fassadenintegration	92

Geneigtes Dach / Fassade	92
5.4.1 Fassadenintegration	93
5.4.2 Geneigtes Dach / Fassade	96
5.5 Überblick Hybridkollektoren	98
5.5.1 Photovoltaikanlage mit integriertem Luftkollektor	98
5.5.2 Hybridkollektor PV und flüssigkeitsgeführte Solarthermie	99
5.5.3 Wasser-Luft-Hybridkollektoren	100
6 SolarIntegrator	101
7 Produktentwicklung	107
7.1 Ausgangssituation	107
7.2 Anforderungsprofil	107
7.2.1 Witterung	107
7.2.2 Sonnenschutz / Sichtschutz / Energiegewinnung	108
7.3 Aufbau der Lamelle	109
7.3.1 Beanspruchung / Eigenschaften	109
7.3.2 Formgebung	109
7.3.3 Photovoltaikzelle	110
7.4 Steuerung / Antrieb	113
7.4.1 Verdrahtung	113
7.4.2 Antrieb	114
7.4.3 Motor	114
7.5 Einbau der Lamelle	115
7.5.1 Rahmenaufbau	115
7.5.2 Fassadenaufbau	116
7.6 Prototypenbau	116
7.7 Erkenntnisse	116
7.8 Ausblick	118
7.8.1 Leitfaden zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle.	118
7.8.2 Solarintegrator	118
7.9 Produktentwicklung	119
8 Abbildungsverzeichnis	120

## 1 Forschungsziel Energy:Shell

### 1.1 Leitfaden zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle.

Seit vielen Jahren werden Solaranlagen an Gebäuden angebracht, aufgeständert auf Dächern und Gestellen und an Fassaden angelehnt. Ihre Beziehung zu den Gebäuden wirkt eher zufällig oder provisorisch. Eine dauerhaft wirkende, technische und gestalterische Integration ist eher selten, würde jedoch die Akzeptanz dieser neuen Bauteile wesentlich erhöhen können.

Laut einer Studie des Bundesverbandes Solarwirtschaft werden lediglich 1 % der verbauten Photovoltaikmodule und -anlagen in die Gebäudehülle integriert. Es eröffnet sich also ein kaum genutztes Feld, das zur Steigerung von System- und Gebäudeeffizienz beitragen kann und zudem neue Gestaltungsmöglichkeiten bietet.

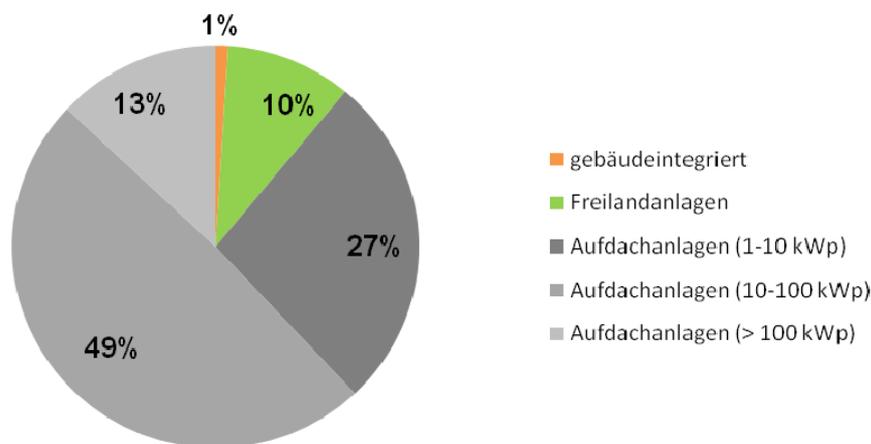


Abb. 2 Marktsegment Photovoltaikanlagen in Deutschland, Quelle: Bundesverband Solarwirtschaft

Vor diesem Hintergrund soll der hier vorliegende Leitfaden als eine Art Planungshilfe zur Integration von Photovoltaik und Solarthermie dienen. Weiter soll er in der Verknüpfung mit einem realen, kleinen Bauprojekt beispielhaft Möglichkeiten solcher Integrationen entwickeln helfen. Es geht also darum, das Verständnis für grundlegende Zusammenhänge zu schärfen und den Horizont der vielfältigen, guten Möglichkeiten zur Gebäudeintegration für praktizierende Planer aufzuzeigen. Auf diese Weise können die

Vorteile der Hüllintegration vermittelt und damit die Technologien auf dem Markt besser verankert werden.

Um das beschriebene Ziel zu erreichen, sind zunächst grundlegende Untersuchungen zur Hüllintegration angestellt worden, die Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, Ästhetik und Synergieeffekte ebenso berücksichtigen, wie Anlageneffizienz, Ausrichtung oder Standortverhältnisse.

In einem weiteren Rechenschritt sind Möglichkeiten der Hüllintegration unter dem Blickwinkel Dach- und Fassadeintegration analysiert und bewertet worden. Es liegt nahe, solare Systeme gerade dort einzusetzen, wo eine optimale Einstrahlung der Sonne vorzufinden, ihre Auswirkungen auf die Nutzung jedoch unerwünscht sind. Hier können Energie erzeugende Sonnenschutzsysteme Synergien von Sonnenschutz und Energiegewinnung erzeugen. Der Einsatz von Solarmodulen als Fassadenelemente ist ebenfalls realisierbar, im Bereich der Dachbeläge sind zahlreiche Entwicklungen festzustellen. Um die Bandbreite der Möglichkeiten darstellen zu können und neben vorhandenen Einsatzmöglichkeiten auch neue Wege aufzuzeigen, sollen generell die Gestaltungsmöglichkeiten von und mit Photovoltaik und Solarthermie dargestellt werden. Diese werden in Form eines Handbuchs dokumentiert.

Der Antragsteller wurde als einzige deutsche Universität zum internationalen Hochschulwettbewerb Solar Decathlon 2007 zugelassen. Das übergeordnete Gesamtziel des Wettbewerbs ist die Entwicklung und Realisierung eines Prototyps für ein Plusenergiehaus mit Marktfähigkeit im Jahre 2015. Das Team des Antragstellers hat mit seinem Beitrag durch den Einsatz von innovativen Technologien und Materialien und in der Integration solarer Systeme neue Wege aufgezeigt, bei denen die vorher beschriebenen Untersuchungen eine äußerst nützliche Grundlage waren.

Die Verbindung von Leitfaden und realer Umsetzung im Rahmen des Pilotprojektes Solar Decathlon will somit die Handhabbarkeit und unmittelbare Umsetzungsfähigkeit verdeutlichen und zu weiteren Entwicklungsschritten anregen.

## 2 Untersuchungsmethodik

Im Zuge der Bearbeitung dieser Studie werden entsprechend drei Schwerpunkte bearbeitet:

2.1 Systematische Analyse und Dokumentation der am Markt vorhandenen Systeme, aktuelle Neuerungen sowie zukünftige Möglichkeiten in Form eines Leitfadens.

2.2 Methodische Analyse vorhandener Solarrechner sowie Vorstudie für ein Berechnungstool zur Integration solarer Systeme für den Wohnungsbau (Solarintegrator).

2.3 Produktentwicklung, Prototypenbau und Tests für eine energieerzeugende Lamellen-Sonnenschutzfassade.

### **2.1 Recherche und systematische Analyse sowie Dokumentation der am Markt vorhandenen Systeme, Dokumentation in Form eines Leitfadens.**

Zunächst wurden systematisch unterschiedliche Strategien der Verbindung energieerzeugender Systeme mit der Gebäudehülle untersucht. Sie können hierbei von der Gebäudehülle getrennt als eigenständige Elemente wahrnehmbar sein, in die Gebäudehülle integriert sein oder synergetisch viele weitere Funktionen der Gebäudehülle übernehmen.

Entsprechend wurden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Nutzung der Gebäudehülle für energetische Zwecke systematisch dargestellt und bewertet. Diese Studie soll Planern und Bauherrn einen entsprechenden Einblick in den aktuellen Stand der Technik und die Potentiale von photovoltaischen und solartechnischen Systemen in Verbindung mit der Gebäudehülle vermitteln. Dabei wurden Parameter herausgearbeitet, die für eine sinnvolle Gebäudeintegration stehen und zur Gewährleistung von Effizienz und Nachhaltigkeit gelten können.

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wurde ein Grundlagenkatalog zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle generiert.

Aus der kritischen Betrachtung und Auswertung von Beispielen ist eine Sammlung entstanden, die Planern und Bauherrn einen Einblick in den aktuellen Stand und deren Potentiale ermöglicht. In der Entwicklung befindliche Beiträge sowie zukunftsorientierte Möglichkeiten der Integration energiegewinnender Systeme sind ebenfalls dargestellt.

## **2.2 Methodische Analysen vorhandener Solarrechner sowie Vorstudie für ein Berechnungstool zur Integration solarer Systeme im Wohnungsbau (Solarintegrator).**

In einem weiteren Entwicklungsschritt werden die Grundlagen für einen sogenannten „Solarintegrator“ gelegt. Der Solarintegrator ist ein interaktives Planungs- und Kommunikationsmittel für Architekten, Planer und Bauherren, das als webbasiertes Tool Aussagen über Anlageneffizienz solarer Systeme und deren Gebäudeintegration erzeugen soll. Zusätzlich soll der Solarintegrator als Kommunikationsinstrument bei der Entwurfsplanung Unterstützung durch Darstellung von bereits realisierten Projekten oder bei der Entwicklung einer prozessbegleitenden Ideallösung liefern.

Zum Zeitpunkt der Recherche waren keine vergleichbaren Solarrechner verfügbar, die eine Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle in das Eingabeschema einbeziehen oder dieses Thema in anderer Weise mit behandeln.

Da die Anwendung auch besonders für Laien verständlich gehalten werden soll, ist er eng mit dem erläuternden Leitfaden verknüpft. Um eine breite Zielgruppe bedienen zu können, mussten die nötigen Eingaben auf ein Minimum reduziert werden, ohne die Zuverlässigkeit des Ergebnisses, welches für Planende wie interessierte Laien in Entwurf sowie Ausführungsplanung von Nutzen sein soll, zu schwächen.

## **2.3 Produktentwicklung, Prototyp und Test für die Lamellenfassade.**

Die Photovoltaik-Sonnenschutzlamellen-Fassade entstand als Idee für ein Bauteil, das Sonnenschutz, Blendschutz und Energieerzeugung verbindet und die für die Energieerzeugung nutzbare Oberfläche der Gebäudehülle maximiert. Die klassischen Funktionen eines Lamellenladens, wie Überhitzungsschutz, Sichtschutz und Witterungsschutz, sollten durch eine energetische Komponente ergänzt werden.

Im Zuge der Bauteilplanung wurden unterschiedliche Varianten einer Lamellenfassade untersucht. Sie sollte schiebbar, faltbar, klappbar und drehbar sein. Unter diesen Maßgaben wurde die horizontal gelagerte, drehbare Lamelle in einem vertikalen Faltrahmen entwickelt.

Die einzelnen Planungsstände wurden in Prototypen umgesetzt. Die Anforderungen an das Produkt konnten anhand von Prototypen getestet und modifiziert werden. Die Erkenntnisse aus diesen Prototypen flossen in den Planungsprozess zurück und ermöglichten eine Optimierung bis zur baureifen Werkstattzeichnung. Diese wurde in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit den erforderlichen Informationen zur Steuerung und Nachführung sowie Verschaltung ergänzt.

Anhand der ersten Kleinserie, die am Gebäude des Wettbewerbsbeitrags zum Solar Decathlon 2007 installiert ist, konnten und können weitere Tests in Bezug auf Energiegewinnung, Materialbeständigkeit und mechanische Funktionalität sowie Nachführung und Steuerung erfolgen. Die Erfahrungen hieraus werden zur weiteren Produktentwicklung beitragen.

### 3 Leitfaden zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle

Der zunehmende Einsatz Energie gewinnender Systeme in Verbindung mit Gebäuden lässt es sinnvoll erscheinen, die Integration und die gestalterischen Anforderungen ihres Einsatzes näher zu betrachten und allgemeingültige Hinweise zu formulieren. Hier liegen in Zukunft ganz neue Gestaltungs- und Entwicklungsfelder, die von Planern und Architekten erkannt und genutzt werden können, um einen selbstverständlichen Einsatz der benannten Technologien zu erzielen. Im hier vorliegenden Leitfaden sollen daher die Möglichkeiten und die ungenutzten Potentiale der Integration dargestellt werden und zur Entwicklung neuer Konzepte anregen.

Hierzu ist neben dem Einsatz vorhandener auch die Entwicklung neuartiger Bauelemente notwendig. Hüllbauteile werden damit gleichzeitig zu einem Bestandteil der Haustechnik, ihre eigentlichen Produkteigenschaften um die energiegewinnende Funktion erweitert. Dies erfordert nicht nur technische Kenntnisse, sondern stellt auch gestalterisch eine große neue Herausforderung dar.

Im Folgenden werden die Planungsgrundlagen sowie die Möglichkeiten einer technisch-gestalterischen Einbindung in die Gebäudehülle dargestellt und die Auswirkungen auf den Planungsprozess und dessen verschiedene Leistungsphasen beschrieben.

Die wichtigsten Grundlagen zur Planung gebäudeintegrierter solarer Systeme sind:

Geographie / Standort

Ausrichtung

Verschattung

Rechtliche Parameter

Thermisches Verhalten

### 3.1 Planungsgrundlagen

#### 3.1.1 Geographische Lage

Deutschland befindet sich in der gemäßigten Klimazone, in der unterschiedliche Strahlungsintensitäten, hohe jährliche Temperaturunterschiede, mittlere bis geringe tägliche Temperaturunterschiede, mittlere bis hohe relative Luftfeuchte und mittlere Niederschlagsmengen herrschen.

Entscheidend für den Energieertrag und somit die Effizienz aktiver solarer Systeme (Photovoltaik und Solarthermie) ist die einfallende Globalstrahlung am Gebäudestandort. Je nach geographischer Lage sind unterschiedliche Energiegewinne zu erwarten. Generell ist die Globalstrahlung in direkte Strahlung, diffuse Strahlung und Reflexstrahlung zu unterscheiden. Die Intensität der jeweiligen Globalstrahlung ist abhängig vom Breitengrad und lokalen Randbedingungen.

Südliche Regionen sind wegen der höheren Globalstrahlung besser für Solaranlagen geeignet. Aber moderne Solaranlagen erzielen auch bei diffuser Strahlung gute Erträge. Die Globalstrahlung beträgt in Mitteleuropa durchschnittlich ca.

1.100 kWh/m<sup>2</sup>a. In Deutschland ist ein Nord-Süd-Gefälle zu erkennen, das südlich gelegene Freiburg weist mit rund 1.160 kWh/m<sup>2</sup> pro Jahr ein circa 20 % höheres Solarangebot auf als Hamburg mit ca. 950 kWh/m<sup>2</sup>a.

Die Solareinstrahlung unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen, wobei rund zwei Drittel des solaren Energieangebotes in Deutschland zwischen April und September zur Verfügung stehen.

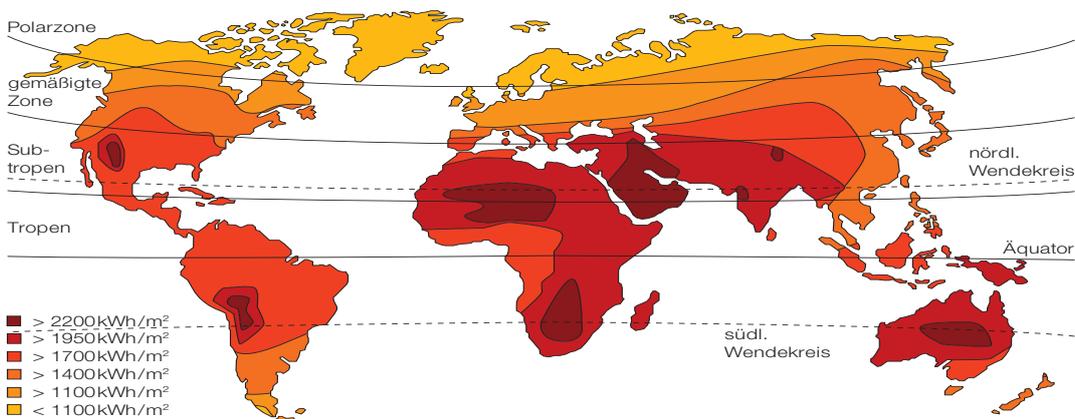
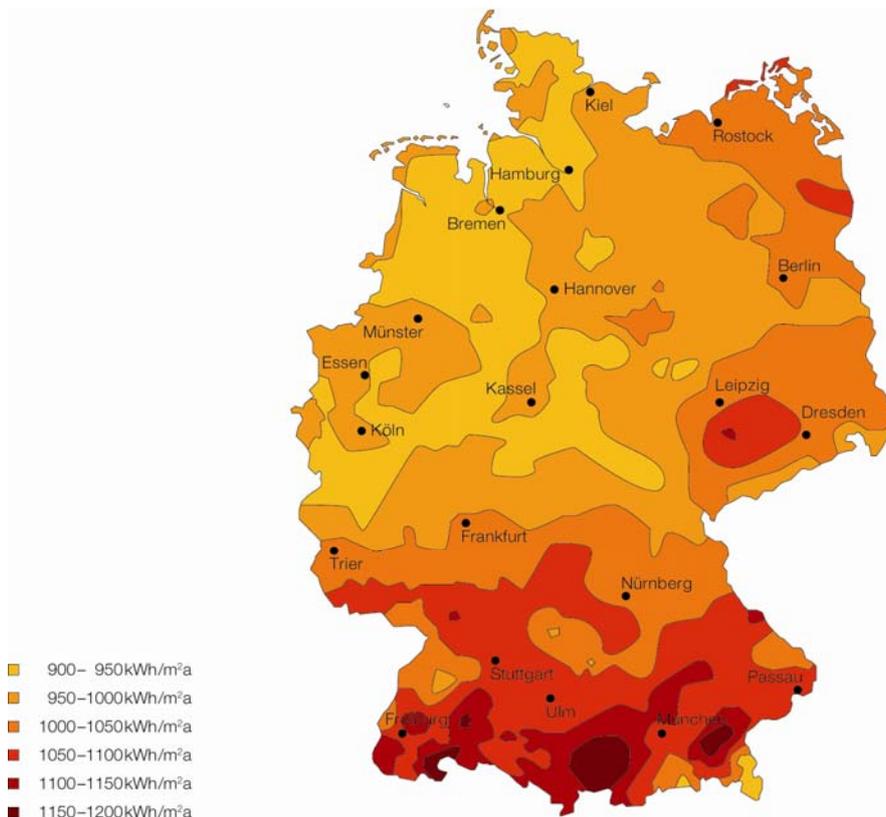


Abb. 3 Mittlere jährliche Globalstrahlung weltweit, Quelle: Hegger et al. 2007, S. 51



Die Dimension der Globalstrahlung ist nicht Leistung sondern Arbeit. Sie ergibt sich also aus der Strahlungsstärke der Sonne multipliziert mit der Sonnenscheindauer eines Tages.

Abb. 4 Mittlere jährliche Globalstrahlung, Quelle: Hegger et al. 2007, S. 53

Wichtig sind außerdem die Kenntnis über die Dauer bzw. Richtung der Sonneneinstrahlung und die Beachtung möglicher Verschattung aus umgebender Bebauung oder Baumbestand. Während sich der maximale Ertrag über das Jahr betrachtet durch einen definierten, optimalen Aufstellwinkel definiert, bestimmt sich die optimale Orientierung für einen besonderen Nutzungszweck (Heizungsunterstützung, gute Erträge bei diffuser Strahlung) aus anderen Parametern, wie dem Nutzungszeitraum.

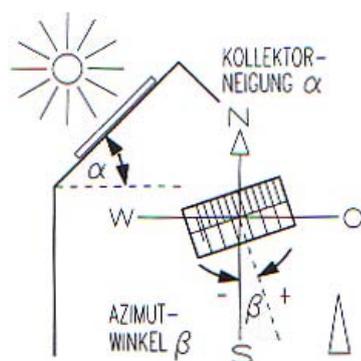


Abb. 5 Kollektorneigung und Azimutwinkel, Quelle: Pistohl 2007a, S. B54

<b>Sonnenscheindauer</b>	<b>h/a</b>
Jährliche Sonnenscheindauer	1400-1900
Sommerhalbjahr (April bis September)	1000-1400
Winterhalbjahr (Oktober bis März)	400-500
<b>Bestrahlungsstärken</b>	<b>kW/m<sup>2</sup></b>
Maximale Strahlungsleistung auf eine senkrecht bestrahlte Fläche	etwa 1,0
Strahlungsleistung bei sehr dichter Bewölkung	ca. 0,02
Diffuse Strahlung bei bewölktem Himmel mit vollständig verdeckter Sonne	etwa 0,02-0,25
<b>Eingestrahle Energiemengen</b>	<b>kWh/m<sup>2</sup></b>
Jährliche Einstrahlung auf eine horizontale bzw. 45° nach Süden geneigte Fläche	900-1200
Maximalwert der täglichen Einstrahlung (sehr klares Sommerwetter)	ca. 8 kWh/m <sup>2</sup> d
Minimalwert der täglichen Einstrahlung (sehr trübes Winterwetter)	ca. 0,1 kWh/m <sup>2</sup> d
Mittelwert der täglichen Einstrahlung an den 100 besten Sonnentagen im Jahr	ca. 5,5 kWh/m <sup>2</sup> d
Mittelwert der täglichen Einstrahlung an den 100 ungünstigsten Tagen im Jahr	<1kWh/m <sup>2</sup> d

Abb. 6 Zusammenfassung der Sonnenstrahlungsdaten in Deutschland; Quelle: Pistohl 2007b, S. 186

Die Einfallswinkel bzw. Sonnenhöhenwinkel  $\alpha$  entstehen durch die Neigung der Erdoberfläche und die Drehung der Erde um die Sonne. Am 21. 3. und am 23. 9. herrscht Tag- und Nachtgleiche, an diesen Tagen steht die Sonne senkrecht über dem Äquator.

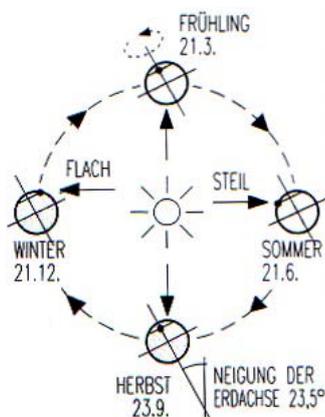


Abb. 7 Einstrahlungswinkel, Quelle: Pistohl 2007b, S. 184 (links)

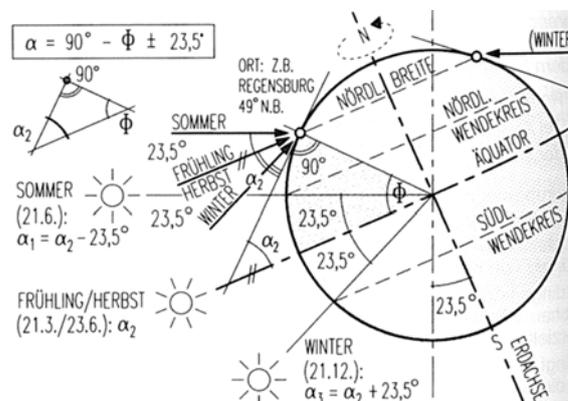


Abb. 8 Berechnung des Sonnenhöhenwinkels, Quelle: Pistohl 2007b, S.184 (rechts)

Der Azimutwinkel  $\beta$  gibt die Abweichung zur Südrichtung an. Im Winter verläuft die Sonnenbahn flacher als im Sommer (siehe Abb. 5), außerdem ist die Sonnenscheindauer kürzer. Daher wird in den Wintermonaten nur die Südseite über längere Zeit beschienen.

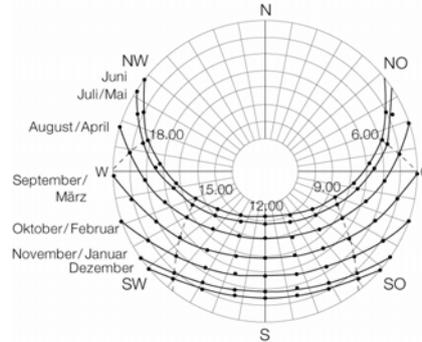
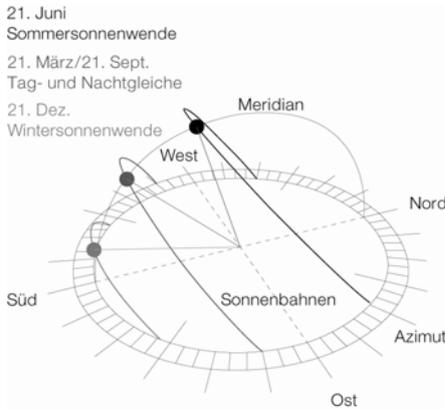


Abb. 9 Jährlicher Sonnenverlauf auf der Nordhalbkugel, Quelle: Hegger et al. 2007, S. 54 (links)

Abb. 10 Sonnenstanddiagramm für 51° nördlicher Breite (jeweils am 21. jeden Monats), Quelle: Hegger et al. 2007, S. 54 (rechts)

## ➔ Checkliste Standort

Um Sonnenenergie optimal nutzen zu können, sind folgende Parameter zu ermitteln und beachten:

- Einstrahlung am jeweiligen Ort
- Sonnenverlauf am jeweiligen Ort  
Sonnenhöhenwinkel  $\alpha$  (Neigungswinkel zur Horizontalen)  
Azimutwinkel  $\beta$ , (Abweichung der Fläche zur Südrichtung)

Mittels der genannten Parameter und einem durchschnittlichen Modulwirkungsgrad können die zur Aktivierung benötigte Fläche und die erzielbaren Erträge bestimmt werden.

LP **1** Grundlagenermittlung

### 3.1.2 Ausrichtung

Die optimale Ausrichtung von Solarenergie gewinnenden Flächen ist abhängig vom Standort (Breitengrad), der einzusetzenden Technik und dem gewünschten Nutzungsprofil.

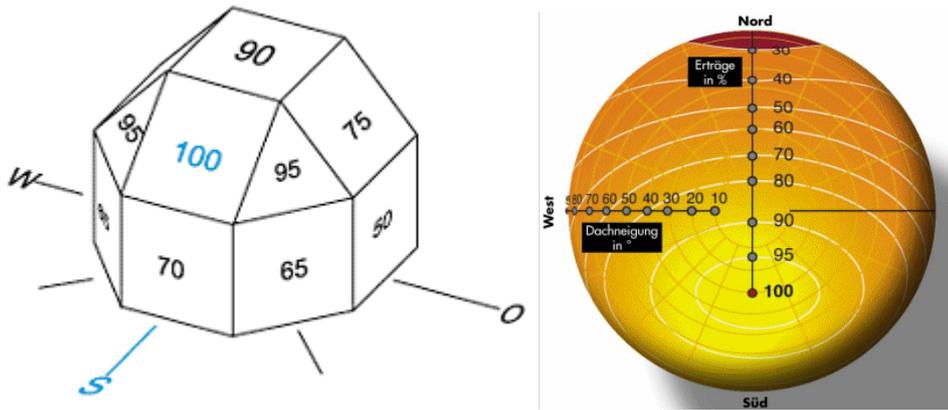


Abb. 11 Anteilmäßige Energieerträge für verschiedene Ausrichtungen solaraktiver Flächen (Referenz = Energieertrag bei optimaler Ausrichtung), Quelle: [www.agsn.de/fileadmin/user\\_upload/Artikel/PV\\_Ausrichtung.gif](http://www.agsn.de/fileadmin/user_upload/Artikel/PV_Ausrichtung.gif)

Abb. 12 Energieertrag in Abhängigkeit der Neigung und Orientierung; Quelle: [www.bine.info](http://www.bine.info)

#### Solarthermie

Bei solarthermischen Systemen spielt für die Planung insbesondere das Nutzungsprofil eine wichtige Rolle. Zur reinen Warmwassererzeugung sollte man die Kollektorfläche effizienzoptimiert mit einem flachen Aufstellwinkel von ca. 30 Grad montieren. Wer ganzjährig Sonnenwärme auch für die Heizung nutzen will, sollte die Fläche auf das Winterhalbjahr hin optimieren. Dies bedeutet einen optimalen Aufstellwinkel von 40-60 Grad, der zu einer flacheren Ertragskurve in den heißeren Monaten, aber zu höheren Erträgen in den Übergangszeiten führt. Einbauten in ein Flachdach oder die Fassade führen zu geringerer Effizienz pro Flächeneinheit, können jedoch die solar aktivierbare Fläche und damit den erreichbaren Gesamtertrag deutlich steigern.

Nutzungszeitraum	Kollektor-Neigungswinkel	
	anzustreben	möglich
Januar-Dezember (ganzjährig)	40°-50°	30°-60°
April-September (nur Sommer)	30°-40°	20°-50°
Mai-August (saisonbedingt)	25°-35°	15°-45°

## Photovoltaik

Im Gegensatz zur solaren Wärmeerzeugung ist das System der solaren Stromerzeugung in der Regel auf eine Maximierung der Erträge über das gesamte Jahr ausgelegt.

In Deutschland erreicht man mit einer Neigung von ca. 30° zur horizontalen, nach Süden geneigten Fläche optimale Energieerträge. Für ausgewählte andere Ausrichtungen sind die prozentualen Energieerträge für photovoltaische Nutzung in oben gezeigter Abbildung dargestellt.

Wie für die Solarthermie gilt auch für die Photovoltaik, dass eine unmittelbare Integration in die Gebäudehülle auch bei geringerem Ertrag pro qm gebäudebezogen insgesamt einen höheren Ertrag bewirken kann. Da bei der Photovoltaik die diffuse Strahlung zum Energiegewinn in stärkerem Umfang beiträgt als bei der Solarthermie, sind die Verluste bei suboptimalem Anstellwinkel hier deutlich geringer.



### **Checkliste Ausrichtung**

Folgende Parameter sind bereits im Gebäudevorentwurf entscheidend für die Planung und Auslegung integrierter Systeme:

- Art der einzusetzenden Technik  
Solarthermie/PV  
Wirkungsgrad  
Typ
- Ziel des Technikeinsatzes  
Nutzungsprofil
- Standortbedingungen  
Breitengrad

LP **2** Vorplanung

### 3.1.3 Verschattung

Ein weiterer Einflussfaktor für die Effizienz einer Solaranlage sind eventuelle Verschattungen z.B. durch Vegetation, Umgebungsbebauung oder Gebäudeteile (z.B. Schornsteine). Im Bereich der Verschattung kann das Energieerzeugungssystem ausgespart oder aus ästhetischen Gründen mit Blindmodulen versehen werden.

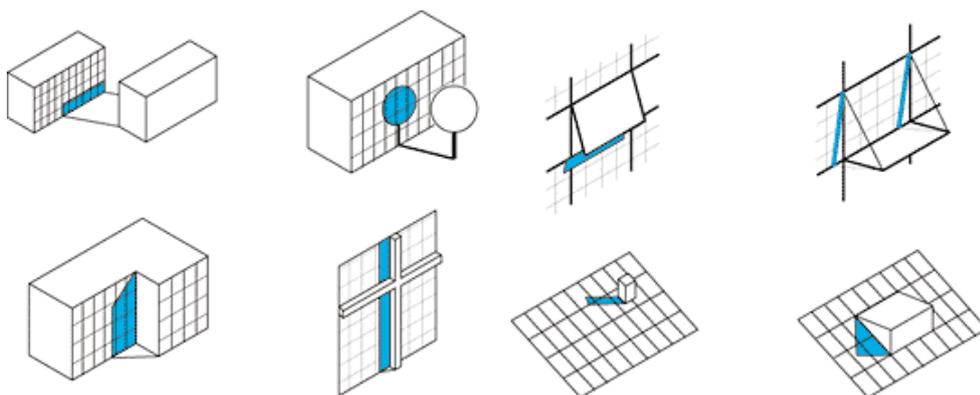


Abb. 13 Mögliche PV-Verschattung, Quelle: [www.agsn.de/fileadmin/user\\_upload/Artikel/PV\\_Abschattung.gif](http://www.agsn.de/fileadmin/user_upload/Artikel/PV_Abschattung.gif)

Mit Hilfe eines „energy mappings“ kann man eine energetische Standortanalyse erstellen, die Aufschluss über das nutzbare solare Energieangebot und die jeweiligen Lichtverhältnisse gibt. Die grafische Darstellung der Fassadenabwicklung macht es möglich, die Intensität sowie die jahres- und tageszeitliche Verteilung der solaren Einstrahlung darzustellen. Dies gibt Aufschluss über die energetische Nutzbarkeit dieser Flächen für passive Maßnahmen oder aktive solare Nutzung mit Solarthermie oder Photovoltaik. Hieraus ergeben sich aber auch Hinweise für eine optimierte Formgebung des Baukörpers und für eine mögliche Zonierung der Nutzungen.

Infolge von partiellen Verschattungen kann es bei Photovoltaikmodulen zu deutlichen Leistungseinschränkungen kommen. Bei einer Reihenschaltung der Zellen führt die Abschattung einer einzelnen Zelle zu einer Leistungsreduzierung des gesamten Moduls. Die verschattete Zelle verhält sich in diesem Fall wie ein elektrischer Widerstand. Der Solarstrom der anderen, mit dieser Zelle in Reihe geschalteten Zellen kann dann nicht weiterfließen und wird stattdessen in der verschatteten Zelle in Wärme umgewandelt. Um diese Verschattungsproblematik zu minimieren, können sogenannte ‚Bypass-Dioden‘ eingebaut werden. Hierdurch wird der verschattete Bereich umgangen. Bei der Solarthermie ergibt sich aus einer Teilverschattung demgegenüber lediglich eine Abminderung des Ertrages auf der verschatteten Fläche.

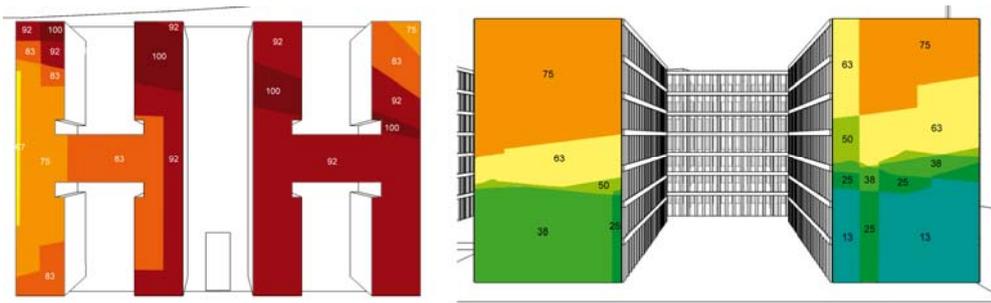


Abb. 14 Darstellung der Sonnenscheindauer in Prozent auf einem Dach und einer Fassade, / Quelle: FG\_ee

Mit Softwareprogrammen lassen sich Sonnenscheindauer und –intensität auf Gebäudeflächen abbilden, um Schlussfolgerungen über mögliche Belegungen von Bauteilen oder Anpassungen des Baukörpers zu ziehen.



### **Checkliste Verschattung**

Um einen effizienten Betrieb solartechnischer Anlagen zu gewährleisten, sollten im Vorfeld untersucht werden:

- mögliche Verschattungen am Standort
- Solarstrahlungsverteilung am Baukörper (energy mapping)
- Reaktion auf eventuelle Verschattungen gemäß unterschiedlicher Technologie (PV/Solarthermie)

Nachdem der Baukörper im Vorfeld durch Analyse des Standortes und Optimierung der Ausrichtung idealerweise geformt wurde, können auf Basis der Untersuchungen der Verschattung die optimalen Flächen zur Integration benannt werden.

### 3.1.4 Rechtliche Parameter

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen des Baugesetzbuches (BauGB) sowie die Landesbauordnungen (LBO). Zusätzlich sind der Denkmalschutz, die Ortssatzungen und ggf. statische Vorschriften zu beachten.

Bei Aufdachanlagen handelt es sich in der Regel um genehmigungsfreie Vorhaben. Die Bundesländer haben eine solche Genehmigungsfreiheit für Solaranlagen, bei Aufdachmontage unter bestimmten Voraussetzungen erlassen. Denkmalgeschützte Bauten sind von dieser Genehmigungsfreiheit ausgeschlossen.

Eine nachbarschaftliche Zustimmung ist für die Errichtung einer Solaranlage nicht erforderlich.

Im Zuge einer geplanten Installation von solaren Systemen ist, soweit vorhanden, der Bebauungsplan einzusehen. Dieser kann Bestimmungen enthalten, die dennoch eine Genehmigung erforderlich machen können.

Die Vorschriften der Bauprodukte und Bauarten müssen zwingend eingehalten werden. Bei Überkopfinstallationen (z. B. mit Glas-Glas-Modulen) ist neben der DIN auch die TRLV (Technische Regel für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen) zu beachten.

Um das Ziel eines erhöhten Einsatzes Erneuerbarer Energien im Gebäudebereich zu erreichen, reglementiert und fördert die Bundesregierung den Einsatz der entsprechenden Technologien. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) beispielsweise fördert den Ausbau Erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung mit einer Mindesteinspeisevergütung. In folgender Tabelle sind diese dargestellt. Es ist zu beachten, dass jedes Jahr eine Anpassung der Sätze stattfindet. Deshalb sollte man sich vor jeder Planung über aktuelle jährliche Sätze informieren.

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Gebäudeanlagen (<= 30 kW)	54,53 ct	51,80 ct	49,21 ct	46,75 ct	43,01 ct	39,57 ct	36,01 ct	32,77 ct	29,82 ct
30 kW - 100 kW	51,87 ct	49,28 ct	46,82 ct	44,48 ct	40,91 ct	37,64 ct	34,25 ct	31,17 ct	28,36 ct
100 kW - 1000 kW	51,30 ct	48,74 ct	46,30 ct	43,99 ct	39,58 ct	35,62 ct	32,42 ct	29,50 ct	26,84 ct
Fassadenbonus	5,00 ct	5,00 ct	5,00 ct	5,00 ct	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	Entfällt
Freiflächenanlagen	43,42 ct	40,60 ct	37,96 ct	35,49 c	31,94 ct	28,75 ct	26,16 ct	23,80 ct	21,66 ct

Abb. 15 Einspeisevergütungssätze für Solarstromanlagen; Quelle: <http://www.thema-energie.de>

Durch das Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz (EE-WärmeG) wird seit 01.01.2009 parallel zum EEG der Einsatz Erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung gefördert. Ziel ist es, bis 2020 eine Deckung von 14 Prozent zu erreichen. Die dadurch festgelegte Verpflichtung  
 Abschlussbericht | Stand: 26.02.2009

tung von Eigentümern neuer Gebäude zur anteiligen Energiebedarfdeckung durch Erneuerbarer Energien kann neben Geothermie, Biomasse etc. auch durch Solarwärme gedeckt werden. Für Wärme aus Solarenergie schreibt das Gesetz vor, dass eingesetzte Solarkollektoren eine Fläche von mindestens  $0,04 \text{ m}^2$  pro  $\text{m}^2$  beheizter Nutzfläche aufweisen. Bei einer Wohnfläche von beispielsweise  $150 \text{ m}^2$  sind also  $6 \text{ m}^2$  vorgeschrieben.



#### **Checkliste *rechtliche Parameter***

Für die Planung solaraktiver Anlagen müssen die jeweils geltenden Gesetze und Normen beachtet werden:

- Baugesetzbuch
- Landesbauordnung
- EEG
- EE-WärmeG

Durch Subventionen wie das EEG stellen sich Anlagen zudem wirtschaftlich rentabler dar.

LP **4** Genehmigungsplanung

### **3.1.5 Thermisches Verhalten**

Photovoltaikanlagen sind mehr oder weniger Wärme empfindlich. Gerade bei optimalen Bedingungen (langer, intensiver Sonnenschein) kann demnach ein Energieverlust drohen.

Die am häufigsten verwendeten Zelltypen sind aus kristallinem Silizium. Diese reagieren empfindlich auf steigende Zelltemperaturen. Mit jedem Grad Temperatursteigerung liefern sie ca. 0,5 % weniger Leistung. Die normierte Leistung eines Solarmoduls wird vom Hersteller pro m<sup>2</sup> auf 1.000 Watt Einstrahlung und 25°C Zelltemperatur als Maximalleistung in Watt Peak (Wp) angegeben. Für diese Zellen ist es wichtig, dass sie mit einer ausreichenden Hinterlüftung eingebaut werden. Die vorbeistreichende Luft kühlt die Zellen ab, um die Leistungsfähigkeit möglichst hoch zu halten.

Andere Solarzellmaterialien wie Dünnschicht- Triple-Solarzellen aus amorphem Silizium oder CIS-Solarzellen weisen demgegenüber keine oder nur geringe Empfindlichkeit gegenüber Temperaturerhöhungen auf.

Eine weitere Möglichkeit ist die Kühlung mittels Regenwasser, das zunächst in Zisternen gespeichert wird, um später über die Solarmodule geleitet oder gesprüht zu werden.

Durch die Verdunstung des Wassers werden die Module gekühlt. Die Kühlung kann auch für die Reinigung von eventuell verschmutzten Oberflächen (Pollen, etc.) sorgen.



### **Checkliste *thermisches Verhalten***

Zur weiteren Betriebsoptimierung gebäudeintegrierter Solartechnik sind ausreichende thermische Verhältnisse in der Detailausbildung und Konstruktion zu schaffen:

- Notwendige Kühlung je nach Technologie schaffen (Hinterlüftung, Wassergeführte Kühlung etc.)
- Untersuchung möglicher Synergienutzung (z.B. Ausbildung von Hybridkollektoren)

LP **5** Ausführungsplanung

## **3.2 Grundlagen Gebäudeintegration**

Für die Integration solarer Systeme in die Gebäudehülle können unterschiedliche Prinzipien zur Anwendung kommen. Diese richten sich im Wesentlichen nach den gewählten Einbausituationen.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen einer solchen Integration dargestellt. Der Entwurf, die Verfügbarkeit von technischen Systemen und die Nutzungsanforderungen können unterschiedliche Lösungen zur Integration von Photovoltaik oder Solarthermie in die Gebäudehülle ermöglichen.

### 3.2.1 Integrationsformen

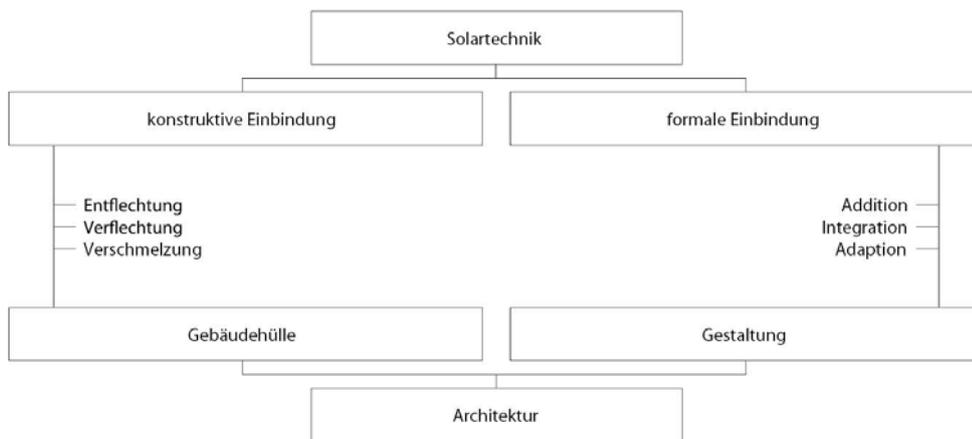


Abb. 16 Konstruktion und Entwurfsstrategie mit aktiver Solartechnik; Quelle: Energieatlas Hegger et al, Seite 109

Die Verbindung solarer Systeme mit der Gebäudehülle kann unterschiedliche Formen haben. Auf der Ebene der konstruktiven Einbindung kann von Entflechtung, Verflechtung und Verschmelzung gesprochen werden. Die formale Einbindung innerhalb der Gestaltung wird hingegen durch die Prinzipien Addition, Integration und Adaption gekennzeichnet.

Sofern das energiegewinnende System alle Anforderungen, die an eine Gebäudehülle gestellt werden, erfüllt, kann konstruktiv von einer Verschmelzung und formal von der Adaption gesprochen werden. Als Bauteil kann hier z. B. eine Isolierverglasung mit integrierter Photovoltaik stehen.

Bei einer Außenwand, wo einzelne Komponenten wahrgenommen werden und diese ihre zugeordnete Funktion erfüllen, aber nur gemeinsam ein funktionierendes System ergeben, kann von verflochtenen und integrierten Bauteilen gesprochen werden. Hier wäre als Beispiel das energiegewinnende System als Witterungsschutz zu nennen.

Werden solare Systeme ohne den Anspruch einer technischen, gestalterischen oder funktionalen Einbindung in die Gebäudehülle installiert, kann von einer konstruktiven Entflechtung oder funktionalen Addition gesprochen werden.

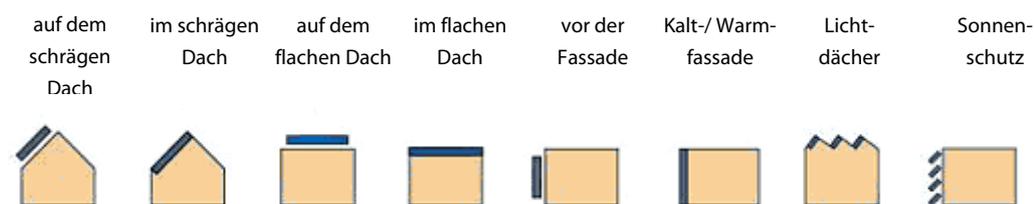


Abb. 17 Möglichkeiten der Gebäudeintegration, Quelle: [www.energytech.at/photovoltaik/fotos/artikel1\\_02.gif](http://www.energytech.at/photovoltaik/fotos/artikel1_02.gif)

### 3.2.2 Solartermische Fassaden und Dächer

Kollektoren werden heute überwiegend als Standardmodule mit vorgegebene Maßen bereitgestellt. Für die solare Aktivierung von Gebäudehüllen können jedoch auch individuell zugeschnittene Produkte eingesetzt werden, die von einigen Herstellern bereitgestellt werden.

Für die Dach- und Fassadenintegration eignen sich besonders Flachkollektoren, die als großformatige Bauteilen flächig in die Gebäudehülle integrierbar sind. Diese Kollektoren sind aus Gründen der Effizienz in der Regel mit hochtransparenten Gläsern abgedeckt. Grundsätzlich kann die Gestaltung der Elemente aber frei gewählt werden. Eine Abdeckung mit farbigen oder strukturiertem Glas ist ebenfalls möglich.

Für eine Fassadenintegration kommen Flachkollektoren, Vakuumröhrenkollektoren und Luftkollektoren infrage.



Abb. 18 Fassadenintegration solarthermischer Module; Quelle: [www.reyelts.de](http://www.reyelts.de)

Abb. 19 Vakuumröhrenkollektoren als Fassadenprägendes Element; Quelle: [www.solarwirtschaft.de](http://www.solarwirtschaft.de)

Bei massiven wie bei Leichtbaukonstruktionen kann der Flachkollektor als Außenwandbekleidung eingesetzt werden und übernimmt die Aufgaben der bislang üblichen Fassadenmaterialien. Die Integration kann als hinterlüftetes und nicht hinterlüftetes Bauteil erfolgen. Bei der nicht hinterlüfteten Variante unterstützt die erforderliche Dämmung des Kollektors gleichzeitig die Wärmedämmung der Außenwand. Ein weiterer positiver Effekt ist die Wärmeentwicklung hinter dem Kollektor, die selbst bei diffuser Strahlung zu einer Reduzierung des Wärmeflusses nach Außen führt. Dieses Prinzip kann auch im

Bereich der Bestandssanierung eingesetzt werden, sofern keine denkmalrechtlichen Belange gegen eine entsprechende Belegung der Außenwandflächen sprechen.

Andererseits ist zu beachten, dass es bei unzureichender Kollektordämmung oder Wärmebrücken im Sommerfall nicht zu einer thermischen Belastung der Innenräume durch die Wärmeleitung kommen darf.

Bei Holzaußenwandkonstruktionen besteht auch die Möglichkeit, die Kollektoren direkt in die Konstruktion einzubinden. Hierdurch wird die Bautiefe der Wandkonstruktionen auf ein Minimum reduziert.

Flachkollektoren sind im Dachbereich analog zur Fassadenintegration als Dachhaut einsetzbar. Auch hier besteht die Möglichkeit, die Elemente als präfabrizierte Bauteile vorzufertigen und in einem Arbeitsgang auf der Baustelle zu montieren.

Vakuumröhrenkollektoren sind in den Möglichkeiten einer Integration in der Architektur deutlich eingeschränkt. Die Einsatzbereiche beschränken sich bislang im Wesentlichen auf die Absturzsicherung oder Verschattungselemente.

### **3.2.3 Solarstromaktivierte Fassaden und Dächer**

Photovoltaikmodule werden im Wesentlichen als Verbundelemente angeboten. Verbundglas- oder Kunststoffelemente können wie Verglasungen eingesetzt werden. Darüber hinaus können jedoch fast alle flächigen Baustoffe mit Photovoltaikfunktion belegt werden.

Analog zu den solarthermischen Anlagen können auch die Photovoltaikmodule bei geneigten Dächern die Funktionen der Dachhaut übernehmen und ersetzen somit konventionelle Materialien wie Dachpfannen oder Zinkeindeckung. Zudem können bei Flachdächern auch Dachdichtungsbahnen mit integrierter Photovoltaik zum Einsatz kommen. Diese werden mit geringem Montage- und Installationsaufwand aufgebracht und erfüllen die gleichen Eigenschaften wie eine herkömmliche Dachbahn.



Abb. 20 Aufdachmontage, Quelle: [www.energie-umwelt.de/images/PV/Schlo-Dach.jpg](http://www.energie-umwelt.de/images/PV/Schlo-Dach.jpg) (links)

Abb. 21 Indachmontage, Quelle: [www.solarstrom.ch/deutsch/inhalt/download/pv\\_im\\_schnee.JPG](http://www.solarstrom.ch/deutsch/inhalt/download/pv_im_schnee.JPG) (rechts)



Abb. 22 Solarziegel, Quelle: <http://www.staywithclay.com/images/content/clc-erection/photovoltaictiles.jpg>

Generell ist auf eine Verschattungsfreiheit der solarstromaktivierten Flächen zu achten.

Desweiteren sind die Kabelführung und die Positionierung der Wechselrichter mit in die Planung einzubeziehen. Der Abstand der Anlagen zu den Wechselrichtern sollte so gering wie möglich sein. Die Abführung von Wärmeentwicklung und die Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten stellen ebenfalls wichtige Faktoren für einen einwandfreien Betrieb dar.

Auf Flachdächern können die Elemente aufgeständert werden oder unter Berücksichtigung einer geringeren Effizienz mit einer Neigung von bis zu ca. 3° installiert werden. Bei flach geneigten Anlagen kann auf den erforderlichen Abstand zur Vermeidung der gegenseitigen Verschattung verzichtet werden. Dies ermöglicht die Anordnung einer maximierten solaraktiven Fläche bei gleicher Grundfläche und damit – Gebäude bezogen – weitaus höhere Gesamterträge.



Abb. 23 Auf ein Flachdach aufgeständerte Photovoltaikmodule; Quelle: [www.meikowe.de](http://www.meikowe.de)



Abb. 24 semitransparente Glas-Glas-Module; Quelle: [www.ebersolar.de](http://www.ebersolar.de)

Fassaden bieten ein weiteres Einsatzgebiet für solare Stromerzeugung. Die Effizienz der Anlagen ist in unseren Breiten geringer als auf optimal geneigten Flächen, dafür können die Photovoltaikmodule auch hier die herkömmlichen Fassadenmaterialien ersetzen und deren Aufgaben übernehmen.



Abb. 25 Solarthermische Fassadenintegration Quelle: www.solid.de

Desweiteren können auch semitransparente Elemente im Fassadenbereich zum Einsatz kommen, die zur Belichtung der Innenräume beitragen oder als verschattendes Fassadenbauteil eingesetzt sind. Über die Belegungsdichte kann der G-Wert reguliert werden. Zu beachten ist die Wärmeentwicklung der Zellen, sofern sie in den Innenbereich abstrahlt.



Abb. 26 Semitransparente Photovoltaikmodule als Überkopfverglasung / Quelle: FG\_ee

Die Integration der Photovoltaik in Verschattungselemente eignet sich besonders gut, da diese durch ihre Funktion der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Die Elemente können als starre oder bewegliche Bauteile konzipiert sein, die dann opake und semitransparente Materialien wie Metallpaneele oder bedrucktes Glas ersetzen.



Abb. 27 Opake PV-Lamellen als Sonnenschutz vor der Fassade, Quelle: [www.jxj.com/magsandj/rew/2003\\_03/itoman\\_city\\_hall.html](http://www.jxj.com/magsandj/rew/2003_03/itoman_city_hall.html) (links)

Abb. 28 Sonnenschutzsystem aus HOE und PV an der Fassade, Quelle: [arch.hku.hk/~cmhui/holo/holo.html](http://arch.hku.hk/~cmhui/holo/holo.html)

Weitere Möglichkeiten zur Integration von Photovoltaikerelementen in die Gebäudehülle sind Glasdächer, Oberlichter, Glasfassaden und Fenster. Photovoltaikerelemente können Funktionen wie Sonnenschutz, Witterungsschutz, Sichtschutz, und Schallschutz übernehmen und somit andere funktionale Komponenten in der Gebäudehülle substituieren.

Photovoltaik verfügt dabei über ein hohes gestalterisches Potential. Dank der fortschreitenden Entwicklung auf diesem Gebiet werden fortlaufend neue Perspektiven eröffnet.

	Additive Systeme	Integrierte Systeme		
		Vorort-Integration Einbindung in Bestands-bauten	Präfabrizierte Integration Vorgefertigte Systeme oder Bauteile, Dach- und Wandelemente	Sondersysteme Verschattung Fassade-systeme Multifunktionale Systeme
Integrationsgrad	0	++	+++	+++
Gestaltungsanspruch	0	++	++	+++
Funktionalität	+	++	+++	+++
Planungsleistung	0	+	++	+++
Koordinationsaufwand	++	+++	+	+++
Konstruktionsaufwand	+++	+++	+	++
Installationsaufwand	++	++	+	+++
Wartungsintensität	++	+	0	0
Kosten	0	++	+	+++

Abb. 29 Bewertungstabelle unterschiedlicher Parameter für die unterschiedlichen Integrationsarten

## 4 Integration Photovoltaik

Im folgenden werden Projektbeispiele zum Thema Integration von Photovoltaik in die Gebäudehülle anhand von Steckbriefen vorgestellt und bewertet.

### 4.1 Projektbeispiele

#### Flachdach

- Fortbildungsakademie Mont-Cenis. Herne, 1999  
Jourda et Perraudin, Lyon/Paris  
Hegger Hegger Schleiff, Kassel
- Wohnanlage, Braunschweig, 2007  
Dreischoff + Partner Planungsgesellschaft mbH, Braunschweig

#### Geneigtes Dach

- Hauptbahnhof/Lehrter Bahnhof, Berlin, 2006  
gmp Architekten, Hamburg

#### Fassade

- Modehaus Zara. Köln, 2004  
Architekturbüro Georg Feinhals, Aachen
- Sporthalle, Tübingen, 2004  
Allmann Sattler Wappner Architekten GmbH, München
- Turnhalle, Regensburg, 2004  
Tobias Ruf, Planungs- und Baureferat - Hochbauamt, Stadt Regensburg
- Kinderkrippe + Jugendfreizeitstätte, München, 2007  
Architekturbüro Ebe + Ebe, München
- Passivhaus-Ökomarkt, Kirchberg-Thening, 2003  
Poppe\*Prehal Architekten
- „Am Spalterhals“, Barsinghausen, 2003  
Raumplan, Hannover

#### Fassade / Sonnenschutz

- Entwicklung, Planung und Design Solarer Fensterladen  
Dipl.-Ing. Arch. Astrid Schneider, Solar Architecture Berlin
- Internationaler Studentenwettbewerb „Solar Decathlon 2007“  
Fachgebiet Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, Technische Universität Darmstadt

#### Flachdach / Sonnenschutz

- Internationaler Studentenwettbewerb „Solar Decathlon 2007“  
Fachgebiet Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, Technische Universität Darmstadt-

#### Systeme in der Entwicklung

- Entwicklung und Vermarktung der „Sonnenschutzlamelle“, seit 2004, Sunthink

**4.1.1 Flachdach**

**4.1.1.1 Fortbildungsakademie Mont-Cenis. Herne, 1999**

Jourda et Perraudin, Lyon/Paris

Hegger Hegger Schleiff, Kassel

Flachdach / Fassade



Abb. 30 Akademie Mont-Cenis, Quelle: Monika Nikolic

Abb. 31 Akademie Mont-Cenis, Quelle: Monika Nicolic

Abb. 32 Glas-in-Glas Modul, Quelle: www.solarintegration.de

**Beschreibung**

Die Fortbildungsakademie Mont-Cenis in Herne ist eine Glashalle, in die verschiedene eigenständige Baukörper eingestellt sind. Die Photovoltaik-Glas-Module für die Dach- und Fassadenfläche sind integraler Bestandteil des Energie- und des Gestaltungskonzeptes.

**Integration**

In der Dachfläche und in der südwestlichen Seitenflächen der Glashülle wurden 3.185 mono- und multikristalline Solarmodule integriert, die unterschiedlich dicht mit Solarzellen belegt sind. Sie produzieren zum Einem Strom und sorgen zum Anderen für eine optimale Verteilung von Licht und Schatten. Die Lichtverteilung im Innenraum der Glashülle ähnelt dem Eindruck eines natürlichen Wolkenbildes.

Aufgrund der Konstruktion, bei der die Solarzellen zwischen zwei Glasscheiben in Gießharz eingebettet sind, können diese Fassadenelemente deutlich größer als herkömmliche Standardkomponenten sein. Dies erleichtert die Integration und Installation der Fassadenelemente.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	750.00 kWh/a	Ertrag	750,00 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	10.000 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	1000 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	75 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,13 kWp

<b>Modul</b>			
Abmessungen	Fassade 1,16 x 2,40cm Dach 1,16 x 2,78cm	Leistung	3,14 kWp 3,64 kWp
Belegung	unterschiedlich (Wokenmuster)		
Hersteller	Scheuten		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

#### 4.1.1.2 Wohnanlage, Braunschweig, 2007

Dreischoff + partner Planungsgesellschaft mbH, Braunschweig  
Glasdach des Laubengangs und Pultdach



Abb. 33 Blick auf die Glasüberdachung des Innenhofs, Quelle: [www.alwitra.de](http://www.alwitra.de)

Abb. 34 Dachdichtungsbahn mit integrierten Photovoltaik-Modulen, Quelle: [www.alwitra.de](http://www.alwitra.de)

Abb. 35 Dünnschicht-PV-Module auf Flachdach, Quelle: [www.baunetz.de](http://www.baunetz.de)

#### Beschreibung

Die Baugenossenschaft Wiederaufbau eG errichtete eine Seniorenwohnanlage für betreutes Wohnen mit 70 Wohneinheiten in Braunschweig.

#### Integration

Im Rahmen des Neubaus wurde eine netzgekoppelte PV-Anlage mit PV-Modulen funktional in das Gebäude integriert. Diese verteilen sich auf den Pultdächern und auf dem Glasdach der Laubenganghalle. In der Glasüberdachung des Innenhofes wurden semitransparente Isolierglas-PV-Module mit monokristallinen Siliziumsolarzellen eingesetzt und in eine Pfosten-Riegel-Konstruktion eingebaut.

Die Flachdächer der beiden Gebäuderiegel wurden mit flexiblen Dünnschicht-PV-Modulen belegt. Die PV-Module sind in Foliendachbahnen integriert, auf Wärmedämmung verlegt und verschweißt. Die Größe der flexiblen Solarzellen beträgt 240 x 340 mm. Sie sind in Serie geschaltet und mit Bypass-Dioden, die bei Teilverschattung einzelner Module dennoch Erträge sicherstellt. Alle Anschlusskabel der PV-Module sind witterungsgeschützt unter den Solar-Bahnen geführt.

Die dreilagigen Solarzellen verfügen über stromerzeugende Schichtsysteme aus amorphem Silizium. Von den drei übereinander liegenden amorphen Silizium-Zellen werden jeweils unterschiedliche Wellenlängen des Sonnenlichts absorbiert, was den Wirkungsgrad erhöht und konstantere Erträge möglich macht.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	29.700 kWh/a	Ertrag	695,55 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	943,08 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	42,70 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	31,49 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,05 kWp
<b>Modul</b>			
Abmessungen	Dach 790 x 5490mm	Leistung	0,272 kWp
Belegung	ca. 73%		
Hersteller	UNI-SOLAR		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

## 4.1.2 Geneigtes Dach

### 4.1.2.1 Hauptbahnhof/Lehrter Bahnhof, Berlin, 2006

Gerkan, Marg und Partner Architekten (gmp), Hamburg

Glasüberdachung



Abb. 36 Innenraum Lehrter Bahnhof, Quelle: Marcus Bredt

Abb. 37 Photovoltaik auf dem gekrümmten Dach, Quelle: Marcus Bredt

Abb. 38 Glas-Glas-Module im gekrümmten Dach

#### Beschreibung

Der 2006 in Betrieb genommene Neubau des Hauptbahnhofs Berlin ist ein Kreuzungsbahnhof. Entwurfsprinzip ist die markante Betonung des vorgegebenen Verlaufs der Gleistrassierung im städtebaulichen Raum durch große, filigran konstruierte Glasdächer sowie zwei überbrückende.

#### Integration

Im Ost-West-Glasdach ist auf einer nach Süden ausgerichteten Fläche von 1870 m<sup>2</sup> eine Photovoltaikanlage in die Tragwerkskonstruktion integriert. Insgesamt besteht die Solaranlage aus 780 Glas-Glas-Modulen. Jedes einzelne der Module musste zur Integration in das gebogene Glasdach passgenau gefertigt werden.

Mit 117 Wechselrichtern wird der erzeugte Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt; Datenlogger übernehmen die Datenerfassung und die Darstellung der Messwerte.

Im Bereich des wirkungsvollsten Einstrahlungswinkels werden ca. 8,4 Prozent der Dachfläche im Süden mit Photovoltaik-Modulen belegt, die zusätzlich die Bahnsteigbereiche verschatten.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	160.000 kWh/a	Ertrag	864,50 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	1.870 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	189,00 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	85,56 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,09 kWp

<b>Modul</b>			
Abmessungen	Dach 1,7-2,6m <sup>2</sup> (abhängig von der Größe der Glasflächen)	Leistung	0,23 KWp (durchschnittlich, abhängig von der Modulgröße)
Belegung	8%		
Hersteller	Scheuten Solar		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

**4.1.3 Fassade**

**4.1.3.1 Modehaus ZARA, Köln, 2004**

Architekturbüro Georg Feinhals, Aachen

Fassade mit 16 unterschiedlichen PV-Modultypen



Abb. 39 Straßenansicht Modehaus ZARA, Köln, Quelle: www.solon-pv.de

Abb. 40 Fassade Modehaus ZARA, Köln, Quelle: www.solo-pv.de

**Beschreibung**

Das Modehaus ZARA entschied sich beim Neubau einer Filiale in der Kölner Innenstadt für eine Solarstromfassade. Inmitten der Einkaufszone sorgt sie für Aufsehen und sensibilisiert für den möglichen Einsatz energiegewinnender Systeme in der Fassade.

**Integration**

Die Fassade besteht aus unterschiedlichen Modultypen mit Leistungen von 45 bis 350 Wp. Auf einer Fläche von 140 Quadratmetern sind 112 Einzelmodule in Isolierglasscheiben eingebettet. Diese werden über Punkthalter in der Pfosten-Riegel-Konstruktion gehalten. Elektrische Anschlüsse befinden sich unsichtbar auf den Modulrückseiten. Die Belüftung wird über die Systemfugen der Module gesichert. Um Leistungseinbussen durch Verschattung vorzubeugen, ist die Gesamtanlage aus mehreren, voneinander unabhängigen Leistungseinheiten zusammengesetzt.

Obwohl die Fassade aus sechzehn verschiedenen Solarmodultypen mit unterschiedlichen Abmessungen besteht, wirkt sie insgesamt homogen. Neben dem ästhetischen Effekt gewährleisten die Solarmodule im Isolierglasverbund einen guten Wärme- und Schallschutz.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	- kWh/a	Ertrag	- kWh/kWp
Solaraktive Fläche	140 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	12,00 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	- kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,08 kWp

<b>Modul</b>			
Abmessungen	Fassade von 620x880mm bis 1.165x3.080mm	Leistung	0,045 – 0,350 KWp (16 verschiedene Modultypen)
Belegung	unterschiedlich je Modul		
Hersteller	SOLON SE		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

### 4.1.3.2 Sporthalle, Tübingen, 2004

Allmann Sattler Wappner Architekten GmbH, München

Fassade aus grünen multikristallinen PV-Zellen



Abb. 41 Südfassade Sporthalle Tübingen, Quelle: www.baunetz.de

Abb. 42 Glas-Folien-Lamine mit grünen multikristallinen Solarzellen bilden die Außenhaut der Südfassade, Quelle: www.baunetz.de

Abb. 43 Grüne multikristalline Siliziumzelle, Quelle: www.solarserver.de

#### Beschreibung

Die Süd-West-Fassade dieser Sporthalle ist vollständig als Photovoltaikfassade ausgebildet und wird vom örtlichen Energieversorger betrieben.

#### Integration

Die Photovoltaikfassade mit ihren grünen Solarzellen war von Beginn an ein wesentlicher Bestandteil des Energiekonzeptes der Sporthalle. Vier unterschiedlich große Modultypen ermöglichen die maßgenaue Anpassung an die vorgegebene Form der Halle. Insgesamt 20.000 Solarzellen wurden zu Glas-Folien-Laminaten verarbeitet. Die Module bestehen aus einer Frontglasscheibe aus 8mm-Einscheibensicherheitsglas und einer rückseitigen weißen Kunststoffolie, zwischen die die Solarzellen eingebettet sind.

Die sonst sichtbaren Lötbahnen im umlaufenden Randbereich sind abgedeckt, daher erscheint der äußere Laminatrand einheitlich weiß.

Der grüne Farbton wurde aus Gründen der optischen Erweiterung der Landschafts- und Sportflächen und zur Markierung des Übergangs von der Stadt in die freie Auenlandschaft der Umgebung gewählt.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	30.000 kWh/a	Ertrag	686,50 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	525 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	48,70 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	57,14 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,08 kWp

<b>Modul</b>			
Abmessungen	Fassade	Leistung	0,045 kWp
Belegung	-		
Hersteller	SunTechnics Solartechnik GmbH		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

### 4.1.3.3 Turnhalle, Regensburg, 2004

Tobias Ruf, Planungs- und Baureferat, Hochbauamt Stadt Regensburg  
 Lichtstreuende Photovoltaikfassade



Abb. 44 Turnhalle Burgweinting, Regensburg, Quelle: Hochbauamt Regensburg

Abb. 45 Innenansicht der Südfassade, Quelle www.baunetz.de

Abb. 46 Polykristallines Siliziummodul (ohne 20mm Rand), Quelle: www.solarwirtschaft.de

#### Beschreibung

Beim Neubau der Turnhalle für die Grundschule in Burgweinting wurde von der Stadt Regensburg in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut ISE in Freiburg eine Fassade entwickelt. Die Architektur der Turnhalle ist durch eine als Oberlicht umlaufende, die halbe Gebäudehöhe einnehmende Glasfassade geprägt. Diese ist je nach Himmelsrichtung unterschiedlich ausgebildet: im Norden als Standard-Isolierverglasung, an der Ost- und Westseite als lichtstreuende Isolierverglasung und an der Südseite als lichtstreuende Photovoltaikfassade.

#### Integration

Die nach Süden ausgerichtete Längsfassade des Turnhallenneubaus ist mit ca. 120 qm integrierten Siliziummodule bestückt. Die einzelnen Silizium-Zellen haben einen Randabstand von 20mm, um blendfreie Ausleuchtung mit Tageslicht zu gewährleisten. Somit dienen die Zellen als Verschattungselemente.

Zum Schutz der polykristallinen Siliziumzellen wurden diese in einen Gießharzverbund zwischen zwei teilvorgespannte Sicherheitsgläser eingebettet. Auf der Innenseite der Verglasung ist eine Wärmeschutzbeschichtung aufgebracht, die zusammen mit den Siliziumzellen die Wärmestrahlung reflektiert.

Diese Lösung bietet eine optimale blendfreie Raumausleuchtung, ohne die Halle übermäßig aufzuheizen.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	7.979 kWh/a	Ertrag	797,90 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	117 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	10,00 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	68,20 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,09 kWp

<b>Modul</b>			
Abmessungen	Fassade unterschiedlich	Leistung	5,6 kWp (Durchschnitt)
Belegung	Ca. 90%		
Hersteller	Solarnova / aleo		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

**4.1.3.4 Kinderkrippe und Jugendfreizeitstätte, München, 2007**

Architekturbüro Ebe + Ebe, München

Fassade aus polykristallinen Siliziumzellen



Abb. 47 Südfassade Kinderkrippe und Jugendfreizeitstätte in München, Quelle: www.baunetz.de

Abb. 48 Kinderkrippe und Jugendfreizeitstätte in München, Quelle: www.baunetz.de

Abb. 49 Polykristalline Siliziumzelle, Quelle: www.energie.at

**Beschreibung**

Die beiden voneinander unabhängigen Nutzungen Krippe und Jugendfreizeitstätte weisen unterschiedliche farbige Wandverkleidungen im Erdgeschoss auf. Das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes ist jedoch durch eine ca. 80 m<sup>2</sup> große Fassaden-Photovoltaikanlage oberhalb eines Einganges geprägt.

**Integration**

Vollständig in die Südfassade eingebaut ist die Photovoltaikanlage, die auch die Lage eines dahinterliegenden Saals markiert. Die 51 rahmenlosen polykristallinen Module wurden als vorgehängte, hinterlüftete Fassade ausgebildet und sind punktgehalten montiert.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	6.300 kWh/a	Ertrag	630kWh/kWp
Solaraktive Fläche	80 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	10,00 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	78,75 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,13 kWp
<b>Modul</b>			
Abmessungen		Leistung	0,19 kWp
Belegung	> 95% (Punkthalter)		
Hersteller	3S – Swiss Solar Systems		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

**Passivhaus-Ökomarkt, Kirchberg-Thening, 2003**

Poppe\*Prehal Architekten, Steyr

Fassade



Abb. üPhotovoltaikfassade Ökomarkt, Quelle: www.twoday.net

Abb. 50 Montage der Photovoltaikmodule, Quelle: oekomarkt.at

Abb. 51 Plikristaline Siliziumzelle, Quelle: www.solarwirtschaft.de

**Beschreibung**

Dieser Öko-Supermarkt wurde in Passivhausbauweise entwickelt und in der Gemeinde Kirchberg-Thening umgesetzt.

**Integration**

Neben Passivhauskriterien wurde hier besonderes Augenmerk auf die Reduktion des Energieverbrauches der Kühlregale gelegt und ihre Abwärme zur Beheizung des Gebäudes hinzugezogen.

Zur Beheizung des Gebäudes muss keine zusätzliche Anlage eingesetzt werden. Die netzgekoppelte Photovoltaik-Anlage ist auf Dach- und Frontseite des Gebäudes montiert. Südseitig ist die Fassade bis zu einer Höhe von 2,50 Meter vollständig verglast und darüber mit Photovoltaikmodulen verkleidet, während die anderen Fassaden mit einer horizontalen, hinterlüfteten Holzlattung versehen sind.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	36.656 kWh/a	Ertrag	1367,45 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	398,90 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	29,00 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	99,41 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,07 kWp
<b>Modul</b>			
Abmessungen	-	Leistung	0,115 kWp
Belegung	100%		
Hersteller	Solarfabrik		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

#### **4.1.3.5 „Am Spalterhals“, Barsinghausen, 2003**

Raumplan Architekten, Hannover

Kombination verschiedener PV-Technologien in einem sanierten Gebäude



Abb. 52 PV-Kaltfassade zur Verkleidung der SO-Fassade eines Treppenhauses, Quelle: Raumplan Architekten

Abb. 53 PV-Brüstungsverkleidung, Quelle: Raumplan Architekten

Abb. 54 Detail Verkleidung aus grauen polykristallinen Siliziumzellen, Quelle: Raumplan Architekten

#### Beschreibung

Schulgebäude aus den 70er Jahren bieten oftmals geeignete Dachflächen zur Errichtung von großen PV-Anlagen. Zugleich sind Schulen ein geeigneter Ort, um vor breitem Publikum (Schüler, Lehrer, Eltern) Planung, Installation und Betrieb einer PV-Anlage zu demonstrieren. Die Sanierung des Schulgebäude „Am Spalterhals“ in Barsinghausen umfasste eine energetische Sanierung und den Umbau in den Bereichen Fassade, Fenster und Dach.

#### Integration

Es wurden verschiedene Arten der Photovoltaik-Gebäudeintegration ausgeführt. Dabei konnten Synergien mit der anstehenden, baulichen und energetischen Sanierung des Schulgebäudes genutzt werden:

- hinterlüftete Fassadenbekleidung
- Brüstungsbekleidung
- Isolierglasmodule in Lichtbändern
- Photovoltaik-Dachbahnen
- semitransparente Glas-Glas-Module als Innenhofüberdachung

#### Hinterlüftete Fassadenbekleidung

Die PV-Module sind frontseitig von Einscheiben-Sicherheitsglas und rückseitig über eine Folie gehalten und bilden eine hinterlüftete Außenwandbekleidung, die punktförmig gehalten wird. Die Photovoltaikmodule treten anstelle sonst üblicher Fassadenbekleidungen.

#### Brüstungsbekleidung

In der SW-Fassade eines Unterrichtstraktes wurden graue multikristalline Silizium-Solarzellen als Brüstungsverkleidung eingesetzt.

**Isolierglasmodule in Lichtbändern**

Zur Verbesserung der Tageslichtverhältnisse in den Musiksälen wurden die sanierungsbedürftigen Lichtkuppeln gegen Lichtbänder mit integrierten, semitransparenten PV-Modulen ausgetauscht.

**Photovoltaik-Dachbahnen**

Bei der Flachdachsanie rung wurde auf die neue Wärmedämmung eine Dünnschicht-PV-Folie aufgebracht. Sie ersetzt bei der Flachdachsanie rung die Sanierungsfolie und verfügt über ein sehr geringes Gewicht.

**Semitransparente Glas-Glas-Module als Innenhofüberdachung**

Die Atriumüberdachung besteht ebenfalls zur Tageslicht- und Atmosphärenverbesserung aus semitransparenten PV-Modulen, die im Glas-Glas-Aufbau integriert sind.



Abb. 55 Semitransparente PV-Module in der Überdachung des Atriums, Quelle: Raumplan Architekten

Abb. 56 Inneneindruck der Isolierglas-PV-Module über den Musiksälen, Quelle: Raumplan Architekten

Abb. 57 Südseitig eingesetzte Isolierglas-PV-Module in Lichtbändern, Quelle: Raumplan Architekten

**Leistung**

Es wurden fünf PV-Teilbereiche mit insgesamt 457 PV-Modulen (11 Typen) auf einer Gesamtfläche von ca. 940 qm bei einer Gesamtnennleistung von 60,538 kWp in verschiedene Fassaden und Dächer des Schulgebäudes integriert.

PV Anlage	Standort	Neigung [°]	Azimet [°]	Nennleistung [kWp]	Generatorfläche [qm]
Kaltfassade	Treppenhaus	90	-45/45	12,67	105,4
Brüstung	SW-Fassade	90	45	8,376	101,67
Oberlichter	Musiksäle	30	-45	4,284	47,81
Flachdach	Technikdach Aula	3	-3	23,04	514,80
Überdachung	Atrium	3	45	12,168	167,57
Summe				60,538	937,25

Abb. 58 Technische Daten der PV-Teilgeneratoren des Schulzentrums Barsinghausen, Quelle: Raumplan Architekten

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	39,217 kWh/a	Ertrag	647,81 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	937 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	60,538 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	41,8 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,065 kWp
<b>Modul</b>			
Abmessungen	verschieden (siehe oben)	Leistung	verschieden
Belegung	-		(siehe oben)
Hersteller	Solarnova / alwitra		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

#### 4.1.4 Fassade / Sonnenschutz

##### 4.1.4.1 Solarzentrum, Wietow, 2003

Architekt Gerd Vogt, Huckstorf

Solarer Fensterladen: Dipl.-Ing. Astrid Schneider, Solar Architecture, Berlin

Fassade / Sonnenschutz; Solarer Fensterladen



Abb. 59 Solarzentrum, Wietow, in saniertem Gutshof, Quelle: [www.solarintegration.de](http://www.solarintegration.de)

Abb. 60 Solarer Fensterladen, Quelle: Astrid Schneider

Abb. 61 Detail Solarer Fensterladen, Quelle: Astrid Schneider

#### Beschreibung

Für das Solarzentrum Mecklenburg-Vorpommern wurde das denkmalgeschützte Gutsgelände in Wietow saniert. Neben solaren Dachziegeln auf dem Süddach des Haupthauses wurden 9 Fenster der Südfassade mit solaren Fensterläden ausgestattet.

#### Integration

Die Photovoltaik-Module sind in einen herkömmlichen Klappladen integriert. Die Zellen sind in ein Glas-Glas-Laminat eingebettet und mit einem leicht grün durchgefärbten Glas auf der Rückseite versehen. Die Module sind auf der Rückseite mit Modulwechselrichtern versehen, so dass jeder Fensterladen für sich bereits Wechselstrom herstellt, der in das Stromnetz eingespeist wird.

Der Klappmechanismus ist so konstruiert, dass der Fensterladen mit der solaraktiven Seite im geöffneten wie im geschlossenen Zustand immer nach außen und damit zur Sonne ausgerichtet ist. Der Klappladen ist manuell bedienbar und somit individuell je nach Verschattungs- und oder Tageslichtwunsch steuerbar.

Die freie Hinterlüftung der Klappläden vor der Fassade gewährleistet eine konstante Belüftung und relativ konstante Temperaturen

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	800 kWh/a	Ertrag	555,55 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	15 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	1,44 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	53,33 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,10 kWp
<b>Modul</b>			
Abmessungen	Fensterladen: 112,5x37,5cm und 37,5x 37,5cm	Leistung	0,16 kWp
Belegung	ca. 90%		
Hersteller	Solarnova		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

#### 4.1.4.2 Beitrag Team Germany zum Internationalen Studentenwettbewerb „Solar Decathlon 2007“

FG Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, Technische Universität Darmstadt  
Integration PV-Modulen in eine Lamellenfassade (Sonnenschutz)



Abb. 62 Lamellenfassade des Betrags der TU Darmstadt zum „Solar Decathlon 2007“, Quelle: FG ee

Abb. 63 Detail Lamellenfassade und Verandaüberdachung, Quelle: FG ee

Abb. 64 PV-Modul vor der Montage auf den Holzlamellen, Quelle: FG ee

Abb. 65 Detail Lamellenfassade, Quelle FG ee

#### Beschreibung

Ausgangspunkt für die Entwicklung der Photovoltaik-Holzlamelle war der Internationale Studentenwettbewerb „Solar Decathlon 2007“, der im zweijährigen Turnus seitens des U.S. Energieministeriums ausgelobt wird. Mit dem Beitrag der Technischen Universität Darmstadt wurde eine energiegewinnende Gebäudehülle durch Einsatz eines energiegewinnenden Sonnenschutzes thematisiert (Siehe auch Kapitel 5.0 Produktentwicklung).

#### Integration

Das entwickelte Fassadensystem besteht aus einem Holzrahmen, der mit Holzlamellen bestückt ist. Amorphe Photovoltaikzellen sind auf die Holzlamellen montiert.

Diese Holzrahmen können fest oder beweglich an eine Fassadenunterkonstruktion montiert werden.

Die Lamellen jedes beweglich Holzrahmens können per Hand oder mit einer in den Rahmen integrierten, motorunterstützten Mechanik gedreht, d.h. geöffnet und geschlossen werden. Damit wird die Nachführung der Photovoltaikoberfläche zum Sonnenstand möglich. Die Motoren für eine computerunterstützte Nachführung sowie die entsprechende Verkabelung für die Versorgung und Steuerung sind ebenfalls in die Holzrahmen integriert.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	--- KWh/a	Ertrag	--- KWh/KWp
Solaraktive Fläche	36,72 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	1,9 KWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	51,74 KWh/m <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,05 KWp
<b>Modul</b>			
Abmessungen	59 x 6 cm	Leistung	1,9 Wp
Belegung	100 %		
Hersteller	Schott		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

#### 4.1.5 Flachdach / Sonnenschutz

##### 4.1.5.1 Internationaler Studentenwettbewerb „ Solar Decathlon 2007“

FG Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, Technische Universität Darmstadt  
 Glas-Glas-Module in der Verandaüberdachung (Sonnenschutz)

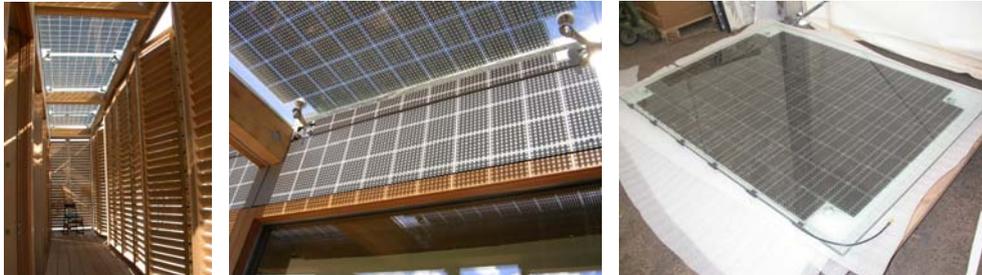


Abb. 66 Veranda des Beitrags der TU Darmstadt zum "Solar Decathlon 2007", Quelle: FG ee

Abb. 67 Detail Verandaüberdachung, Quelle: FG ee

Abb. 68 PV Glas-Glas-Modul vor dem Einbau in die Verandaüberdachung, Quelle: FG ee

#### Beschreibung

Auf dem Flachdach des bereits beschriebenen Solar Decathlon Hauses (siehe Seite Photovoltaikmodule auf S. 34) sind opake, über der Veranda transparente Photovoltaikmodule installiert. Im Bereich der Veranda dienen die semitransparenten Module nicht nur als energiegewinnendes System, sondern auch als Verschattungsmodul.

#### Integration

Die Photovoltaikmodule auf dem Solar Decathlon Haus sind im 3° Nord- und 3° Süd-Gefälle geneigt aufgebracht. Die Rückseitenkontaktierung der monokristallinen Zellen schafft eine größere Absorptionsfläche und steigert ihre Effizienz

Für eine optimale Leistung müssen Photovoltaikmodule vor Überhitzung geschützt werden. Die opaken Module auf dem Dach sind auf ein hinterlüftetes Montagesystem montiert, das über die gesamte Hausmodulbreite spannt.

Photovoltaik			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	--- KWh/a	Ertrag	--- KWh/KWp
Solaraktive Fläche	12,17 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	1,272 KWp
Ertrag/m <sup>2</sup>		Leistung/m <sup>2</sup>	0,105 KWp
<b>Modul</b>			
Abmessungen	~ 2,02 m <sup>2</sup>	Leistung	2,1 KWp
Belegung	78 %		
Hersteller	Sunways		

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

## 4.1.6 Systeme in der Entwicklung

### 4.1.6.1 Sonnenschutzlamelle

Sunthink, München



Abb. 69 Lamellenbehang, Quelle: Markus Spinnler

Abb. 70 Detailausschnitt des Lamellenbehang, Quelle: Markus Spinnler

Abb. 71 Detail Lamellensteuerung, Quelle: Markus Spinnler

#### Beschreibung

Dieses in der Entwicklung befindliche System der Photovoltaik-Sonnenschutzlamelle ist eine Zusammenarbeit von Experten unterschiedlicher Disziplinen.

#### Integration

Das Ziel ist die Integration von Photovoltaikanlagen in Fassaden von Gebäuden mittels Dünnschichttechnologie.

Mittels dieser Dünnschichtsolarzellen, die auf die der Sonne zugewandten Seite auf die einzelnen Lamellen der Jalousien aufgebracht werden oder die selbst bereits die Lamellen bilden, ist es möglich, Strom zu produzieren. Über die leitenden Spann- und Führungsdrähte, die mit einer Sammelschiene verbunden sind, wird der erzeugte Strom abgenommen. Die Lamellen lassen sich über bereits existierende und langjährig erprobte Steuerungen in jeden beliebigen Winkel einstellen und somit optimal nach dem Sonnenstandswinkel ausrichten (einachsige Nachführung). Der Sonnenschutz in Form einer Jalousie kann nicht nur an Südfassaden, sondern auch an Ost- und Westfassaden angebracht werden und Strom produzieren.

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

## 4.2 Grundlagen Photovoltaik

Photovoltaik ist die unmittelbare Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrische Energie mit Hilfe von Solarzellen. Der Begriff leitet sich von dem griechischen Wort phos, photos (dt.Licht) und dem Namen des italienischen Physikers Alessandro Graf von Volta ab. Der photoelektrische Effekt beschreibt das Freisetzen von Elektronen aus einer Metalloberfläche, die von elektromagnetischer Strahlung (etwa Licht oder Ultraviolettstrahlung) getroffen wird. Die Geschichte der Photovoltaik begann mit der Entdeckung des photoelektrischen Effekts im Jahre 1839 durch Alexandre Edmond Becquerel. Erst Mitte des 20. Jahrhunderts wurden die ersten anwendungsreifen Photovoltaiksysteme entwickelt, deren Einsatz zunächst im Weltraum erfolgte.

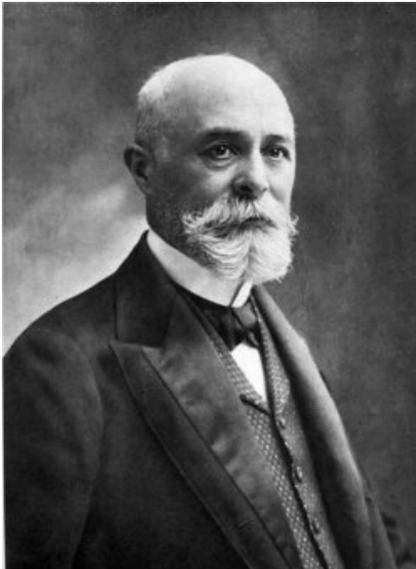


Abb. 72 Alexandre Edmond Becquerel, Quelle: [www.wikipedia.org/wiki/Alexandre\\_Edmund\\_Becquerel](http://www.wikipedia.org/wiki/Alexandre_Edmund_Becquerel)

### 4.2.1 Funktionsprinzip

Die kleinste Einheit einer Photovoltaikanlage ist die Solarzelle. Klassische Solarzellen bestehen aus verschiedenen Halbleitermaterialien. Halbleiter sind Stoffe, die unter Zufuhr von Licht oder Wärme elektrisch leitfähig werden, während sie bei tiefen Temperaturen isolierend wirken.

Die klassische Silizium-Solarzelle setzt sich aus zwei unterschiedlich dotierten Siliziumschichten zusammen. Durch die Einlagerung von Fremdatomen (Dotierung) in die Siliziumschicht wird deren elektrische Leitfähigkeit beeinflusst. Bei Halbleitern wird zwischen positiver und negativer Dotierung unterschieden. Die dem Sonnenlicht zugewandte Seite einer Solarzelle ist negativ dotiert, die darun-

ter liegende Schicht positiv. An der Grenzschicht entsteht ein sogenannter p-n-Übergang. Die freien, überzähligen Elektronen aus dem n-dotierten Bereich diffundieren in den benachbarten p-dotierten Bereich. So entsteht zwischen den beiden unterschiedlich dotierten Bereichen ein elektrisches Feld (Diffusionsspannung), die sogenannte Raumladungszone.

Trifft Licht auf diese Raumladungszone, so werden Elektronen aus ihrer Bindung herausgelöst und es entsteht ein Elektronen-Loch-Paar. Das elektrische Feld der Raumladungszone führt zu einer Trennung der verschiedenen Ladungsträger (Elektronen und Elektronenlöcher). Das bedeutet, dass zwischen den beiden unterschiedlich dotierten Bereichen eine Spannung anliegt. Wird der äußere Kreis nun geschlossen, so fließen Elektronen von der n-Schicht in die p-Schicht und die Ladungsträgerpaare vereinigen sich wieder. Es fließt Strom.

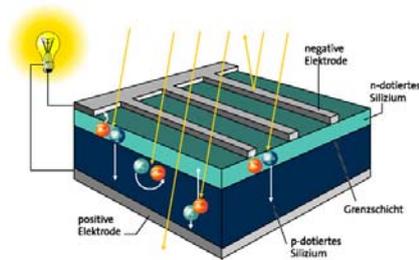


Abb. 73 Funktionsschema Solarzelle, Quelle: [www.my-baunetz.de/sixcms\\_4/sixcms/detail.php?template\\_id=4133&id=71529](http://www.my-baunetz.de/sixcms_4/sixcms/detail.php?template_id=4133&id=71529)

Um der Solarzelle Strom entnehmen zu können, müssen auf Vorder- und Rückseite metallische Kontakte aufgebracht sein. Auf der Rückseite ist das Aufbringen einer ganzflächigen Kontaktschicht möglich. Die Vorderseite hingegen muss möglichst gut Licht aufnehmen können. Deshalb werden hier die Kontakte meist in Form eines dünnen Gitters oder einer Baumstruktur aufgebracht. Eine durchsichtige Antireflexschicht bewirkt eine Verminderung von Reflexionsverlusten an der Zelloberfläche.

#### 4.2.2 Solarzellen

Solarzellen werden nach ihren Ausgangsmaterialien und ihrer Struktur unterschieden. Das für Zellen derzeit am häufigsten verwendete Material ist das Halbleitermaterial Silizium (Si). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen kristallinen Zellen (monokristallines und polykristallines Silizium) und neueren Dünnschicht-Solarzellen (amorphes Silizium, Kupfer-Indium-Selen, Cadmium-Tellurid).

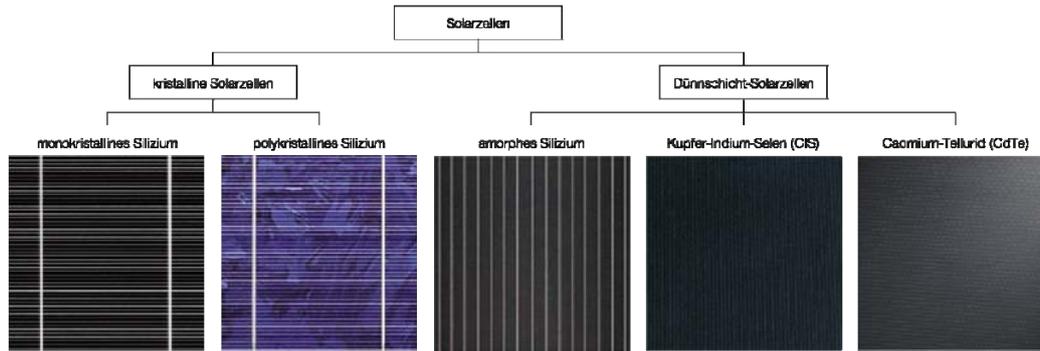


Abb. 74 Marktgängige Solarzellen, Quelle: Energie at, S. 138

### 4.2.3 Kristalline Solarzellen

#### 4.2.3.1 Polykristalline Zellen

Seit 1962 werden multi- bzw. polykristalline Siliziumzellen verwendet. Die Herstellung erfolgt durch Giessen eines Siliziumblocks. Bei der Abkühlung entstehen Einzelkristalle, die der Zelle ihren Namen geben. Der Siliziumblock wird anschließend in Scheiben (sog. Wafer) geschnitten. Heutzutage sind Zellwirkungsgrade von 13 % und mehr (bis zu 16,4%) erreichbar. Polykristalline Siliziumzellen haben eine energetische Amortisationszeit von ca. 3-5 Jahren.

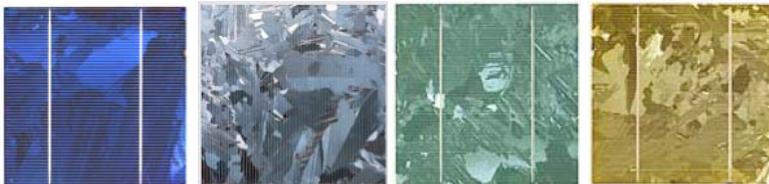


Abb. 75 Farbbeispiele für polykristalline Solarzellen, Quelle: Energie at., S. 138

#### 4.2.3.2 Monokristalline Zellen

Seit 1974 werden auch Zellen aus monokristallinem Silizium eingesetzt. Das klassische Herstellungsverfahren dieser Zellen ist ein Ziehverfahren über eine runde oder achteckige Siliziumsäule, die anschließend ebenfalls in Wafer geschnitten wird. Wie bei polykristallinen Zellen werden die Wafer dotiert und nach Aufbringen der Rückkontaktschicht mit Stromabnahmelinien auf der Vorderseite und mit einer Antireflexschicht versehen. Ohne Antireflexschicht ist ihre Farbe grau. In Abhängigkeit der Antireflexschicht kann ihre Farbe variieren. In den meisten Fällen ist sie blau. Die monokristallinen Zellen weisen heute mit durchschnittlich 14% - 17% und maximal 21% einen der höchsten Wirkungsgrade auf. Sie sind rund oder semi-quadratisch. Für eine dichtere Belegung der Modulfläche werden die Wafer besäumt und meist auf eine quadratische Form zugeschnitten. Der hohe Verschleiß durch die Bearbeitung und eine Schichtdicke von ca. 0,3mm führen

bei beiden Produktionsarten zu einem recht hohen Materialverbrauch. Monokristalline Siliziumzellen haben eine energetische Amortisationszeit von ca. 4-6 Jahren.

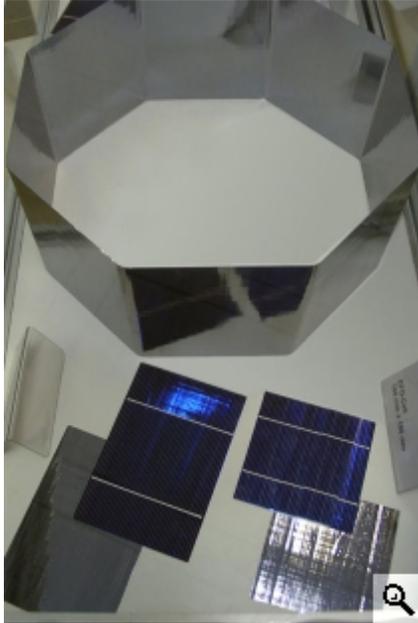


Abb. 76 Dünnwandiges monokristallines Siliziumrohr. Aus den Wänden werden Wafer für EFG-Solarzellen (EFG = Edge-defined Film-fed Growth; ungefähr: kantendefiniertes Filmwachstum) geschnitten. Quelle: [A.Schneider], [www.solarintegration.de](http://www.solarintegration.de)

#### **4.2.4 Dünnschichttechnologie**

Die Erhöhung der Produktion und ein steigender Rohsiliziumpreis führten zu einer neuen Produktionsweise von Siliziumzellen, der Dünnschichttechnologie.

Hierbei wird geschmolzenes Silizium auf eine Trägerschicht aufgebracht. Dies führt zu einer beträchtlichen Reduktion des Materialverbrauchs. Als weitere Materialien werden seit kurzem Halbleiterverbindungen wie Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Selen (CIS) angewendet.

Die Herstellungsprozesse sind material- und energiesparender als bei kristallinen Zellen, da weniger Prozessschritte erforderlich sind. Die energetische Amortisationszeit beträgt demnach nur 2-3 Jahre.

Die Solarzelle wird so als Endlosband hergestellt (Roll-to-Roll-Verfahren). Dünnschichtzellen werden also nicht einzeln gefertigt, sondern im Zellverbund des Moduls. Durch eine Rasterung der photovoltaisch aktiven Halbleiterschicht (-en) lassen sich zudem der Lichttransmissionsgrad (Transparenz) sowie die ästhetische Wirkung der Module steuern. Die Leistung semitransparenter Zellen nimmt mit

dem Grad der Durchlässigkeit ab. Größe und Form können in der Dünnschicht-technologie je nach nach Maßen des Trägermaterials und den gewünschten elektrischen Eigenschaften frei gewählt werden.

Dünnschichtzellen haben geringere maximale Wirkungsgrade (bis zu 8%) nutzen im Vergleich zu herkömmlichen Siliziumsolarzellen diffuses Licht besser aus. Sie absorbieren einen größeren Wellenlängenbereich.

Gerade im Bereich von Fassaden, die nur für kurze Zeit im Tagesverlauf eine direkte Solareinstrahlung erhalten, können durch den Einsatz von Dünnschichtmodulen ggf. sogar höhere Erträge als über den Einsatz kristalliner Zellen erzielt werden. Das Spektrum der absorbierten Wellenlängenbereiche kann durch Kombination verschiedener Dünnschichten innerhalb einer Zelle nochmals vergrößert werden. Diese hocheffizienten Zellen (Tandem- bzw. Tripelzellen) werden u.a. auch in Solarkraftwerken in Kombination mit Konzentratorlinsen verwendet.

Ein weiterer Vorteil der Dünnschichttechnologie ist der wesentlich niedrigere Temperaturkoeffizient. Solarzellen erwärmen sich im Betrieb auf 60°C und mehr. Siliziumzellen, die unter STC (Standard Test Conditions)-Bedingungen sehr gute Werte erhalten, reagieren wesentlich empfindlicher auf im Betrieb auftretende Wärme. Gerade bei optimalen Bedingungen (kontinuierlicher langer Sonnenschein) sinkt die Effizienz von Siliziumzellen stark, während Dünnschichtzellen lediglich wenig Effizienz einbüßen. Daher eignen sich Dünnschichtzellen sehr gut für die Gebäudeintegration in Warmfassade, Warmdach oder im Sandwichelement, mit integrierter Wärmedämmung.

#### **4.2.5 Wirkungsgrad**

Ein erhebliches Entscheidungskriterium für Solarzellen ist der Wirkungsgrad, der angibt, wie viel Prozent der auf die Solarzelle auftreffenden Sonnenenergie in elektrischen Strom umgewandelt wird. Die Tabelle Zellwirkungsgrade und Modulwirkungsgrade für verschiedene Solarzellenmaterialien zeigt die maximalen Zellwirkungsgrade in der Serienproduktion von monokristallinen Zellen mit 14% - 17%, in spitze bis zu 21%, und von polykristallinen Zellen mit 13% an. Dünnschichtzellen erreichen, in Abhängigkeit vom verwendeten Halbleitermaterial, in der Serienproduktion Zellwirkungsgrade bis zu 8%.

In der Photovoltaik wird die maximal mögliche Leistung eines Solargenerators bei Standardbedingungen als Peak-Leistung definiert, sie wird in Watt gemessen und als Wp (Watt Peak) angegeben. Um einen Produktvergleich zu ermöglichen, Abschlussbericht | Stand: 26.02.2009

werden photovoltaische Wirkungsgrade unter genormten „Standard Test Conditions“ (STC) gemessen und bewertet. Der Wirkungsgrad bezieht sich demnach auf eine Sonneneinstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup> bei einer Temperatur von 25°C. In Deutschland werden Werte von 950 - 1150 W/m<sup>2</sup> erreicht.

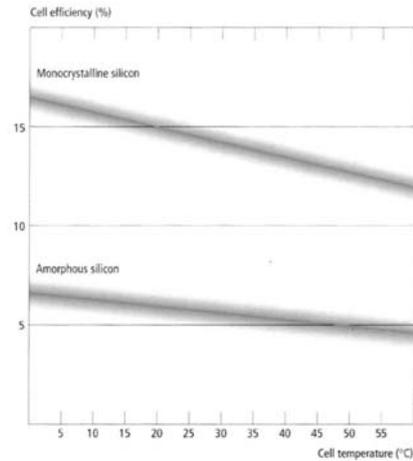


Abb. 77 Wirkungsgrad von Solarzellen in Abhängigkeit zur Zelltemperatur (in%), Quelle: Humm, Toggweiler. Photovoltaik und Architektur. Die Integration von Solarzellen in Gebäudehüllen. Basel, 1993. S.99

Stark abhängig ist der Wirkungsgrad von Material und Zellenstruktur. In der Praxis ist der Wirkungsgrad im Betrieb insbesondere bei kristallinen Zellen von der Temperatur der Zellen abhängig. Eine erhöhte Temperatur führt zu geringen Wirkungsgraden. In der Praxis jedoch zählt der Modulwirkungsgrad, also das Verhältnis der abgegebenen zur eingestrahlt Energie, der wiederum von der Belegungsdichte der Zellen abhängt. Zur Beurteilung des Gesamtsystems ist der „Performance Ratio“ zuständig, der das Verhältnis von Nutzertrag und Sollertrag einer Anlage angibt.

Solarzellenmaterialien	Zellwirkungsgrad in % (Labor)	Zellwirkungsgrad in % (Produktion)	Modulwirkungsgrad in % (Serienproduktion)
Monokristallines Silizium	24,7	18	14
Polykristallines Silizium	19,8	15	13
Bandgezogenes Silizium	19,7	14	13
Kristallines Dünnschicht-Silizium	19,2	9,5	7,9
Amorphes Silizium*	13	10,5	7,5
Hybride HIT-Solarzelle	20,1	17,3	15,2
III-V Halbleiter (GaAS)	35,8**	27,4	27
Cadmium-Tellurid	16,4	10	9
CIS, CIGS	18,8	14	10
Farbstoffzelle	12	7	5***

\* in stabilisiertem Zustand

\*\* gemessen bei konzentrierter Einstrahlung

\*\*\* Kleinproduktion

Abb. 78 Zellwirkungsgrade und Modulwirkungsgrade für verschiedene Solarzellenmaterialien, Quelle: [www.solarintegration.de/index.php?id=359](http://www.solarintegration.de/index.php?id=359)

#### **4.2.6 Photovoltaikmodule**

Photovoltaikmodule sind montagefähige Bauelemente, in die Solarzellen integriert sind. Kristalline Zellen können als einzelne Scheiben fast beliebig im Modul angeordnet sein, müssen jedoch aus Isolationsgründen mit einem Mindestabstand zueinander verlegt werden.

Die Dünnschichtzellen sind fest mit dem Trägermaterial verbunden und somit optisch vollflächig angeordnet.

Für bestimmte Anwendungen kommen Modultechniken wie zum z.B. Glas-Glas-Module aus Verbundsicherheitsglas (VSG) für die Dachintegration zum Einsatz. Durch die Kombination mit farbigen Rückseitenglas oder lichtstreuenden bzw. lichtlenkenden Gläsern können Lichteinfall und -streuung beeinflusst werden. Neben starren, flächigen Modulen sind auch flexible Systeme verfügbar. Mit kristallinen Solarzellen können Biegeradien bis zu 1,5 m erreicht werden. Die Dünnschichttechnologie ermöglicht dem gegenüber auch eine direkte Beschichtung von flexiblen Trägermaterialien wie Metall- und Kunststofffolien oder transparente Kunstharze.

#### **4.2.7 Anlagenkomponenten**

Photovoltaik erzeugt Gleichstrom. Um den gewonnenen Strom für handelsübliche Elektrogeräte nutzen oder in das Netz einspeisen zu können, werden sog. Wechselrichter benötigt. Bei guter Planung liegen die Umwandlungsverluste bei ca. 4 – 8%. Wechselrichter sind heute meist modular aufgebaut. Zur Vermeidung von Netzverlusten werden sie möglichst nah an die energieerzeugenden Module montiert und sollten zur Wartungszwecken gut zugänglich sein.

Bei Solaranlagen unterscheidet man zwischen Inselsystemen und netzgekoppelten Systemen. Inselsysteme werden meist dann eingesetzt, wenn kein öffentliches Stromnetz vorhanden ist und eine Anbindung an das öffentliche Stromnetz zu höheren oder vergleichbaren Kosten führen würde. Der Laderegler kontrolliert die Lade- und Entladevorgänge in der Solaranlage. Der gewonnene Strom wird bis zur Nutzung in Batterien gespeichert. Bei der Speicherung gehen ca. 10 bis 30 Prozent der erzeugten Energie verloren. Inselsysteme müssen daher genau auf den Bedarf abgestimmt sein.

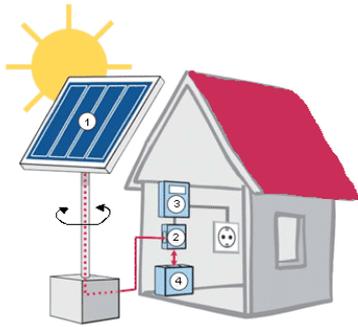


Abb. 79 Schema Inselbetrieb, Quelle: [www.ib-jrippel.de/Solarstrom.html](http://www.ib-jrippel.de/Solarstrom.html). Komponenten eines Inselsystems:

1. PV-Module zur Umwandlung von Licht in elektrischen Strom.
2. Laderegler zur Kontrolle der Lade- und Entladevorgänge in der Solaranlage.
3. Wechselrichter zur Aufbereitung des Solarstroms in Netzqualität.
4. Solarbatterie zur Speicherung des erzeugten Gleichstroms.

Die häufigere Variante ist das netzgekoppelte System. Dies ist an das öffentliche Stromversorgungsnetz angeschlossen, in das der gewonnene Strom eingespeist wird. In diesem Fall deckt der durch Photovoltaik gewonnene Strom den Bedarf lediglich in der Energiebilanz - d.h. die benötigte Elektrizität wird zwar erzeugt, aber nicht direkt verwendet. Ein Einspeisestromzähler dient der Erfassung des eingespeisten Stromes, der Bezugsmeter zählt den verbrauchten Strom.



Abb. 80 Schema Netzgekoppelter Betrieb, Quelle: [www.ib-jrippel.de/Solarstrom.html](http://www.ib-jrippel.de/Solarstrom.html). Komponenten einer netzgekoppelten PV-Anlage:

1. PV-Module zur Umwandlung von Licht in elektrischen Strom.
2. Wechselrichter zur Aufbereitung des Solarstroms in Netzqualität + Sicherheitskomponenten zur elektrischen Absicherung der PV-Anlage.
3. Einspeisestromzähler zur Erfassung des Stromertrags.
4. Bezugstromzähler zur Erfassung des verbrauchten Stroms

#### 4.2.8 Kostenentwicklung

Die Investitionskosten von Photovoltaikanlagen werden in €/kWp, also den Kosten pro installierter Leistung, angegeben. Durch die Förderung von photovoltaisch erzeugtem Strom (siehe unten) und die damit einhergehende größere Nachfrage hat sich der Markt

der PV-Module in den vergangenen Jahren stark vergrößert. Die Kosten pro installierter Leistung sind dabei deutlich gesunken. Allein von 1990 bis 2004 haben sich die Preise mehr als halbiert (von rund 15.000€ pro kWp auf unter 6.000€/kWp). Aktuell (2008) sind monokristalline Module bei Großabnahme (mehr als 1.000 kWh/a) für 2.900€/kWp erhältlich. Schüsselfertige Komplettanlagen sind ab 3.900€/kWp erhältlich.

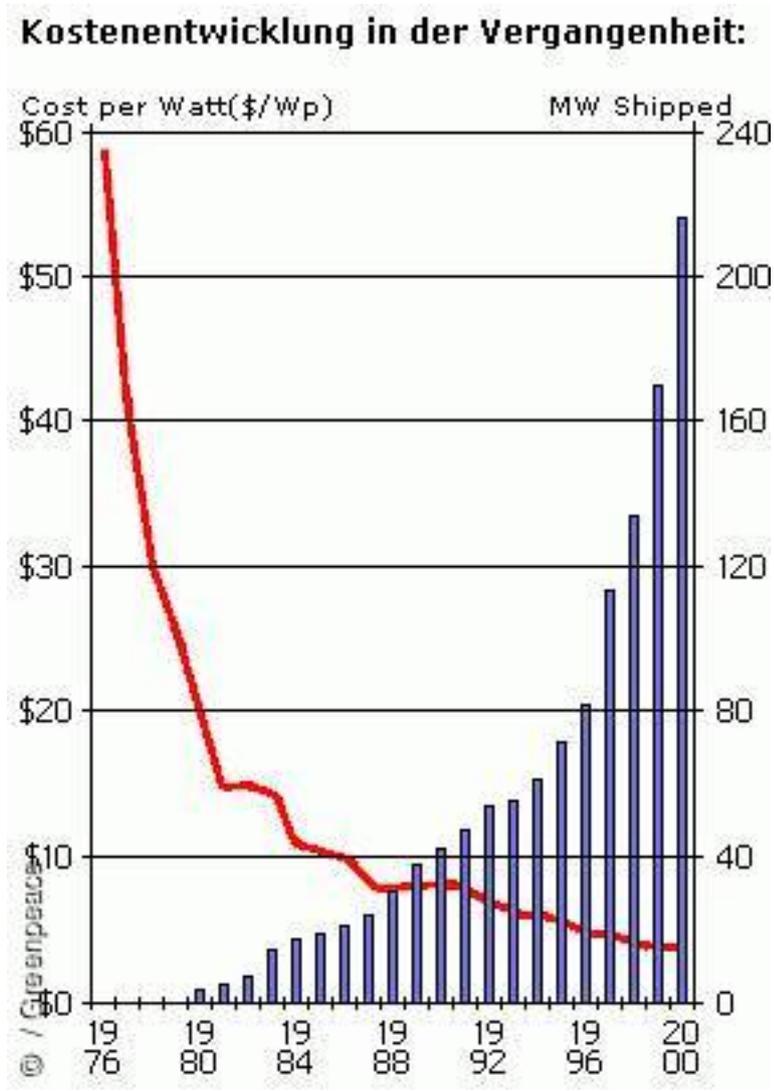


Abb 81 Kostenentwicklung PV-Module (\$/Wp) und installierte Leistung (MW), Quelle: greenpeace

**4.2.9 Vergütung**

Für die Einspeisung von photovoltaisch erzeugtem Strom in das öffentliche Stromnetz erhält der Betreiber einer PV-Anlage eine erhöhte Einspeisevergütung. Grundlage ist das Erneuerbare Energiengesetz (EEG). Die Höhe der Vergütung ist abhängig von der Anlagenleistung und dem Jahr der Inbetriebnahme (degressive Förderung). Die erhöhte Einspeisevergütung wird im Jahr der Inbetriebnahme

und den folgenden 20 Jahren gezahlt (Siehe Kapitel 3.1.5, Tabelle Einspeisvergütung).

Ab 2009 beträgt die Vergütung 43,01 Cent/KWh für Anlagen bis 30 KW, Anlagen bis 100 KW erhalten 40,91 Cent/KWh, Anlagen bis 999 KW 39,58 Cent/KWh und ab 1000 KW 33,00 Cent/KWh. Der Bonus für fassadenintegrierte Photovoltaik in Höhe von 5,00 Cent/KWh entfällt ab dem 01.01.2009.

Für Anlagen, die vor dem 01.01.2009 errichtet wurden, beträgt die Vergütung bis 30 KW, 42,48 Cent/KWh für Anlagen bis 100 KW 40,36 Cent/KWh, Anlagen bis 999 KW 39,90 Cent/KWh und ab 1000 KW 34,48 Cent/KWh. Hier bleibt der Bonus von 5 Cent/KWh für fassadenintegrierte Anlagen bestehen. Die Degression auf die Vergütungssätze und den Boni beträgt ab 2009 jährlich 7,0 % ab 2011 dann 8,0 %.

## 4.3 Zelltypen

### 4.3.1 Monokristalline Siliziumzellen | c-Si

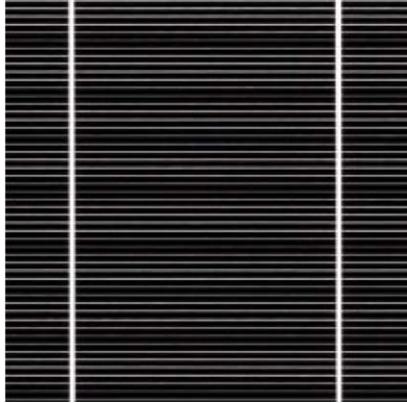


Abb. 82 Monokristallines Silizium, Quelle: Hegger et al 2007, S. 139

Typische Wirkungsgrade: 14 – 17%

Marktanteil: 43,4%

(+)

- hohe Wirkungsgrade
- sehr langzeitstabil

(-)

- energieintensiver Produktionsprozess
- Leistungsabfall durch Erwärmung
- geringe Verschattungstoleranz
- begrenzte Transparenz (bis zu 30%)
- empfindliche Zellen
- teuer

Die Struktur von monokristallinen Solarzellen ist homogen, ihre Farbe ist dunkelblau bis schwarz (mit Antireflexschicht) bzw. dunkelgrau (ohne Antireflexschicht). Durch ihre matte Farbe zeigen sie ein ruhiges Erscheinungsbild. Die einzelnen Zellen haben Abmessungen von 10x10cm bis 15x15cm, bedingt durch die Größe des Siliziumeinkristalls, aus dem die Zellen geschnitten werden. Monokristalline Siliziumzellen sind rund oder quadratisch bzw. semiquadratisch. Die einzelnen Zellen werden zu Solarmodulen mit unterschiedlichen Abmessungen (abhängig vom Hersteller) verarbeitet. Der Einsatz von Solarmodulen aus monokristallinen Siliziumzellen ist vor Allem dann sinnvoll, wenn nur begrenzten Flächen zur Verfügung steht und eine hohe Leitungsdichte benötigt wird.

### 4.3.2 Polykristalline Siliziumzellen | c-Si

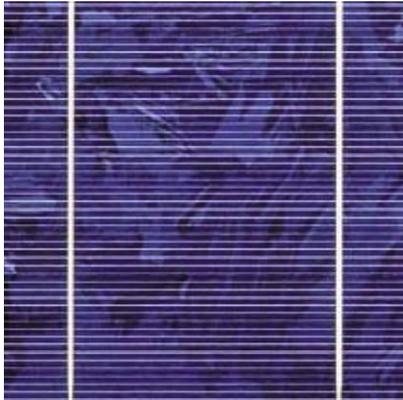


Abb. 83 Polykristallines Silizium, Quelle: Hegger et al 2007, S. 139

Typischer Wirkungsgrad: 13%

Marktanteil: 46,5%

(+)

- gute Wirkungsgrade
- preiswert
- sehr langzeitstabil

(-)

- aufwändiger, energieintensiver Herstellungsprozess
- geringerer Wirkungsgrad als monokristalline Zellen
- Leistungsabfall durch Erwärmung
- geringe Verschattungstoleranz
- begrenzte Gestaltungsmöglichkeiten bzw. Gestalt prägendes Erscheinungsbild
- begrenzte Transparenz (bis zu 30%)

Das Erscheinungsbild polykristalliner Siliziumzellen wird von den unterschiedlich gerichteten Schnittflächen der Siliziumkristalle geprägt. Das Erscheinungsbild ist dadurch heterogen und verändert sich je nach Blickwinkel, die Zelle glänzt bei direkter Sonneneinstrahlung. Die Farbe polykristalliner Siliziumzellen ist blau (mit Antireflexschicht) oder silbergrau (ohne Antireflexschicht). Es sind allerdings auch goldene, grüne, graue und magenta eingefärbte Zellen erhältlich. Die einzelnen Zellen haben Abmessungen von 12,5x12,5cm oder 15,6x15,6cm (selten auch 20x20cm). Polykristalline Zellen haben von den verschiedenen Zelltypen den größten Marktanteil.

### 4.3.3 Amorphe Siliziumzellen | a-Si

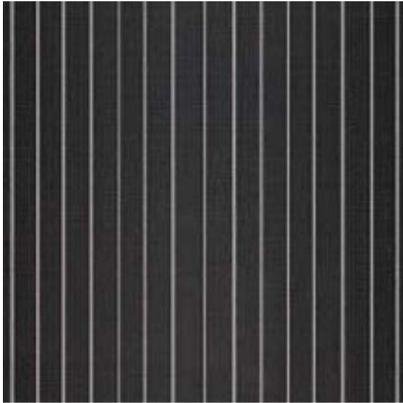


Abb. 84 Amorphes Silizium, Quelle: Hegger et al 2007, S. 139

Typische Wirkungsgrade: 6 – 10%

Marktanteil: 10%

(+)

- geringer Energie- und Materialbedarf bei Herstellung
- effiziente Produktionsweise (mehrere Verfahrensschritte in einem Schritt)
- theoretisch spezifische Anpassungen möglich (Farbe, Größe, Transparenz)
- höhere Abschattungstoleranz
- geringe Temperaturempfindlichkeit
- leistungsstärker bei diffusem Licht

(-)

- geringer Wirkungsgrad als bei kristallinen Siliziumzellen
- geringere Langzeitstabilität (<20 Jahre)
- geringe Flexibilität in der Modulgröße
- begrenzte Transparenz (bis 10%)

Das Erscheinungsbild amorpher Siliziumzellen ist einheitlich schwarz. Dies ermöglicht z.B. einheitlich dunkle Fassadenflächen. Andere Farben sind nicht erhältlich. Theoretisch können amorphe Siliziumzellen in beliebigen Formaten hergestellt werden, in der Praxis sind die Formate aber vom jeweiligen Trägermaterial (Glas- oder Metallsubstrat) abhängig. Standardmodulgrößen sind 60x100cm bei amorphen Siliziumzellen auf Glassubstraten. Amorphe Siliziumzellen eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften vor Allem für Fassadenintegration und wegen des geringen Preises auch für großflächige Anlagen.

#### 4.3.4 Kupfer-Indium-Selen-Zellen | CIS Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Zellen | CIGS

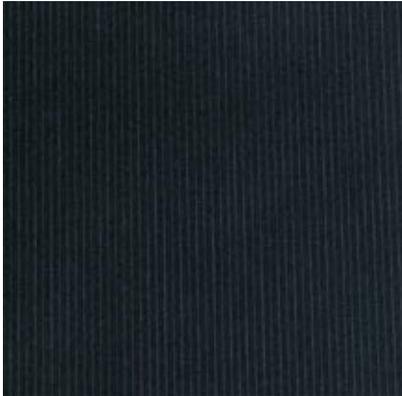


Abb. 85 Kupfer-Indium-Selen, Quelle: Energieatlas Hegger et al 2007, S.139

Typische Wirkungsgrade: 8 – 12%

Marktanteil: < 1%

(+)

- geringer Material- und Energieverbrauch bei der Herstellung
- effiziente Produktionsweise
- variable Zellgröße
- höhere Abschattungstoleranz
- geringe Temperaturempfindlichkeit
- Transparenz bis 50% möglich
- vielfältige Gestaltungsoptionen
- Lebensdauer > 15 Jahre (Untersuchungen zufolge äußerst langzeitstabil)

(-)

- eventuell zukünftige Engpässe in der Versorgung mit wichtigen Rohstoffen (Indium, Gallium, Selen werden auch für LED, LCD und OLED benötigt)

CIS-Zellen haben ein einheitlich schwarzes Erscheinungsbild. Dabei sind sie sowohl als transparente als auch als opake Module erhältlich. CIS-Zellen werden in Standardmodulen (Glasscheibe als Substrat) in Abmessungen von 60x100cm verarbeitet.

Die Zellen können in Bezug auf Leistung mit Standard-p-Si-Zellen konkurrieren und sind aufgrund ihrer Eigenschaften und Gestaltungsmöglichkeiten (Farbe, Opazität) vielseitig einsetz- bzw. integrierbar. CIS-Zellen werden bereits von mehreren Herstellern kommerziell in größeren Stückzahlen angeboten.

Eine Untergruppe der CIS-Technologie sind Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Zellen (CIGS). Sie verfügen über ähnliche Eigenschaften wie Kupfer-Indium-Selen Zellen.

### 4.3.5 Cadmium-Tellurid-Zellen | CdTe



Abb. 86 Cadmium-Tellurid-Zelle, Quelle: Energieatlas Hegger et al 2007, S.139

Typische Wirkungsgrade: 8 – 10%

Marktanteil: < 1%

(+)

- geringer Material- und Energieverbrauch bei der Herstellung
- effiziente Produktionsweise
- Variable Zellgröße
- höhere Abschattungstoleranz
- geringe Temperaturempfindlichkeit
- leistungsstärker bei diffusem Licht
- Lebensdauer > 15 Jahre

(-)

- geringerer Wirkungsgrad als kristalline Siliziumzellen
- Toxische Inhaltsstoffe (Cadmium = Schwermetall)

Cadmium-Tellurid-Zellen werden in einer Kunststoffschicht zwischen zwei Glasscheiben laminiert. Die Vorderseite ist grün-schwarz glänzend. Aktuell sind Cadmium-Tellurid Zellen nur als Glas-Glas-Standardmodule in den Abmessungen 60x120cm erhältlich, theoretisch ist die Zellgröße jedoch variabel. CdTe-Zellen sind eine Alternative zu p-Si-Zellen, sie eignen sich für Gebäudeintegration z.B. in der Fassade (variable Größe + geringe Temperatur- und Abschattungsempfindlichkeit). Die Gestaltungsmöglichkeiten sind begrenzt.

#### 4.3.6 Farbstoffsolarzelle | Grätzel-Zelle



Abb. 87 Prototyp einer Farbstoffsolarzelle, Quelle: Fraunhofer ISE

Typische Wirkungsgrade: <12%

Marktanteil: noch nicht kommerziell erhältlich

(+)

- sehr günstig durch einfache Produktion (Roll-to-Roll)
- viele Gestaltungsmöglichkeiten, hohes Potential für gebäudeintegrierte Anwendung
- variable Zellgröße
- höhere Abschattungstoleranz
- geringe Temperaturempfindlichkeit
- empfindlicher bei diffusem Licht

(-)

- teurer Rohstoff Ruthenium (prognostizierte hohe Nachfrage durch Brennstoffzellen- und Katalysatorenherstellung)
- geringe Langzeitstabilität (< 10 Jahre, wenn Glas als Trägermaterial)

Seit 1990 werden elektrochemische Farbstoffzellen untersucht und erreichen im Labor bereits einen Wirkungsgrad von 12 %. Bei diesen Zellen wird der Strom über die Lichtabsorption eines organischen Farbstoffes gewonnen; als Halbleiter kommt Titanoxid zum Einsatz. Der Vorgang kann mit einer technischen Photosynthese verglichen werden, ist aber noch nicht reif für die Großproduktion.

### 4.3.7 Organische Solarzellen

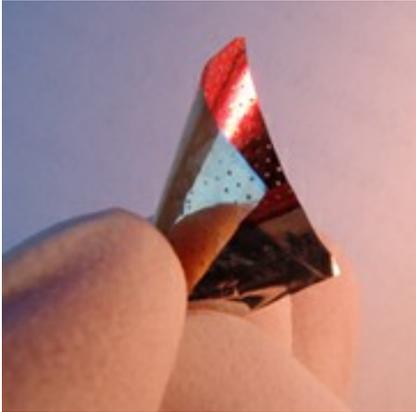


Abb. 88 ITO-freie« invertierte organische Solarzelle auf einem flexiblen Substrat (Unverkapselt), Quelle: [www.ise.fhg.de](http://www.ise.fhg.de)

Typische Wirkungsgrade: 3%

Marktanteil: noch nicht kommerziell erhältlich

(+)

- geringe Produktionskosten prognostiziert („Folien-PV“)
- leicht und flexibel

(-)

- geringe Langzeitstabilität (1-2 Jahre)
- sehr geringer Wirkungsgrad
- noch nicht marktreif
- für den Bausektor wegen geringer Lebensdauer noch ungeeignet

Organische Solarzellen benutzen Kohlenwasserstoffverbindungen, die Halbleitereigenschaften haben. Der Wirkungsgrad und die Haltbarkeit der augenblicklich verfügbaren Materialien liegen noch deutlich unter denen vergleichbarer Zellen auf Siliziumbasis. Jedoch lassen sich aus organischen Materialien bei angestrebt deutlich geringeren Produktionskosten Solarzellen herstellen, die transparent, biegsam und dünn wie Kunststoff-Folien sind und daher wesentlich vielfältiger und breiter einsetzbar sind. Geeignet für kurzlebige Produkte wie Verpackungen und Textilien.

## 5 Solarthermie

### 5.1 Grundlagen Solarthermie

Der Vorläufer heutiger Solarkollektoren wurde 1767 von dem Schweizer Wissenschaftler *Horace-Bénédict de Saussure* erfunden. Er baute einen einfachen Holzkasten mit schwarzem Boden und Glasabdeckung und erreichte Temperaturen von bis zu 87°C im Zwischenraum.

Im 19. Jahrhundert führten in Europa und den USA zahlreiche Erfindungen und Erkenntnisse zur Weiterentwicklung dieser Form der aktiven Solarnutzung, doch blieb die solare Wärmeengewinnung bis zur ersten Ölkrise 1973 eine Randerscheinung. 1974, als Reaktion auf die Auswirkungen dieser ersten weltweit spürbaren Energiekrise, startete das Bundesministerium für Forschung und Technologie das „Rahmenprogramm Energieforschung 1974-1978“ zur Erhebung von „experimentell gesicherten Daten für die Einsatzmöglichkeiten von Sonnen-, Wind-, und geothermischer Energie.“ In den späten 70er Jahren wurden zahlreiche Unternehmen gegründet, die in den Anfängen ihrer Arbeit zunächst auf Information und Aufklärung der Öffentlichkeit bauten. Mit Selbstbauanleitungen konnten sich Privatleute einfache Solaranlagen aus Kupferrohren und schwarz angestrichenen Kupferplatten basteln.

1979 kam der erste Vakuum-Röhrenkollektor auf den Markt. Gleichzeitig wurden allgemeingültige Bewertungskriterien und Testverfahren für Solarthermie definiert.

Im Bereich der Regelungs- und Systemtechnik verschaffte 1989 das Thermokompressionsverfahren, das die stabile Herstellung einer Glas-Metall-Verbindung ermöglichte, der Entwicklung der Vakuum-Röhrenkollektoren einen Aufschwung.

#### 5.1.1 Funktionsprinzip

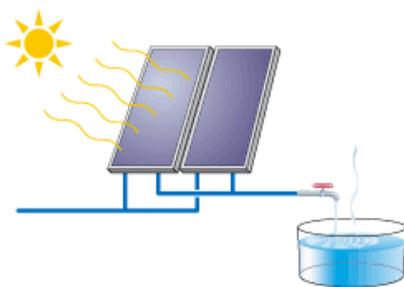


Abb. 89 Funktionsprinzip Solarthermie, Quelle: [www.thema-energie.de](http://www.thema-energie.de)

Das Funktionsprinzip der Solarthermie ist, die Wärmeenergie der Solarstrahlung zu absorbieren und verlustarm auf ein Wärmespeichermedium wie Wasser oder Luft zu übertragen. Hierfür muss der Absorber des Solarkollektors einen möglichst großen Prozentanteil der Strahlung aufnehmen. Um den Wärmeverlust durch Konvektion zu vermeiden, Abschlussbericht | Stand: 26.02.2009

wird die sonnenzugewandte Seite des Absorbers mit einem hochtransparenten Solarglas abgedeckt und auf der sonnenabgewandten Seite gedämmt. In einfachen offenen Kreisläufen kann die erwärmte Luft bzw. das erwärmte Wasser sofort vom Verbraucher genutzt werden. Bei geschlossenen Kreisläufen, in denen die Wärme indirekt über eine Soleflüssigkeit auf das Brauchwasser übertragen oder zur Heizungsunterstützung genutzt werden soll, ist die möglichst verlustarme Speicherung der Wärme notwendig (siehe 0). Aktiv gewonnene Sonnenwärme wird vor allem zur Brauchwassererwärmung verwendet. Auch die Heizungsunterstützung durch Sonnenwärme wird zunehmend wirtschaftlich sinnvoll.

### **5.1.2 Wirkungsgrad / Nutzungsgrad**

Bei einer jährlich eingestrahelten Energiemenge von etwa 1.000 kWh/m<sup>2</sup> beträgt der Kollektorsertrag bei Flachkollektoren ca. 300-400 kWh/m<sup>2</sup>a. Dies entspricht einem Nutzungsgrad von 30% - 40%. Eine übliche Kollektorgröße von 6m<sup>2</sup> kann somit ca. 2.000 kWh Energie pro Jahr bereitstellen. Allerdings fällt die Energie größtenteils im Sommer an, wo diese im Wesentlichen der Warmwasserbereitung zugute kommt.

Der Wirkungsgrad von Kollektoren gibt an, welcher Anteil der auftreffenden Sonnenenergie in Nutzwärmeleistung umgewandelt werden kann. Als Richtwerte können die folgenden Wirkungsgrade angenommen werden:

- Offener Absorber: ca. 40%
- Luftkollektor: 60%-65%
- Flachkollektor: 65%-70%
- Vakuumröhrenkollektor: 80%-85%.

Der Wirkungsgrad darf dabei nicht mit dem Nutzungsgrad verwechselt werden. Erst dieser gibt an, wie viel der gesammelten Energie tatsächlich genutzt werden kann.

Der Nutzungsgrad ist sowohl Gebäude- und Nutzungsbezogen als auch abhängig von der Kollektorfläche. Dabei ist festzuhalten, dass der Nutzungsgrad bei steigender Kollektorfläche sinkt.

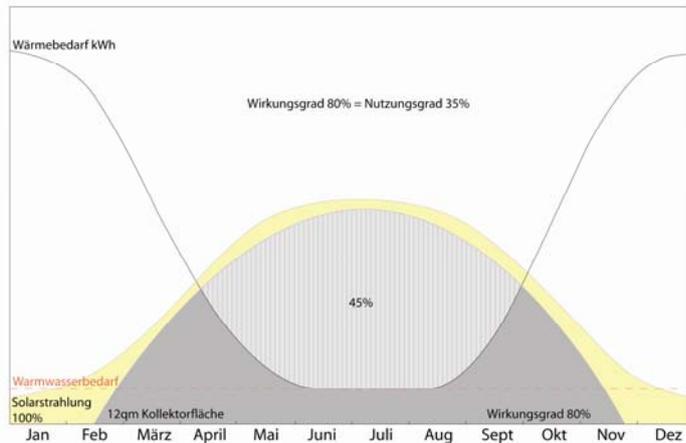


Abb. 90 Funktionsprinzip Solarthermie, Quelle: www.thema-energie.de

### Systemkomponenten

Eine solarthermische Anlage besteht in der Regel aus dem Kollektor als Wärmeabsorber, dem Wärmeträgermittel zum Wärmetransport und dem Wärmespeicher. Es lassen sich folgende Kollektortypen unterscheiden:

#### 5.1.2.1 Offene Absorber

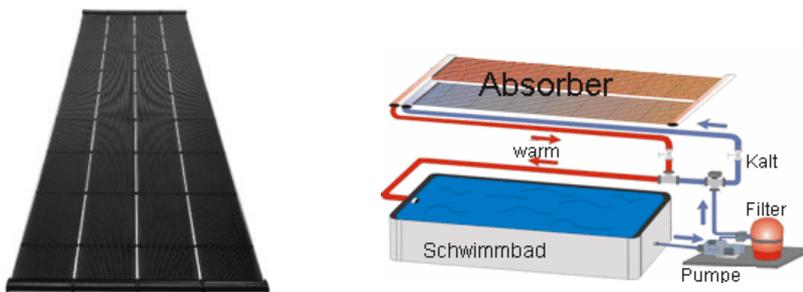


Abb. 91 offener Schwimmbadabsorber, Quelle: www.loebbeshop.de

Abb. 92 Funktionsprinzip offener Absorber, Quelle: www.leifi.physik.uni-muenchen.de

Der offene Absorber ist das einfachste System der solarthermischen Umwandlung. Die typische Anwendung findet der offene Absorber als Heizung im Freibad und als Wärmequelle für Wärmepumpen. Als Schwimmbadkollektoren fungieren einfache, auf einer entsprechend großen Fläche ausgelegte schwarze Schläuche, die meist in offene schwarze Kollektorflächen eingebettet sind. Das darin geführte Wasser wird durch die Sonnenstrahlen erwärmt und dem Becken zugelassen. Durch die hohen Wärmeverluste bleibt der Wirkungsgrad allerdings gering.

#### 5.1.2.2 Flachkollektoren

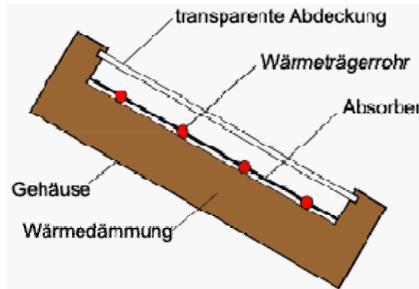


Abb. 93 Flachkollektor | Quelle: www.solarserver.de

Der Flachkollektor der siebziger Jahre ist der direkte Nachfahre der Hot Box von de Sausure aus dem Jahre 1767: ein „Gedämmter Kasten“ mit einer der Sonne zugewandten Glasfläche, die ein geschwärztes Absorberblech abdeckt. In dieses meist kupferne Blech sind Kupferrohre integriert, die von einer Flüssigkeit durchströmt werden. So, wie sich im Laufe der Jahre die Absorberbeschichtungen verbessert haben, wurde auch die Dämmung des Rahmens und des Kollektorbodens bei geringerer Dicke immer effizienter. Bei den heute vorrangig verwendeten geschlossenen Systemen ist das Wasser, das die Kollektoren durchströmt, mit einem Frostschutzmittel auf Glykolbasis versehen. Hierdurch wird die Vereisung der Anlage im Winter verhindert. Durch die spezielle Solarglasabdeckung auf der sonnenzugewandten Seite des Kollektors erwärmt die Sonnenstrahlung die in den Absorberröhren zirkulierende Flüssigkeit.

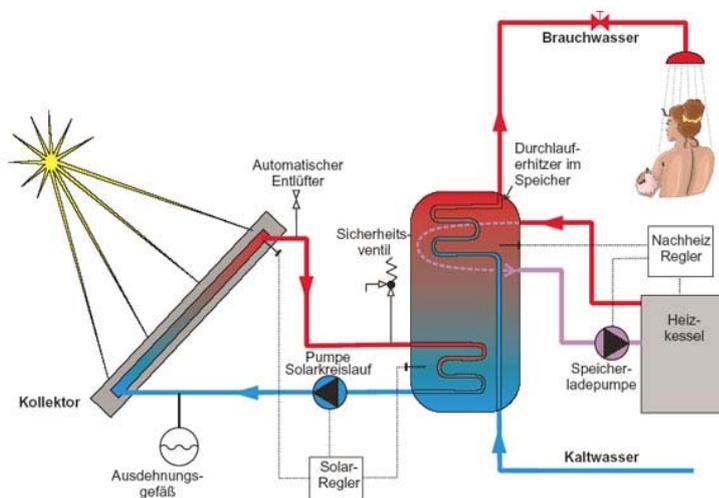


Abb. 94 Schema einer solarthermischen Anlage | Quelle: www.impulsprogramm.de

Die selektive Beschichtung der Absorberplatte bewirkt, dass die einfallende Strahlung möglichst vollständig absorbiert wird. Die Dämmung des Kollektorrahmens und -bodens reduziert die Wärmeverluste.

### 5.1.2.3 Vakuum-Flachkollektoren

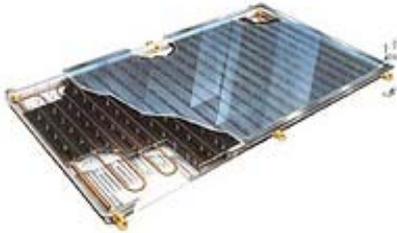


Abb. 95 Vakuumflachkollektor | Quelle: [www.impulsprogramm.de](http://www.impulsprogramm.de)

Vakuum-Flachkollektoren sind eine Weiterentwicklung der einfachen Flachkollektoren. Zwischen transparenter Abdeckung und Absorber besteht ein Vakuum, so dass die Wärmeverluste minimiert werden. Der herrschende Unterdruck innerhalb des Flachkollektors erfordert Abstandhalter, um eine Verformung der Bauteile zu vermeiden. Die vakuumbedingten geringeren Wärmeverluste verbessern den Wirkungsgrad des Kollektors vor allem in der kalten Jahreszeit. Auch die Lebensdauer wird verlängert, da keine Staubablagerungen im Inneren möglich sind.

### 5.1.2.4 Speicherkollektoren



Abb. 96 Speicherkollektor | Quelle: [www.justlanded.com](http://www.justlanded.com)

Speicherkollektoren sind Flachkollektoren mit integriertem Warmwasserspeichertank. Eine Reflexionsschicht auf der Innenseite der Isolierung bewirkt, dass auch von dort das Licht mit einem Hohlspiegeleffekt direkt auf die Absorberoberfläche des Flüssigkeitstanks trifft. Der Kollektor benötigt keinen externen Solarkreislauf und Speicher, nimmt aber auf der Dachfläche entsprechend mehr Platz ein.

### 5.1.2.5 Vakuum- Röhrenkollektoren



Abb. 97 Vakuumröhrenkollektor | Quelle: [www.solarthermietechologie.de](http://www.solarthermietechologie.de)

Diese Form des Kollektors besteht aus untereinander verbundenen, parallel zueinander angeordneten und evakuierten Glasröhren, in der flächige oder runde Absorber angeordnet sind. Die Dämmung erfolgt, wie beim Vakuum-Flachkollektor auch, durch ein Vakuum. Man unterscheidet direkt und trocken angebundene Kollektoren:

- Bei der direkten Anbindung zirkuliert eine Soleflüssigkeit über ein Doppelrohr durch die in den einzelnen Röhren befindlichen Absorberstreifen. In der äußeren Röhre erwärmt sich das Trägermedium und fließt in das Verbindungsrohr. Durch die innere Röhre strömt im Speicher abgekühlte Flüssigkeit nach. Von Vorteil ist, dass sich durch eine besondere Verschraubung die Röhren einzeln drehen lassen und so unabhängig von der Neigung und Ausrichtung des Untergrundes zur Sonne ausgerichtet werden können.
- Bei der trockenen Anbindung werden Absorberröhren eingesetzt, die von einer leicht siedenden Flüssigkeit durchflossen werden. Der entstehende Dampf erwärmt das Trägermedium des Anlagenkreislaufs im Sammelrohr und kondensiert.

Vakuum-Röhrenkollektoren weisen die besten Wirkungsgrade und die höchsten Betriebstemperaturen auf.

### 5.1.2.6 Solarglas

Neben dem Absorber spielt die Glasabdeckung des Kollektors die wichtigste Rolle für dessen Leistungsfähigkeit. Hierfür wird sogenanntes Solarglas eingesetzt, das einen geringeren Eisengehalt aufweist als andere Gläser. Es zeichnet sich durch eine hohe Transparenz bei gleichzeitig niedriger Reflexion aus. Außerdem ist das Glas besonders bruchfest und erfüllt damit hohe Ansprüche an thermische und mechanische Belastungen.

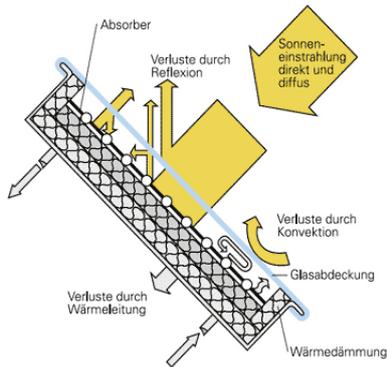


Abb. 98 Aufbau Flachkollektor und Lichtdurchlass | Quelle: www.energiesparmobil.de

Nimmt man eine Reduktion des Kollektorwirkungsgrades in Kauf, so besteht die Möglichkeit, durch Bedrucken, Gravur oder andere Bearbeitung des Glases in das Erscheinungsbild der Oberfläche des Kollektors einzugreifen. Durch Bedampfen des Glases mit Dünnschichtsiliziumzellen können sogenannte Hybridkollektoren (siehe Kapitel 5.5 Überblick Hybridkollektoren) nicht nur Wärme, sondern auch Solarstrom gewinnen. Das Institut für Solartechnik, SPF (Solartechnik, Prüfung, Forschung) hat die aufgeführten Anforderungen an ein Solarglas in einem Zertifizierungsverfahren zusammengestellt. Innerhalb dieses Verfahrens werden das Glas und dessen Leistungsfähigkeit über den Glaswirkungsgrad und entsprechende Leistungsklassen bewertet.

### 5.1.2.7 Speicher

Da das Maß an Sonneneinstrahlung nicht konstant ist, wird ein Warmwasserspeicher benötigt, der Zeiten mit geringem Strahlungsangebot überbrückt. Über einen Wärmetauscher wird die von den Kollektoren absorbierte Wärme an den möglichst gut gedämmten Speicher abgegeben. Der Speicher besteht meist aus emailliertem Stahl oder Edelstahl. Das Speichervolumen bestimmt den herstellbaren Überbrückungszeitraum.

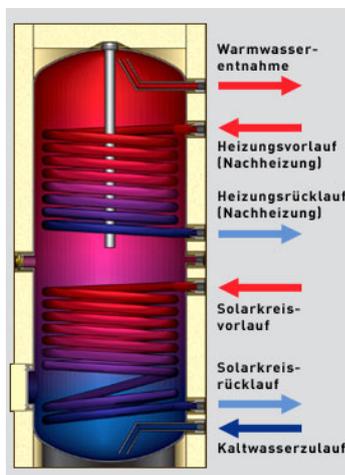


Abb. 99 Schema eines Warmwasserspeichers | Quelle: www.kleinke.de

Zu beachten ist, dass große Speicher bei geringer Sonneneinstrahlung ggf. nicht die notwendige Temperatur erreichen und entsprechend mit anderen Energieformen nachgeheizt werden müssen. In der Regel befindet sich der Wärmetauscher des Solarkreislaufes im unteren Bereich des Speichers. Durch das geringere spezifische Gewicht steigt das erwärmte Wasser nach oben. Im oberen Teil ist eine Möglichkeit zur Nacherwärmung vorhanden. Bei Entnahme von warmem Wasser strömt kaltes Trinkwasser in den Speicher nach.

## 5.2 Projektbeispiele – Solarthermie (flüssigkeitsgeführte Solarkollektoren)

Im folgenden Kapitel werden beispielhafte Lösungen der Addition und der Integration von Solarthermie in Verbindung mit der Gebäudehülle vorgestellt und bewertet.

### Fassadenintegration

- Wohnanlage, Batschuns, 1998  
Walter Unterrainer, Feldkirch
- Mehrfamilienhaus Sunny Woods in Zürich, 2001  
Beat Kämpfen Architekten, Zürich

### Dachintegration

- Wohn- und Bürohaus in Darmstadt, 2006  
opus Architekten, Darmstadt
- Zweifamilienwohnhaus, Nähe Berlin, 2005  
Pause Architektur GmbH, Berlin
- Haus Körner, Neubau eines Einfamilienhauses, 2006  
dd1 Architekten, Dresden

### Flachdachintegration

- Internationaler Studentenwettbewerb „Solar Decathlon 2007“  
Technische Universität Darmstadt

## 5.2.1 Fassadenintegration

### 5.2.1.1 Wohnanlage, Batschuns, 1998

Walter Unterrainer, Feldkirch



#### Beschreibung

Die Wohnanlage in Batschuns ist ein Ensemble von Reihenhäusern in Niedrigenergiebauweise. Die insgesamt sechs Wohnungen liegen auf einem südwestorientierten Hanggrundstück. Mit ihrer unbehandelten Lärchenholzverschalung passen sie sich in die von verwitterten Holzschindelfassaden geprägte ländliche Umgebung ein.



Abb. 100 Wohnanlage Batschuns, Quelle: www.nextroom.de

Abb. 101 Wohnanlage Batschuns, Quelle: Energieatlas, S.94, Abb. B 3.42

#### Integration

Das Energiekonzept zeichnet sich durch kompakte Bauformen, Luftdichtigkeit der Gebäudehülle und weitere passive Maßnahmen zur Minimierung des Heizwärmebedarfs aus. Die Südfassade ist fast vollverglast, die Nordeingangsseite nur mit kleinen Öffnungen versehen. Auf klassische Heizungssysteme wurde verzichtet. Für die Warmwassergewinnung stehen Kollektoren auf dem Dach und integrierte Zusatzkollektoren in den Fassaden zur Verfügung.

#### Leistung

Fassadenintegrierte Flachkollektoren sorgen zusammen mit den Kollektoren auf dem Flachdach für die Warmwasserbereitung. Sie sind je Wohneinheit mit einem 750 l-Warmwasserspeicher verbunden. Der minimierte Wärmebedarf von 10,4 kWh/m<sup>2</sup>a im Mittel wird durch die kontrollierte Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung abgedeckt. Im Bedarfsfall schaltet sich eine kleine Wärmepumpe ein, um die Luft auf Zimmertemperatur zu erwärmen.

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

### 5.2.1.2 Mehrfamilienhaus Sunny Woods in Zürich, 2001

Beat Kämpfen Architekten, Zürich



#### Beschreibung

Das Mehrfamilienhaus ist an einem Südhang gelegen. Passiv-solare Maßnahmen fangen das Sonnenlicht ein, dessen Wärme im Baukörper gespeichert wird. Die Holzkonstruktion des viergeschossigen Hauses wurde komplett vorgefertigt.



Abb. 102 Gesamtansicht MFH, Quelle: Dokumentation Sunny Woods, Zürich-Höngg, Beat Kämpfen  
 Abb. 103 und Detail Brüstungen, Quelle: Energieatlas, S.94 Abb. B 3.44

#### Integration

Der geringe Bedarf an Energie wird über die ins Dach integrierte Photovoltaikanlage und die als Balkongeländer genutzten Solarkollektoren erzeugt. Zusätzlich sorgt eine Lüftungsanlage für die Temperierung der Raumluft.

#### Leistung

Der Energiebedarf der gesamten Wohnanlage liegt bei 15 kWh/m<sup>2</sup>a, welcher durch die Dach-PV gedeckt wird.

Solarthermie			
<b>Anlage</b>			
Gesamtertrag	1836,00 kWh/a	Ertrag	900,00 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	3,00 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	2,04 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	612 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,68 kWp
Wirkungsgrad: 80%		System ist stark von Speichervolumen und Zeit abhängig	

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

## 5.2.2 Geneigtes Dach

### 5.2.2.1 Wohn- und Bürohaus in Darmstadt, 2006

opus Architekten, Darmstadt



#### Beschreibung

Das ursprünglich vorhandene, gründerzeitliche Wohnhaus war im Unterschied zur Nachbarbebauung nur zweigeschossig, daneben lag eine Baulücke. Der Altbau wurde um ein Geschoss aufgestockt, der Bestand wurde saniert und die Baulücke mit einem modernen, vollflächig verglasten Neubau geschlossen. Sowohl der Neubau als auch der sanierte Bestand sind nach Passivhausstandard konzipiert. Durch die Schließung der Baulücke konnten auch die Gebäudehüllflächen der Nachbarbebauung ökologisch sinnvoll minimiert werden.



Abb. 104 Straßenansicht Wohn- und Bürohaus, Quelle: opus Architekten

Abb. 105 Blick auf Solarthermie-Elemente, Quelle: opus Architekten

#### Integration

Die solarthermische und die Photovoltaikanlage sind als additive Systeme auf die Dachfläche des Bestandbaus montiert.

#### Leistung

Die Solarthermie hat eine Fläche von 24 qm und deckt mit einer Leistung von ca. 13.452 kWh/a den gesamten Warmwasserbedarf.

Solarthermie			
Anlage			
Gesamtertrag	13.452,00 kWh/a	Ertrag	950,00 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	24,00 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	14,16 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	560,50 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,59 kWp
Wirkungsgrad: 80%			

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

### 5.2.2.2 Zweifamilienwohnhaus, Nähe Berlin, 2005

Pause Architektur GmbH, Berlin



#### Beschreibung

Dieses Zweifamilienhaus wurde 2005 im Spreewald in der Nähe von Berlin errichtet. Die Dachfläche wurde mit einer integrierten Solarthermieanlage ausgestattet. Die Gebäudeausrichtung und die gewählte Dachneigung von 47,5° ermöglichen eine optimale Nutzung der nach Süden orientierten Dachfläche.

Dieses Projekt wurde von der DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) im Rahmen eines Forschungsprojektes begleitet.



Abb. 106 Detail Quickstep-Treppendach, Quelle: [www.rheinzink.de](http://www.rheinzink.de)

Abb. 107 Zweifamilienhaus Berlin, Quistep, Quelle: [www.rheinzink.de](http://www.rheinzink.de)

#### Integration

Die Solarthermie-Elemente sind in ein Kollektorsystem, das unter einer Metalloberfläche montiert ist, eingebettet. Unter dieser Oberfläche befindet sich ein Flüssigkeitsregister, das die anfallende solare Energie in einem geschlossenen Kreislauf abführt und zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung nutzbar macht.

Eine kontinuierliche Energiegewinnung ist auch im Winter und bei Bewölkung durch die Kopplung an eine Wärmepumpe gewährleistet.

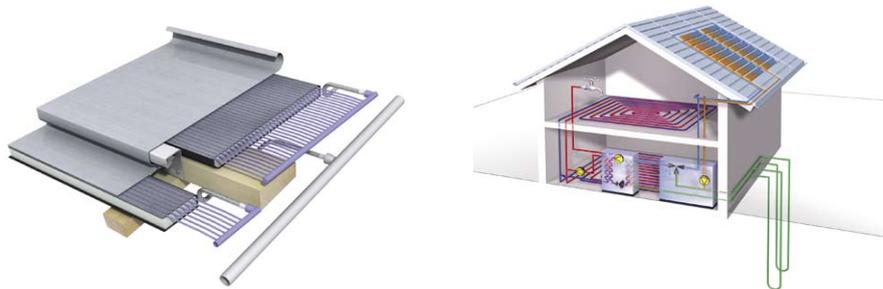


Abb. 108 Schema unverglaster Sonnenkollektor Quickstep Solarthermie, Quelle: [www.rheinzink.de](http://www.rheinzink.de)

Abb. 109 Prinzip Quickstep Einfamilienhaus Berlin, Quelle: [www.rheinzink.de](http://www.rheinzink.de)

### Leistung

Bei einer vierköpfigen Familie mit einer beheizten Nutzfläche von 312 qm liegt der Wärmebedarf dieses Hauses insgesamt bei 18.965 kWh/a (Heizwärmebedarf bei 16.565 kWh/a, der Warmwasserbedarf bei 2.400 kWh/a).

Warmwasser wird über einen 300l -Warmwasserspeicher mit 50°C bereit gestellt. Die Fußbodenheizung hat eine Heizkreisauslegungstemperatur von 35°C/30°C.

Solarthermie			
QuickStep Treppendach Anlage			
Gesamtertrag	4050 kWh/a	Ertrag	Keine Angaben
Solaraktive Fläche	16,2 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	
Ertrag/m <sup>2</sup>	250 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	
Wirkungsgrad: keine Angaben			

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

### 5.2.2.3 Haus Körner, Zweibrücken 2006

dd1 Architekten, Dresden



#### Beschreibung

Das Wohnhaus liegt den topografischen Gegebenheiten angepasst an einem Nordhang mit 15m Höhendifferenz. Nach Norden bietet ein großzügiges Panoramafenster den Blick über Zweibrücken, nach Süden öffnen sich die Wohnräume zum privaten Garten und über die geschosshohe Verglasung werden hohe solare Gewinne erzielt.

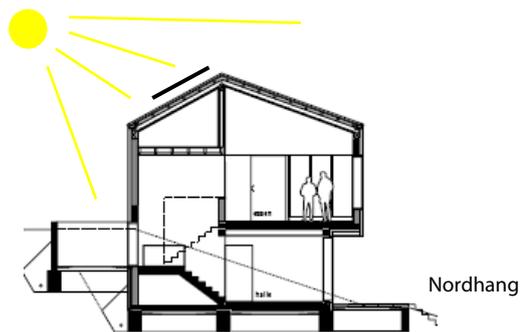


Abb. 110 Südansicht des Wohnhauses, Quelle: dd1 Architekten, Bildnachweis: Petra Steiner, Berlin

Abb. 111 Schnitt durch das Gebäude, Quelle: dd1 Architekten

#### Integration

Die auf dem Süddach montierte Flachkollektor-Solaranlage deckt, unterstützt von einer Pelletheizung, den Energiebedarf des Gebäudes. „Zusammen mit den hochgedämmten Außendwandbauteilen ergibt sich insgesamt - trotz des hohen Öffnungsanteils auf der Nordseite, der aufgrund des Panoramas geschaffen wurde - eine ausgeglichene Energiebilanz.“ (Zitat aus [www.baunetzwissen.de](http://www.baunetzwissen.de))

#### Leistung

Die Flachkollektorfläche beträgt 7m<sup>2</sup> und bedient einen Wärmespeicher mit einem Volumen von 750 Litern. Die Kesselleistung der Pelletheizung beträgt 14,9 kW.

Solarthermie			
Anlage			
Gesamtertrag	4042,5kWh/a	Ertrag	1050 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	7,00m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	3,85 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	577,50kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,55 kWp
Wirkungsgrad: 65%			

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

### 5.2.3 Flachdach

#### 5.2.3.1 Haus der TU Darmstadt zum Internationalen Studentenwettbewerb „Solar Decathlon 2007“



#### Beschreibung

Die Warmwasserbereitung des Gebäudes erfolgt über eine solarthermische Anlage, die ihre Erträge in einem 190 l-Warmwasserspeicher einträgt. Dieser wird sekundär elektrisch beheizt, wobei die erforderliche Energie durch die PV-Anlage erzeugt wird.



Abb. 112 Solarthermiemodul während des Einbaus, Quelle: FG\_ee

Abb. 113 Solarthermiemodul eingebaut, Quelle: FG\_ee

#### Integration

Zwei Solarthermieelemente sind mit einer Neigung von 3° auf das Flachdach montiert. Die Anlage wurde zusammen mit den Photovoltaikerelementen in ein einheitliches modulares System installiert. Das System dient nicht als wasserführende Schicht. Auch die Fußbodenheizung, die zugunsten eines erhöhten Komforts im Bad integriert ist, wird über die Solarthermie geheizt. Die optimierte Installationsführung minimiert die Leitungsverluste.

Solarthermie			
Anlage			
Gesamtertrag	1543,75 kWh/a	Ertrag	950 kWh/kWp
Solaraktive Fläche	2,50 m <sup>2</sup>	Leistung/Gesamt	1,63 kWp
Ertrag/m <sup>2</sup>	617,50 kWh/am <sup>2</sup>	Leistung/m <sup>2</sup>	0,65 kWp
Wirkungsgrad: 75 %		System ist stark von Speichervolumen und Zeit abhängig	

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

### 5.3 Grundlagen Luftkollektor (luftgeführter Solarkollektor)

Die ersten solaren Luftheizsysteme wurden 1881 in den USA aufgrund von Energieknappheit in Häusern eingesetzt und sind teilweise noch heute in Betrieb. Die heutigen Luftsysteme sind in der Entwicklung effizienter und kostengünstiger geworden, jedoch immer noch wenig verbreitet.

#### 5.3.1 Funktionsprinzip

Im Wesentlichen sind Luftkollektoren luftdurchströmte, verglaste Hohlräume in Dach oder Fassade, gedämmt oder vor einer Speichermasse (Sonderfall). Es muss zum einen zwischen industriell vorgefertigten Kollektoren und Vor-Ort gefertigten Kollektorfassaden bzw. -dächern unterschieden werden. Zum anderen zwischen einem natürlichen oder mechanischem (Ventilatoren-) Antrieb. Ein industriell vorgefertigter Kollektor erzielt, verglichen mit dem Vor-Ort-Kollektor, mehr Leistung bei gleichem Flächenverbrauch – ist aber meistens zum Entwurfskonzept addiert statt integriert, wie bei einer Kollektorfassade. Für die Effizienz dieser integrierten Systeme ist die Wahl der Speichermasse (Beton oder massives Holz) ausschlaggebend. In diesen Fassadenkonzepten liegt ein großes Potential für die architektonische Integration energetischer Entwurfsansätze. Beim Patchworkhaus von pfeifer.kuhn Architekten (siehe Kapitel 5.4.2.1) wird das Prinzip des Luftheizsystems bis auf die Spitze getrieben; hier wirkt das gesamte Haus als Luftkollektor. Der Reiz dieser integrierten Konzepte liegt in der Einheit von Gebäude und solarem Luftsystem, das je nach Anwendung auch ohne technischen Antrieb funktionieren kann.



Abb. 114 PharmaServiceCenter Binzen, Fassadenschnitt (Luftkollektor, Betonwand) und Verwaltung (Luftkollektor, Brettstapelwand), Quelle: [www.pfeifer-kuhn.de](http://www.pfeifer-kuhn.de)

Abb. 115 Dach-Verlegung des Luftkollektor-Systems "puren Bomatherm", Quelle: [www.baulinks.de](http://www.baulinks.de)

Der Luftkollektor ist eine Alternative zum konventionellen wasserdurchströmten Flachkollektor. Der Aufbau beider Systeme ist ähnlich, Luftkollektoren bedienen sich lediglich der Luft als Wärmeträgermedium.

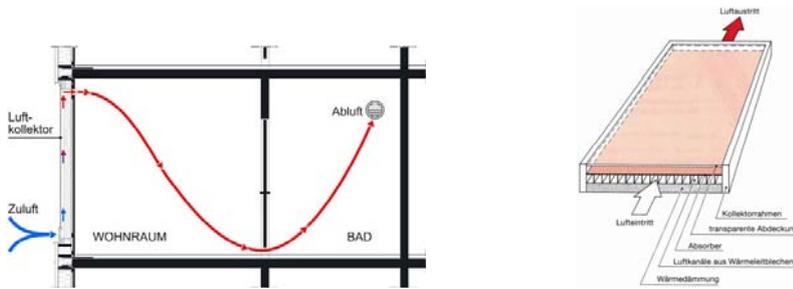


Abb. 116 Gesamtsystem Zulufterwärmung durch Luftkollektor, Quelle: www.archiv.ensan.de

Abb. 117 Luftkollektor, Quelle: RWE Bau-Handbuch 2004, S.17/14

Aufgrund der geringen Wärmekapazität von Luft (Wärmespeicherkapazität 0,0003 kWh/m<sup>3</sup>K gegen über 1,16 kWh/m<sup>3</sup>K von Wasser) werden große Volumina und Querschnitte benötigt, um die erforderlichen Energiemengen zu transportieren. Demgegenüber bietet die Luft als Trägermedium den Vorteil, dass die Kollektoren weniger anfällig für Korrosion und Vereisung sind und bei System-Leckagen keine großen Schäden entstehen. Luft tropft nicht, gefriert nicht und steht durchgängig in ausreichender Menge zur Verfügung. Die Luft umströmt die Absorberplatte, wird über diese hinweg geführt oder unter ihr in Kanälen geleitet. Sie erwärmt sich und wird meist zur direkten Raumlüfterheizung benutzt. Luftkollektoranlagen kommen mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen zur Raumerwärmung aus. Die Kollektortemperatur muss nur geringfügig über der Lufttemperatur im zu erwärmenden Raum liegen. Durch das Vorwärmen der Frischluft sind die solaren Luftkollektoren schon bei geringer Sonneneinstrahlung energetisch wirksam und sehr effizient.

### 5.3.2 Systeme

Für Gebäude werden verschiedene Luftkollektorsysteme unterschieden:

- Luftstrom oberhalb des Absorbers (zwischen Scheibe und Absorber):

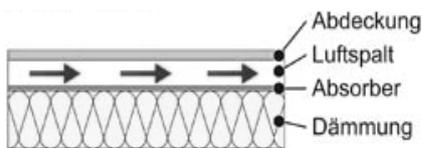


Abb. 118 Überströmung, Quelle: www.archiv.ensan.de

Nur für Frischlüfterwärmung bzw. geringe Temperaturerhöhung geeignet. Dieses Prinzip ist aufgrund seiner Einfachheit in der Herstellung kostengünstig. Doch können zwischen Absorber- und Außenlufttemperatur hohe Differenzen auftreten. Bei Anlagen ohne einen Ventilator besteht eine große Abhängigkeit von der Außenluftgeschwindigkeit.

- Luftstrom unterhalb des Absorbers (zusätzlicher Strömungskanal erforderlich): diese Konstruktion hat sich weitestgehend durchgesetzt.

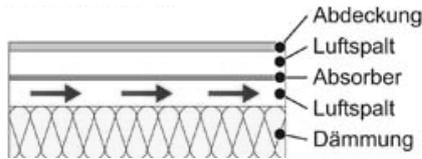


Abb. 119 Unterströmung, Quelle: www.archiv.ensan.de

- Kombination aus 1. + 2. ( Luftstrom oberhalb des Absorbers hin und unterhalb des Absorbers zurück)

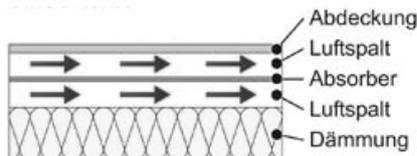


Abb. 120 Umströmung, Quelle: www.archiv.ensan.de

- Luftstrom durch den Absorbern hindurch:

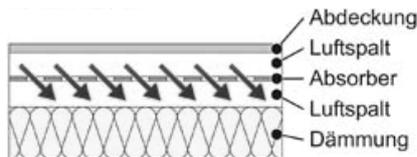


Abb. 121 Durchströmung: Quelle: www.archiv.ensan.de

Die Luft durchströmt den Absorber, der aus porösem Material besteht: Hier erfolgt ein sehr guter Wärmeübergang vom Absorber an die durchströmende Luft. Zu beachten ist, dass die Luft zwischen Scheibe und Absorber zugeführt werden muss.

### 5.3.3 Wärmespeichernde Elemente – kollektorintegriert oder gesondert

Die wärmespeichernden Elemente bei solaren Luftkollektoren können Gesteinsspeicher, Hypokausten und Murokasten, massive Kanäle, Kamine und Trombewände sein. Hypokaustenelemente können als Fertigdecken, Hohlböden oder Rohrregister in Beton ausgeführt werden. Wände oder Geschossdecken sind als Speichermedien eher schwierig nutzbar. Unter Umständen sind Ventilatoren notwendig, um die erwärmte Luft in die Speichermedien einzubringen.

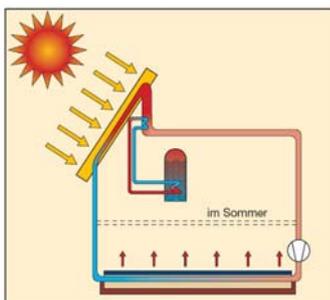


Abb. 122 Warmwasserzubereitung in einem Hypokaustensystem, Quelle: www.bine.de

### 5.3.4 Kenndaten

Mit Luftkollektoren kann man pro qm Kollektorfläche Erträge von ca. 100 bis 350 kWh pro Jahr erzielen. Der Energieertrag ist von Faktoren wie Ausrichtung der Kollektorfläche und der Systemart abhängig.

### 5.3.5 Synergien

Die Integration von Luftkollektoren in der Fassade oder im Dach verringert maßgeblich die Transmissionswärmeverluste des Gebäudes. Besondere Synergieeffekte sind bei Gebäuden mit hohem Frischluftbedarf und vorhandener Lüftungsanlage durch die Sanierung der Fassade (z.B. Solar Wall) zu erzielen.

Ein weiterer Synergie-Effekt der durch die Nutzung der erwärmten Luft im Sommer erreicht wird, ist die Warmwasserbereitung. Mittels eines Luft-Wasser-Wärmetauschers kann der Luft die Wärme entzogen und dem Wasserkreislauf des gespeicherten Wassers zugeführt werden.

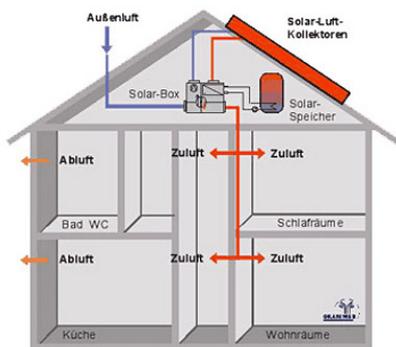


Abb. 123 Funktionsschema solares Luftsystem, Quelle: [www.baunetz.de](http://www.baunetz.de), Bildnachweis: AFS Solar-Lufttechnik GmbH, Südlohn

Eine zusätzliche Variante zu solarunterstützten Luftsystemen bietet die Einbindung eines Erdwärmetauschers (EWT) in die Anlage. Diese nutzen die Temperaturdifferenz von der Umgebungsluft zum Erdboden. Im Sommer für die Einspeicherung von überflüssiger Wärme, die den Räumen entzogen wird, im Winter für das Vorwärmen der Luft, die dann in die Räume abgegeben wird.

Das unten abgebildete Fassadensystem () zeigt eine Integration von Luftkollektoren und einer Photovoltaikanlage im Brüstungsbereich. Dahinter befindet sich ein Heiz-, Kühl- und Lüftungsgerät mit Wärmetauscher.

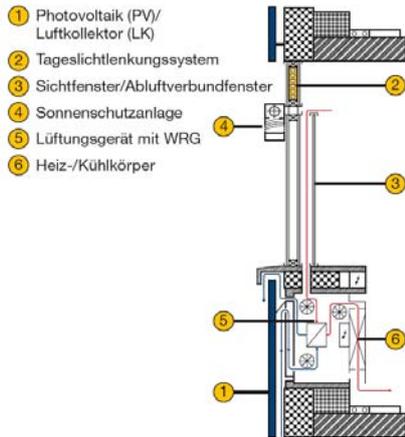


Abb. 124 Fassadenschnitt mit Luftführung (Winterbetrieb), Quelle: www.bine.de

Das Gerät ist mit dem aktiv durchströmten Scheibenzwischenraum (ein Spalt zwischen Zusatzscheibe und Wärmeschutzverglasung) des Fensters verbunden. Im Winterfall wird die Zuluft über den Luftkollektor vorgewärmt, dem Wärmetauscher zugeführt und kann für die Erwärmung, aber auch zur Frischluftzufuhr eines Raumes dienen. Die verbrauchte Luft kann ebenso über den Scheibenzwischenraum nach außen geführt werden. Das photovoltaisch aktivierte Brüstungselement deckt den Energiebedarf für die Ventilatoren der Lüftung.

Im Kapitel 5.5 Überblick Hybridkollektoren werden weitere Synergien aus der Zusammenschaltung von Luftkollektoren mit anderen Systemen beschrieben.

## 5.4 Projektbeispiele Luftkollektor

Im Folgenden werden Steckbriefe zum Thema Integration von Luftkollektoren in die Gebäudehülle anhand von Beispielprojekten vorgestellt. Die Auswahl ist hier ausschließlich auf Beispiele gefallen, bei denen das Luftkollektorsystem direkt in die Gebäudehülle integriert ist.

### Fassadenintegration

- Gründerzentrum Hamm, 1998  
Hegger Hegger Schleiff
- Institut für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene der Uni Freiburg, 2006  
Pfeifer Kuhn, Freiburg
- Wohnanlage in Kolding, DK 1998  
3XNielsen, Århus

### Geneigtes Dach / Fassade

- Patchworkhaus in Müllheim, 2004  
Pfeifer Roser Kuhn, Freiburg

### 5.4.1 Fassadenintegration

#### 5.4.1.1 Gründerzentrum Hamm, 1998

Hegger Hegger Schleiff



##### Beschreibung

Das Gründerzentrum entstand im Rahmen des Ökozentrums Nordrhein- Westfalen auf einem ehemaligen Zechengelände. Das Zentrum ermöglicht ökologisch orientierten Handwerks- und Dienstleistungsbetrieben des Baugewerbes eine zeitlich befristete Anmietung von Büro-, Werkstatt- oder Lagerflächen. Bis zu zwanzig verschiedene Unternehmen können dabei von den entstehenden Synergie- Effekten profitieren.

Die innerhalb der Hallen vorgenommene thermische Zonierung lässt sich nachträglich verändern, so können unbeheizte Lagerbereiche bei Bedarf zu vollwertigen Werkstattflächen umgenutzt werden.



Abb. 125 Luftkollektorfassade am Gründerzentrum Hamm, Quelle: FG\_ee

Abb. 126 Gesamtansicht Gründerzentrum, Quelle: FG\_ee

##### Integration

Die Beheizung der Hallen erfolgt über eine Luftheizung. Die Außenluft wird je nach äußeren Bedingungen über einen Erdkanal oder über einen, die gesamte Südfassade umfassenden Zuluftkollektor vorkonditioniert. Auf einer Fläche von ca. 120 m<sup>2</sup> dient eine geschuppte Einfachverglasung als Kollektorabdeckung. Die Absorberfläche besteht aus schwarzem Schaumglas und dämmt damit gleichzeitig den Innenraum zuverlässig gegen Überwärmung ab. Die Luft wird von oben angesaugt, erwärmt sich und wird dann den Räumen und den benachbarten Hallen zugeführt.

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

**5.4.1.2 Institut für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene der Universität Freiburg, 2006**  
 Pfeifer Kuhn, Freiburg



**Beschreibung**

Das Institutsgebäude gilt als Modellprojekt für Ökologie und Energieeffizienz, das sich sowohl in der Optimierung der Gebäudestruktur und dessen Zonierung, als auch in der gewählten Konstruktion und dem Materialkonzept ausdrückt.

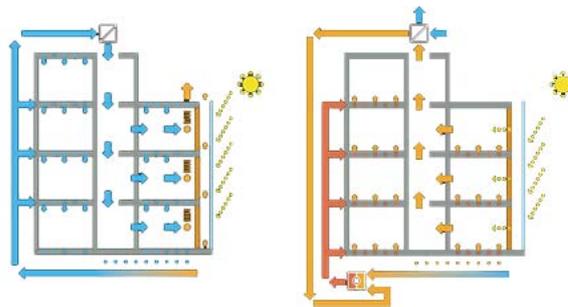


Abb. 127 Südostansicht Institutsgebäude, Verglasung vor massiver Holzwand als Speichermasse, Quelle: [www.pfeifer-kuhn.de](http://www.pfeifer-kuhn.de)  
 Abb. 128 Energieschema Sommer und Winter, Quelle: [www.pfeifer-kuhn.de](http://www.pfeifer-kuhn.de)

**Integration**

Das Energiekonzept des Gebäudes basiert auf dem kybernetischen Prinzip. Ein Großteil der benötigten Energien wird aus natürlichen Ressourcen gewonnen. Die Luftkollektorfassade ist ein Bestandteil dieses Konzepts und dabei ebenso entwurfsbestimmend wie die auf der Südwestseite liegenden Wintergärten. In Kombination mit weiteren Systemkomponenten, wie die Nutzung der oberflächennahen Erdwärme, Wärmerückgewinnung und Bauteilaktivierung der Speichermassen, werden die funktional verschiedenen Räume gewärmt oder gekühlt.

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

**5.4.1.3 Wohnanlage in Kolding (Dänemark), 2002**  
 3XNielsen, Århus



**Beschreibung**

Unter dem Titel „Ökologisches Bauen“ entstand in Kolding (DK) eine Wohnanlage, deren Häuser für diesen Breitengrad optimal in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet sind. Von Norden werden die Häuser erschlossen. Küchen und Badezimmer befinden sich ebenfalls im Rücken des Hauses, gen Süden orientieren sich Wohn-, Ess- und Schlafzimmer sowie Balkone.

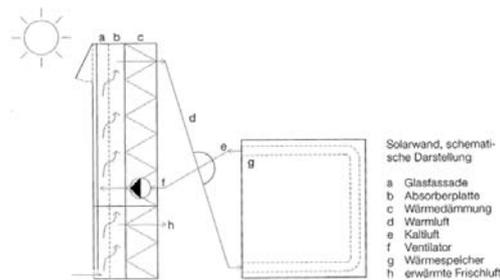


Abb. 129 Wohnanlage mit Luftkollektoren, Kolding (DK), Quelle: Detail 2002/6, Solares Bauen, S.758-761

Abb. 130 Schema Solarwand Wohnanlage Kolding (DK), Quelle: Detail 2002/6, Solares Bauen, S.758-761

**Integration**

Die Südfassade erreicht dank der Ausrichtung eine gute Ausnutzung der Sonnenenergie. Sie sammelt einerseits über den hohen Verglasungsanteil, andererseits über die integrierte Luftkollektor-Solarwand solare Energiegewinne, die die zentrale Heizungsanlage unterstützt. Die Solarwand heizt im unteren Teil die eingefangene Frischluft vor. Im oberen Teil wirken die hinter der transparenten Abdeckung liegenden Betontrennwände als Wärmespeicher. Durch den Antrieb eines Ventilators wird an sonnigen Tagen die warme Luft in den Speicher geleitet, der diese dann wiederum nachts an die Räume abgibt.

**Leistung**

Der jährliche Energieertrag der Luftkollektor- Solarwand liegt bei 120 kWh/m<sup>2</sup>. Darüber hinaus wird ein Teil des gesammelten Regenwassers mit Hilfe der Sonnenkollektoren erwärmt und im gemeinschaftlichen Waschraum weitergenutzt.

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

## 5.4.2 Geneigtes Dach / Fassade

### 5.4.2.1 Patchworkhaus in Müllheim, 2004

Pfeifer Roser Kuhn, Freiburg



#### Beschreibung

Das Haus ist ein Doppelhaus. Die einzelnen Funktionsräume sind über Treppen durch den zentralen Atriumraum miteinander verbunden.



Abb. 131 Patchworkhaus Gesamtansicht, Quelle: [www.pfeifer-kuhn.de](http://www.pfeifer-kuhn.de)

Abb. 132 Detail transparentes Polycarbonat, Quelle: [www.pfeifer-kuhn.de](http://www.pfeifer-kuhn.de)

#### Integration

Die Außenwände des Hauses bestehen an den Giebelseiten aus massivem Porenbetonmauerwerk, an den Traufseiten aus einer vorgestellten Hülle aus Polycarbonatplatten, einem Luftzwischenraum und Brettstapelwänden.

Das Atrium erhält über das Dach aus transparenten Polycarbonatplatten großzügig Licht, von dem auch die umliegenden Räume über Innenfenster profitieren. Gleichzeitig versorgt es das gesamte Haus mit Sonnenenergie. Lüftungsöffnungen in der Dachfläche öffnen (Sommer) und schließen (Winter) das System und erlauben eine einfache Steuerung von Erwärmung und Kühlung.

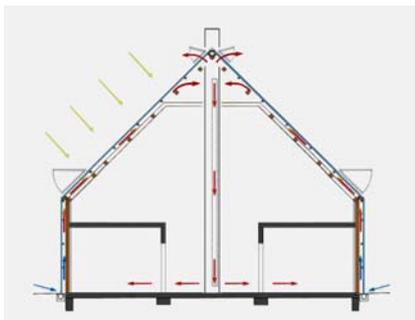


Abb. 133 Schnitt durch das Patchworkhaus, Quelle: [www.architektur.tu-darmstadt.de/powerhouse](http://www.architektur.tu-darmstadt.de/powerhouse)

Die kontrollierte Luftschicht zwischen Fassade und Wand bildet einen Luftkollektor, der die solare Energie nutzbar macht. Im Winterfall wirkt die stehende Luft im 8 cm breiten Zwischenraum zwischen 4 cm Polycarbonatplatten und einer 16 cm Brettstapelwand als zusätzliche Dämmschicht.

Für das gesamte Haus wurde auf Dämmstoffe verzichtet. Die Zonierung, das Atrium und die Kollektor-Wand- und -Dachflächen senken den Heizenergiebedarf so weit, dass eine Heizung als Bauteilaktivierung in den Betondecken ausreicht.

### Leistung

Die ersten Evaluierungen haben folgende Energieverbräuche ergeben: Wärmeverbrauch 16.222 kWh/a, davon 4.320 kWh/a Trink-Warmwasser und 11.900kWh/a Heizwärme. Dies entspricht 31,6 kWh/m<sup>2</sup>a.

Der Stromverbrauch lag 2007 bei 5.000 kWh/a.

Konstruktive Einbindung			Formale Einbindung		
Entflechtung	Verflechtung	Verschmelzung	Addition	Integration	Adaption

## 5.5 Überblick Hybridkollektoren

### 5.5.1 Photovoltaikanlage mit integriertem Luftkollektor

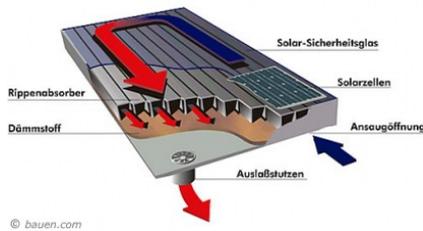


Abb. 134 PV-Luftkollektor mit Rippenabsorber, Quelle: www.baunetz.de

Die Koppelung von Photovoltaikmodulen mit dahinter angeordnetem Luftkollektor erhöht den Wirkungsgrad des solaren Systems deutlich. Zum einen wird neben Elektrizität zusätzlich Wärme erzeugt, zum anderen kühlt die einströmende Luft die Photovoltaikzellen und vermeidet so insbesondere bei kristallinen Zellen einen Abfall der elektrischen Leistung. Die auf das Photovoltaikmodul auftreffende Solarstrahlung führt zur Erwärmung des Moduls. Die Wärme wird an die Luft im Hinterlüftungszwischenraum abgegeben.

Die Anwendung solcher hybrider Anlagen findet man vor allem in größeren Projekten wie Hallenbädern, Sporthallen, Lager- und Produktionshallen, Verkaufshallen, Bürogebäuden und Schulen. Aber auch für kleinere Bürobauten und auch im Wohnungsbau können solare Luftsysteme in Kombination mit Photovoltaik-Anlagen architektonisch, technisch und wirtschaftlich interessante Synergien bieten.



Abb. 135 Klostertaler Umwelthütte – Silvretta, Quelle: www.grammer-solar.de

Abb. 136 Autarke Fassaden-Kollektoranlage in Holz-Rahmen-Bauweise, Quelle: www.grammer-solar.de

### 5.5.2 Hybridkollektor PV und flüssigkeitsgeführte Solarthermie

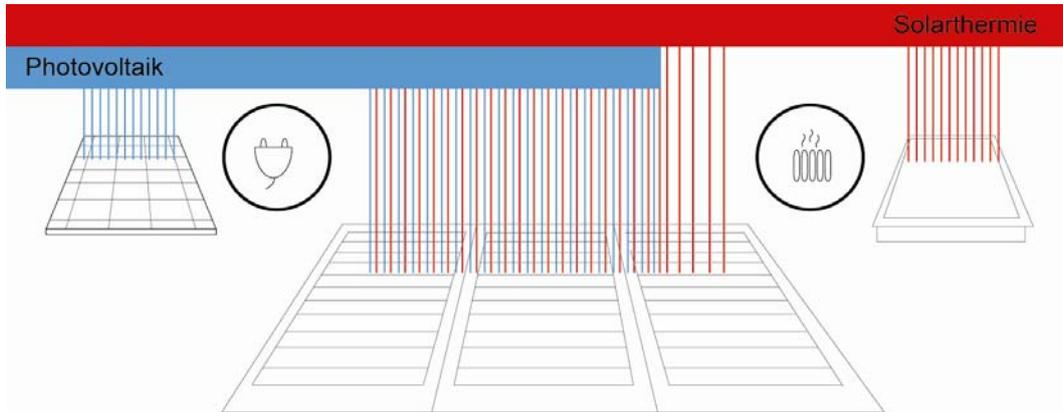


Abb. 137 Synergie Hybridkollektor, schematische Darstellung

Der Zusammenschluss von flüssigkeitsgeführter Solarthermie und Photovoltaik in einem Kollektor bringt viele Vorteile mit sich und reduziert zugleich die Nachteile der einzelnen Systeme. Ein Hybridkollektor nutzt das gesamte Spektrum des Sonnenlichts und produziert sowohl Wärme als auch Strom. Die Solarthermie trägt zur Kühlung der Photovoltaik-Zellen bei, was einen Leistungsabfall verhindert. Abgesehen von den technischen Vorteilen tragen Hybridkollektoren auch zur Gestaltung klarer und einheitlicher Dachbilder bei.

Hybridkollektoren dieser Art werden mittlerweile in Serie produziert. Architektonisch reizvolle Projektbeispiele sind jedoch noch nicht bekannt.



Abb. 138 Multi-Hybrid-Kollektoren (5-er und 3er) der Firma solarhybrid, Quelle: [www.solarhybrid.ag](http://www.solarhybrid.ag)

Abb. 139 Aufdach-Montage auf einem Einfamilienhaus in Zaberfeld, Quelle: [www.solarhybrid.ag](http://www.solarhybrid.ag)

### 5.5.3 Wasser-Luft-Hybridkollektoren

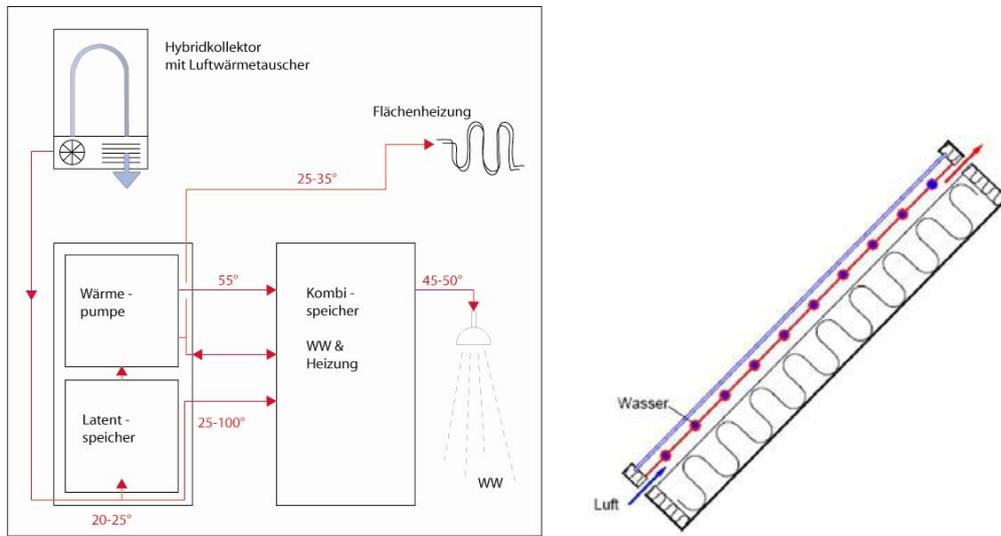


Abb. 140 Funktionsprinzip Hybridkollektor mit Wärmepumpe und Latentspeicher (System solaera von consolar)

Abb. 141 Aufbau eines Luft-Wasser-Hybridkollektors, Quelle: www.ersotec.de

Wasser-Luft-Hybridkollektoren vereinen die Vorteile des Wasserkollektors mit denen des Luftkollektors durch den parallelen Einsatz der zwei Wärmeträger Wasser und Luft. Gute Wasserkollektoren erzielen Leistungen von ca. 525 kWh/m<sup>2</sup>a, die Höchstleistungen von luftgeführten Solarkollektoren liegen bei ca. 225 kWh/m<sup>2</sup>a. Die Leistung eines guten Hybridkollektors bringt diese Einzelerträge zusammen und erreicht Werte von über 700 kWh/m<sup>2</sup> aufsteigend. Diese Werte werden durch folgendes Funktionsprinzip erreicht: Ein Hybridkollektor funktioniert ganzjährig, da er nicht nur direkte Sonnenstrahlung in Wärme umwandelt, sondern auch die indirekte Wärme der Umgebungsluft nutzt. Der integrierte Luftkollektor kompensiert den geringeren Leistungsertrag des Wasserkollektors in der Übergangsjahreszeit und im Winter, da er aufgrund geringerer Anlauftemperaturen reaktionsschneller ist. Die im Sommer anfallende Wärme des Luftkollektors bleibt demgegenüber meist ungenutzt. In Kombination mit einer Wärmepumpe und einem Latentwärmespeicher ist der Luft-Wasser-Hybridkollektor auch bei schlechterem Wetter und in der Nacht nutzbar (siehe). Die Umgebungsluft wird durch den Kollektor geführt und erwärmt die kalte Solarflüssigkeit im Latentspeicher. Laut Herstellerangaben ist die erreichte Leistung zur Hauswärmeversorgung doppelt so hoch wie bei konventionellen Solarsystemen.

## 6 SolarIntegrator

Der SolarIntegrator ist ein interaktives Planungswerkzeug das für Architekten, Fachplaner und Bauherren konzipiert ist. Die Wirkung aktiver solarer Systeme kann durch dieses Hilfsmittel mit wenigen einfachen Eingaben bereits in der Entwurfsphase überprüft und gegebenenfalls optimiert werden. Hauptziel des SolarIntegrators ist dementsprechend das Aufzeigen der Potentiale einer Integration solarer Systeme in die Gebäudehülle.

Der ökonomische, ökologische und ästhetische Mehrwert durch die Substitution ohnehin benötigter Bauelemente wird leicht verständlich und auf Wunsch objekt- und nutzerspezifisch dargestellt. Durch eine Verknüpfung mit bereits bestehenden Baustoffdatenbanken und Produktpreisen kann der SolarIntegrator in der Folge als entwurfsbegleitendes Anwendungstool für Planer und Bauherren dienen. Die Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Solarenergienutzung werden grafisch leicht verständlich dargestellt. Dieses Werkzeug soll damit dazu beitragen, bestehende Vorurteile zu beseitigen und das Potential der Solartechnik greifbarer zu vermitteln. Zusätzlich besteht die Option, mittels eines begleitenden CO<sub>2</sub>-Rechners den Umfang der Emissionsminderung aufzuzeigen.

Die konzeptionelle Entwicklung dieses Werkzeugs war nur möglich durch die begleitende Einbindung der Arbeitsergebnisse des Forschungsprojektes energy:label, das ebenfalls im Rahmen der Initiative „Zukunft Bau“ erarbeitet wurde. Diese Ergebnisse erlauben u. a. eine am Bedarf (Warmwasser, Heizwärme, Strom) orientierte und realitätsnahe Bemessung der solaren Systeme. Diese findet nicht unter Normbedingungen statt, sondern kann vereinfacht mit den Daten eines Energieausweises durchgeführt werden, was die Bedienbarkeit auch für Laien ermöglichen soll.

Durch eine enge Anbindung an einen begleitenden Leitfaden wird das Anregungspotential der Beispiele ergänzt durch die Möglichkeit, die Übertragung oder Weiterentwicklung von Ideen zur solaren Energienutzung zu ergänzen, indem konkrete Daten hinterlegt werden, die Leistungs- und Kostendaten beitragen. Die Struktur und Bedienung des Solarintegrators wird im Folgenden erläutert.

Der Nutzer hat die Wahl zwischen verschiedenen Maßnahmenarten. Bei einem Neubau besteht die Chance, den Entwurf mit Hilfe des SolarIntegrators hinsichtlich des Standortes, der Ausrichtung und gegebenenfalls der Dachneigung zu optimieren. So kommt bei frühzeitiger Anwendung des Tools neben den Standardfunktionen „Bewerten“ und „Bemessen“ die Möglichkeit der solaren Entwurfsoptimierung hinzu.

Bei Altbausanierungen steht der ökonomisch sinnvolle Einsatz aktiver solarer Systeme im Fokus. Das Bestandsgebäude wird auf eine mögliche Eignung geprüft und solare Systeme zur Deckung des ermittelten Bedarfs bemessen. Nach der Systemwahl werden die Kosten, Einsparungen, Amortisationszeit sowie mögliche Gewinne bilanziert. Im Falle des Denkmalschutzes liefert der begleitende Leitfaden Informationen zu öffentlich-rechtlichen Vorschriften und Verfahrenswegen.

Nach Wahl der Baumaßnahme wird zunächst in einer einfachen Eingabemaske ein „Standortprofil“ erstellt (Eingaben: Landkreis, Orientierung, Flächenneigung, evtl. Verschattung). Die Eingabe wird durch leicht verständliche Piktogramme und intuitiv benutzbare Bedienelemente erleichtert.

**ENERGY : SHELL**  
SOLARKALKULATOR PLUS +

Erstellung des Standortprofils

Schritt 1

Auswahl der geplanten Baumaßnahme:

Neubau

Altbausanierung

Schritt 2

Grundlagenermittlung:

Landkreis:

Dachfläche:  m<sup>2</sup>

Dachneigung  °

Ausrichtung:

Azimut:

Abb. 142 Erstellung des Standortprofils, Quelle FG\_ee

Im nächsten Schritt erfolgt die Erstellung des „Gebäudeprofils“ (Eingaben: Fläche, Volumen, Wärmedämmstandard, Heizsystem, Fensteranteil sowie Dach- und Fassadenfläche) sowie die Eingabe der Verbrauchsdaten für Strom- und Wasserverbrauch.

ENERGY : SHELL					
SOLARKALKULATOR PLUS +					
<b>Erstellung des Gebäudeprofils</b>					
<i>Schritt 3</i>					
Gebäudefläche:	<input type="text" value="74"/>	m <sup>2</sup>	Dachfläche:	<input type="text" value="54"/>	m <sup>2</sup>
Gebäudevolumen:	<input type="text" value="185"/>	m <sup>3</sup>	Fassadenfläche Süd:	<input type="text" value="30"/>	m <sup>2</sup>
Gebäudetyp:	<input type="text" value="x"/>		Fassadenfläche Ost:	<input type="text" value="15"/>	m <sup>2</sup>
Wärmedämmstandard:	<input type="text" value="x"/>		Fassadenfläche West:	<input type="text" value="15"/>	m <sup>2</sup>
Heizsystem:	<input type="text" value="Öl"/>		Verbrauch:	<input type="text" value="200"/>	l/m <sup>3</sup>
			tägl Wasserverbrauch:	<input type="text" value="40"/>	l
			Zirkulationsleitung	<input type="text" value="ja"/>	
Stromverbrauch:	2005	<input type="text" value="4500"/>	kWh		
	2006	<input type="text" value="8000"/>	kWh		
	2007	<input type="text" value="6500"/>	kWh		

Abb. 143 Erstellung des Gebäudeprofils, Quelle: FG\_ee

Die für die Bedarfsermittlung benötigten Nutzerdaten werden abschließend im „Nutzerprofil“ erfasst

ENERGY : SHELL			
SOLARKALKULATOR PLUS +			
<b>Erstellung des Nutzerprofils</b>			
<i>Schritt 4</i>			
Nutzeranzahl:	<input type="text" value="2"/>	P.	
Nutzungszeiten:	von <input type="text" value="7"/>	h	bis <input type="text" value="9"/>
	von <input type="text" value="18"/>	h	bis <input type="text" value="23"/>
Anzahl Hausgeräte:	<input type="text" value="12"/>	Stk.	
Durchschnitt Gerätekenwerte:	<input type="text"/>		

Abb. 144 Erstellung des Nutzerprofils, Quelle: FG\_ee

Nach Auswahl der zu belegenden Fläche (Eingabe: Fassade, Dach) wird der vorhandene, bei Neubauten der geplante Aufbau abgefragt oder ein üblicher Standardaufbau ausgewählt. Dieser Aufbau wird mit verknüpften Datenbankinformationen abgeglichen, auf mögliche Optimierungen und vor Allem auf Integrationspotentiale, erzielbare Einsparungen durch Substitution und ggf. eine daraus resultierende Verkürzung von Amortisationszeiten überprüft. Parallel wird das energetische Potential ermittelt.

Der Nutzer hat dann die Möglichkeit, sich für ein System (Eingabe: Photovoltaik, Solarthermie, Kombination der Systeme) zu entscheiden und bekommt entsprechend folgende Belegungsvarianten vorgelegt:

Minimalbelegung; die Belegung ist so dimensioniert, dass sie den ermittelten bzw. zu erwartenden Bedarf unter wirtschaftlich optimierten Gesichtspunkten deckt.

Maximalbelegung; Belegung aller optimal nutzbaren Flächen (Photovoltaik: maximale Stromerzeugung, Solarthermie: maximale Deckung Warmwasser- und Heizwärmebedarf).

Optimalbelegung; Belegung mit dem Ziel, Ökologie mit Ökonomie zu vereinen und ein Optimum für den Nutzer zu erreichen.

Der Nutzer hat zudem die Möglichkeit, Modul- bzw. Kollektortyp zu wählen. Die manuelle Eingabe weiterer Modul- bzw. Kollektortypen einschließlich aller geometrischen und energetischen Daten ist ebenfalls möglich und bietet somit ein Höchstmaß an Flexibilität.

ENERGY : SHELL	
SOLARKALKULATOR PLUS +	
Photovoltaik	
Abmessungen Modul	oder Wahl "Standard":
Länge: <input type="text" value="1559"/> mm	<input type="text"/> mm
Breite: <input type="text" value="798"/> mm	<input type="text"/> mm
Nennleistung: <input type="text" value="205"/> Wp	<input type="text"/> Wp
Modulpreis: <input type="text" value="750"/> €	<input type="text"/> €

Abb. 145 Wahl der Photovoltaikmodule, Quelle: FG\_ee

Abschließend folgt die Wahl der Integrationsart (Eingabe: Addition - Entflechtung, Integration - Verflechtung, Adaption - Verschmelzung).

In einem Ergebnisformular wird die gewählte Variante in Form von Texten und Grafiken mit (Ertrag, Kosten, Einsparung, Gewinn, Amortisationszeit) dargestellt und gegebenenfalls mit alternativen Konfigurationen verglichen.

ENERGY : SHELL			
SOLARKALKULATOR PLUS +			
<b>Mögliche Belegung PV</b>			
E1			
<b>Belegung Dach</b>			
Anzahl max.:	42 Module	>	Kosten: 31.348,42 €
inst. Leistung:	8,57 kWp		
pot. Ertrag:	7326,12 kWh / a	>	Ø Vergütung / a: 2.377,40 €
Amortisationszeit:	11 Jahre	>	garantierter Gewinn: 9 Jahre
Gewinn:	<u>16.456,84 €</u>	>	monatliche Rendite: 124,67 €

Abb. 146 Ergebnisformular der möglichen Belegungsichte von Photovoltaikmodulen, Quelle: GF\_ee

Der Nutzer kann so die Abhängigkeiten und Einflüsse der von ihm gewählten Optionen nachvollziehen und, wenn gewünscht, die Konfiguration mit wenigen Klicks optimieren, um das Potential des Gebäudes im gegebenen Rahmen (Gebäudetyp, Standort, Bebauungsplan, vorhandenes Kapital) möglichst ausschöpfen zu können, Kosten-Nutzen-Relation zu optimieren oder die geometrischen Besonderheiten des Gebäudes möglichst gut nutzbar zu machen.

ENERGY : SHELL			
SOLARKALKULATOR PLUS +			
<b>Strombedarfsdeckung   Übersicht</b>			
Dach:	8,57 kWp		Kosten: 31.348,42 €
Ertrag:	7.326,12 kWh / a	>	Ø Einspeisung: 2.377,40 €
Fassade Süd:	<input type="checkbox"/> ja		
Südfassade:	4,94 kWp		Kosten: 18.085,62 €
Ertrag:	3336,80 kWh / a	>	Ø Einspeisung: 1.083,92 €
Fassade Ost:	<input type="checkbox"/> ja		
Ostfassade:	2,47 kWp		Kosten: 9.042,81 €
Ertrag:	1.112,27 kWh / a	>	Ø Einspeisung: 361,31 €
Fassade West:	<input type="checkbox"/> ja		
Westfassade:	2,47 kWp		Kosten: 9042,81 €
Ertrag:	1.334,72 kWh / a	>	Ø Einspeisung: 433,57 €
Gesamtertrag:	13.109,91 kWh / a		
Ø Bedarf:	6.333,33 kWh / a	>	Kosten / a: 1.203,33 €
Überschuss:	6776,57 kWh / a		
Gewinn:	<u>6.387,62 € / a</u>	>	monatliche Rendite: 250,97 €
			Gesamtinvestition: 67.519,67 €
			Amortisationszeitraum: 15 Jahre

Abb. 147 Strombedarfsdeckung als Übersicht, Quelle: FG\_ee

Die Umsetzung des Solarintegrators als interaktives Tool soll den Leitfaden erweitern, und die Gebäudeintegration praktisch und an individuellen Beispielen des

Benutzers anwendbar machen. Das Tool kann dem Leitfaden als CD beiliegen oder als Webseite realisiert werden.

Dieser Mehrwert des Solarintegrators im Vergleich zu existierenden Interneteingabemasken kann dauerhaft die Arbeitsweise mit solaren Technologien unterstützen und positiv beeinflussen.

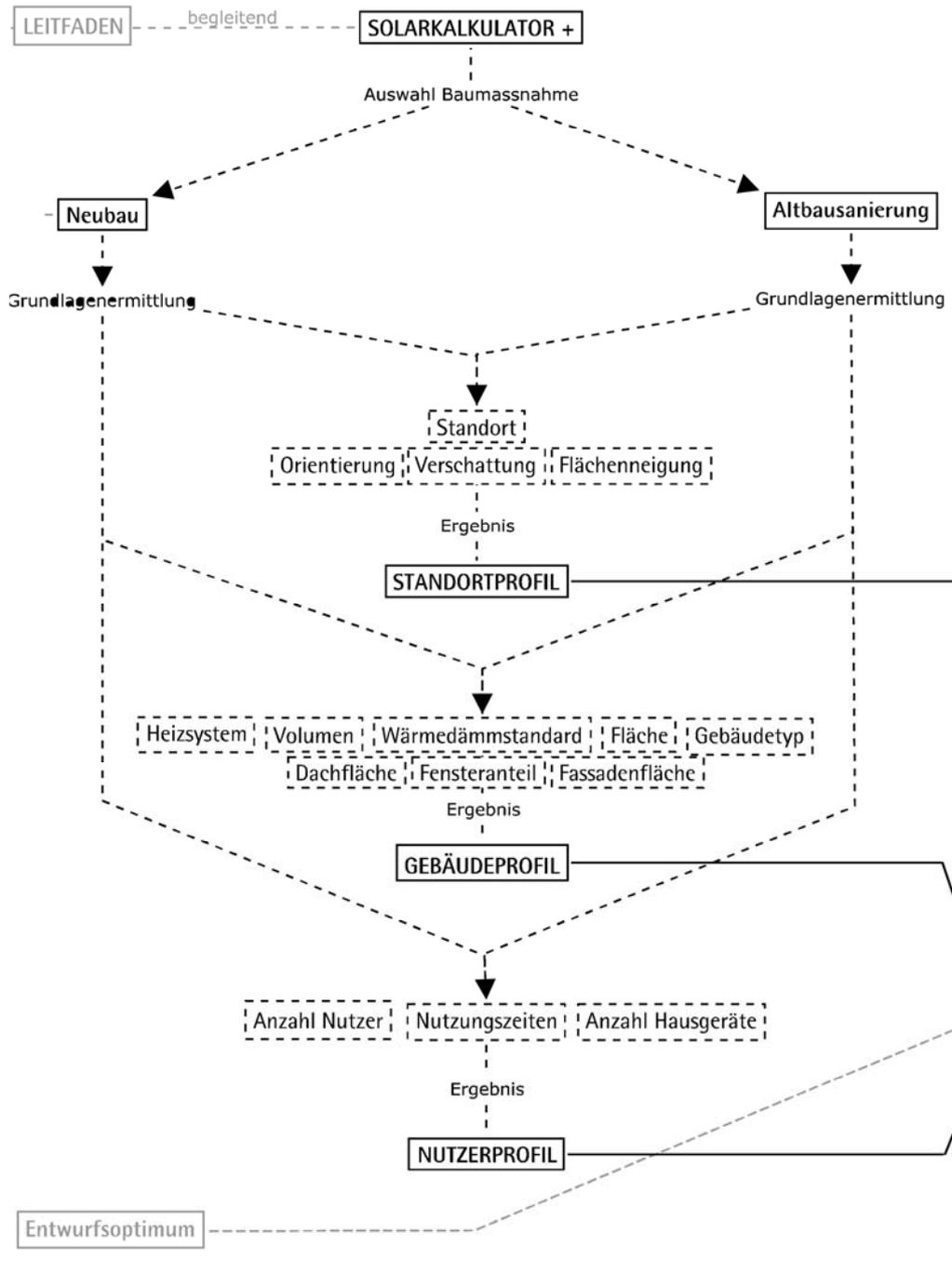


Abb. 148 Ausschnitt aus dem Struktogramm des SolarIntegrators, Quelle: FG\_ee

## 7 Produktentwicklung

### 7.1 Ausgangssituation

Ausgangspunkt für die Entwicklung der Photovoltaik-Holzlamelle war die Beteiligung der TU Darmstadt am Internationalen Studentenwettbewerb „Solar Decathlon 2007“, der im zweijährigen Turnus vom U.S. Energieministerium ausgelobt wird.

Im Zuge der Entwicklung des Wettbewerbsbeitrages wurde die Möglichkeit einer Gebäudehülle thematisiert, die u. a. folgende unterschiedliche Anforderungen erfüllen sollte:

- Sonnenschutz
- Wetterschutz
- Tageslichtversorgung
- Ausblicke
- Sichtschutz

Der Gebäudeentwurf legte es nahe, das Haus hierzu rundum mit einer Schicht aus lamellenbestückten, beweglichen Fensterläden zu versehen. Der Baustoff Holz (Eiche) als Grundmaterial wurde aus der Gebäudekonstruktion abgeleitet. Die Fassade sollte Schlichtheit und Zurückhaltung ausdrücken.

Als Besonderheit im Vergleich zu traditionellen Fensterläden, wie man sie vor allem in Südeuropa kennt, sollten die zur Sonne ausgerichteten Fensterläden des Solar-Decathlon Hauses zusätzlich energiegewinnende Funktion übernehmen können.

### 7.2 Anforderungsprofil

#### 7.2.1 Witterung

Die Einbausituation in der Fassade erfordert für eine zuverlässige Funktion der beweglichen Lamellen und der Fensterläden eine insgesamt hohe Maßtreue, Formstabilität und Dauerhaftigkeit. Das Schwinden und Quellen des Materials mußte daher so gering wie möglich gehalten werden.

Diese Anforderungen erwiesen sich als große Herausforderung. Die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien, sprich, das Schwinden und Quellen durch Feuchte, Wärme und Kälte des Holzes waren konstruktiv zu berücksichtigen. Hinzu kommt das anders geartete Verhalten von Edelstahl, in das die auf den Lamellen befestigten Photovoltaikmodule eingebettet sind. Metall schwindet bei Kälte, Holz hingegen dehnt sich infolge der höheren Luftfeuchte aus. Bei Wärme reagieren die Baustoffe entsprechend entgegengesetzt.

Das in eine Edelstahlwanne eingebettete Photovoltaikmodul verformt sich im Gegensatz zur Holzlamelle nur gering. Unterschiedliche Materialeigenschaften wurden dadurch bewältigt, dass eine punktuelle Befestigung, die auch für eine Hinterlüftung des Moduls zweckmäßig ist, für einen minimalen Kontakt der Bauteile untereinander sorgt. Somit kann die Holzlamelle sich nahezu frei verformen. Die Längsausdehnung innerhalb eines Klappladens wird durch die Bauteilfuge absorbiert.

Die Wettbewerbsaufgabe erforderte eine autarke Energieversorgung für das Gebäude. Die Photovoltaik-Lamellen sollten dazu beitragen, das Gebäude mit Energie zu versorgen.

### **7.2.2 Sonnenschutz / Sichtschutz / Energiegewinnung**

Grundlage der Entscheidung für eine Photovoltaik-Lamelle war gleichzeitig notwendige Überhitzungs- und Sichtschutz des Gebäudes. Diese Funktion wurde um die zusätzliche Energiegewinnung ergänzt. Die grundlegenden Fähigkeiten wurden durch diese zusätzliche Eigenschaft erweitert. Somit konnte die Lamelle an Wertigkeit und Funktionalität gewinnen. Als Synergieeffekt der einzelnen Eigenschaften wurden die Stabilität und die Formwahrung der Lamelle verbessert.

## 7.3 Aufbau der Lamelle

### 7.3.1 Beanspruchung / Eigenschaften

Die Lamelle mußte eine hohe Witterungsbeständigkeit und Formstabilität aufweisen. Zudem sollte Sie optisch mit den weiteren Hölzern des Gebäudes korrespondieren. Die gewählte Holzart wies die erforderlichen Eigenschaften auf. Die dichte, schwere Faser der Eiche nimmt nur in geringem Maße Feuchtigkeit auf und eignet sich daher gut für die Anwendung im Außenbereich. Nachteil des sehr dichten Materials ist, das eine tiefreichende Lasur als Holzschutz nicht in Frage kam. Daher wurde der Entschluß gefasst, die Lamellen mit einer Dickschichtlasur zu behandeln. Der gewählte warmgraue Farbton gibt bereits einen Eindruck, wie sich die Lamellen durch die Verwitterung an der Oberfläche verändern wird und mindert die Farbdifferenz, die durch die unterschiedliche Verwitterung an den einzelnen Fassadenseiten entstehen wird

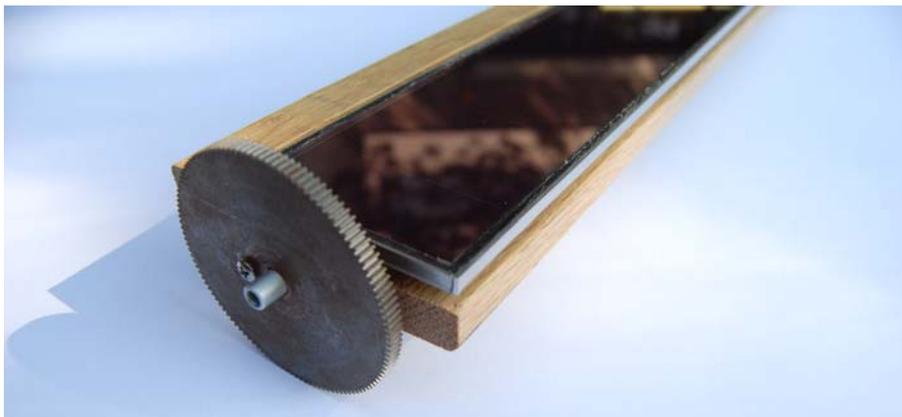


Abb. 149 Zahnkranz an Lamelle, Quelle: FG\_ee

### 7.3.2 Formgebung

Das Material wurde in Lamellen mit einer Größe von 590 x 80 x 20 mm geschnitten. Im Bereich des später platzierten Photovoltaik-Moduls wurde eine Ausfräsung von 64 x 10 mm vorgenommen. Die Höhe von 10 mm entspricht der Höhe der eingebetteten PV-Zelle und der erforderlichen Hinterlüftung. Das eingebettete PV-Paneel deckt somit 75 % der Lamellentiefe ab. Dieses Maß wurde anhand einer Sonnenstandsanalyse als optimal ermittelt. Hierdurch wird eine gegenseitige Verschattung der Module bei hochstehender Sonne in den Sommermonaten vermieden.

### 7.3.3 Photovoltaikzelle

#### Wahl des Zelltyps

Bei der Suche nach einer geeigneten PV-Zelle waren die wesentlichen Faktoren: Effizienz, Größe, Kosten und Ästhetik. Die relativ kleinen Abmessungen der Lamelle erschwerten die Suche nach eine effizienten Photovoltaikzelle. Der Markt stellte in dieser Größe hauptsächlich amorphe Zellen zur Verfügung, die in ihrer Effizienz nicht die Leistung monokristalliner Zellen erreicht.



Abb. 150 Eingebettetes PV-Modul mit Verkabelung, Quelle: FG\_ee

Die Wahl fiel schließlich auf die Zellen der Firma Schott, die in der gewünschten Größe und Anzahl gefertigt werden konnten. Die Effizienz der Zellen kann mit  $0,05 \text{ kWp/m}^2$  für die Anwendung einer amorphen Zelle als gut bezeichnet werden. Die als Glasmodul gefertigten Zellstränge konnten auch die ästhetischen Anforderungen einer gleichmäßigen, zurückhaltenden Struktur erfüllen.

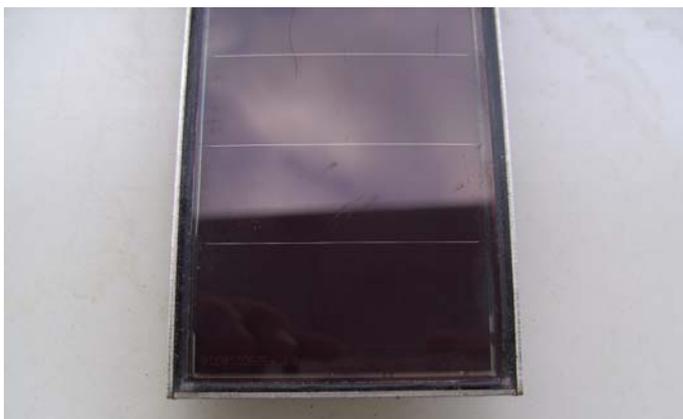


Abb. 151 Detailausschnitt des Eingebettetes PV-Modul, Quelle: FG\_ee

### **Modulaufbau**

Die Einbettung in Edelstahlwannen ermöglicht einen Einsatz der Zellen im Außenbereich. Jeder einzelne Zellstrang wurde mittels einer schwarzen Silikonmasse in die entsprechende Stahlwanne eingebracht. Die Edelstahlwanne verfügt über die notwendigen Kabeldurchführungen. Die Durchführungen sind so konzipiert, dass diese auch direkt für die Befestigung der Module herangezogen werden konnten und in Verbindung mit diesen, die Abstandhalter zur Belüftung der Module erfolgen konnte.



Abb. 152 Kantenansicht des PV-Modul, Quelle: FG\_ee

### **Verbindung mit der Holzlamelle**

Die Verbindung der einzelnen Komponenten mußte so erfolgen, dass der spätere Austausch von Modulen möglich blieb. Die Fügung der Holzlamelle mit der eingebetteten Photovoltaikzelle erfolgte über die beschriebene Kabeldurchführung. Diese erhielt einen Gewindeschnitt und konnte so über eine Kontaktschraube mit Distanzstück sauber, schnell und reversibel mit der Holzlamelle verbunden werden.



Abb. 153 Untersicht des PV-Moduls mit Kabelausgang und Befestigungsstift, Quelle: FG\_ee

Die Holzlamelle erhielt die erforderlichen Bohrungen und Fräsungen für die Befestigung und Kabelführung. Die aus dem Modul austretenden Kabel wurden witterungsbeständig und nicht sichtbar in der Fräsung mit Holzpassstücken abgedeckt und verklebt. Der Übergang der Verkabelung aus der Lamelle in den Rahmen ist über eine Aluminiumhülse realisiert.



Abb. 154 Lamellenuntersicht mit Fräsung, Quelle: FG\_ee

### **Hinterlüftung / Effizienz**

Im Betrieb können die Photovoltaikzelle hohe Temperaturen erzeugen. Es entsteht zwar keine Verbrennungsgefahr an den Außenseiten, die Zelle kann sich aber durch Hitzestau auf der Rückseite zusätzlich aufheizen und dadurch in ihrer energetischen Effizienz gewisse Einbußen erfahren.

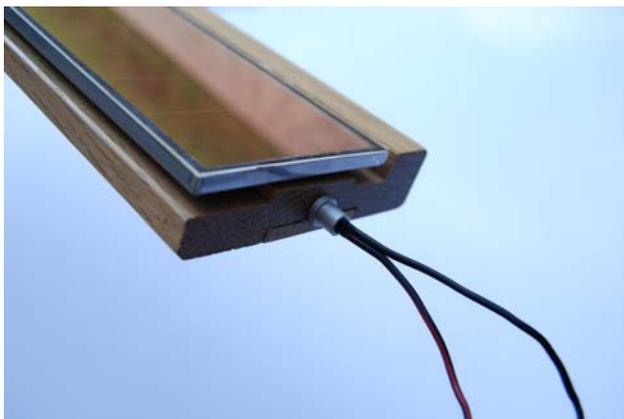


Abb. 155 Detailausschnitt der fertigen Lamelle, Quelle: FG\_ee

Ein Luftzwischenraum zwischen Holzlamelle und eingebetteter Zelle sorgt für die erforderliche Belüftung und Auskühlung der Elemente. Die Lüftungszone zwischen den einzelnen Komponenten verhindert zudem eine mögliche Verformung des Holzes infolge von hohen Temperaturdifferenzen.

## 7.4 Steuerung / Antrieb

### 7.4.1 Verdrahtung

Die Verkabelung der einzelnen Lamellen über die Rahmen zum Wechselrichter sollte eine möglichst effiziente Verschaltung unter Rücksichtnahme auf Sicherheitsaspekte, maximale Kabelstärken sowie Rückbestromungsschutz aufweisen. Zudem sollte der Übergang die Möglichkeit bieten, die Verkabelung nachträglich zu modifizieren oder einzelne Lamellen aus dem Stromkreis austauschen zu können. Es wurden jeweils zwei Lamellen in Reihe geschaltet. Dabei sollte eine Spannung von maximal 40 Volt und ein Strom von maximal 91 mA nicht überschritten werden. So wurde gewährleistet, dass keine Stromschlaggefahr besteht und die Bestimmung der SELV eingehalten wird.

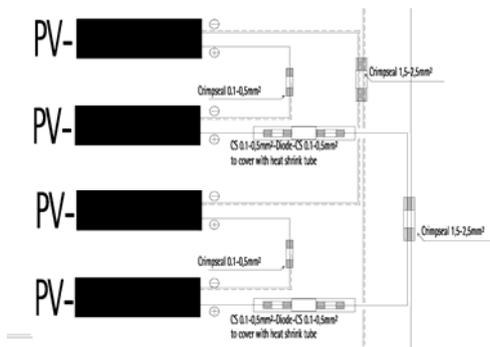


Abb. 156 Planausschnitt der Verkabelungssystematik, Quelle: FG\_ee

Die SELV (früher „Schutzkleinspannung“) ist eine kleine elektrische Spannung, die aufgrund ihrer geringen Höhe und der Isolierung im Vergleich zu Stromkreisen höherer Spannung besonderen Schutz gegen einen elektrischen Schlag bietet. Mit SELV betriebene Geräte, die selbst keine höheren Spannungen erzeugen, werden gemäß DIN EN 61140 (VDE 0140-1) mit der Schutzklasse III bezeichnet.



Abb. 157 Detailfoto der Verkabelung, Quelle: FG\_ee

Bei Solarzellen kann durch Verschattung eine Rückbestromung der Zelle entstehen, die diese beschädigen kann. Aus diesem Grund wurde in jede Reihenschaltung eine Rückbestromungsdiode eingebaut, die die Umkehrung des Stromflusses zurück in die Zelle verhindert. Die in Reihe geschalteten Lamellen wurden schließlich rahmenweise in Parallelschaltungen zusammen geschlossen. Dabei erhöhte sich der Strom auf 1,3 A bei gleich bleibender Spannung.

Pro Rahmenelement entstanden auf diese Weise 4 Parallelschaltungen à 15 Reihenschaltungen. Die Stromkabel werden über eine eigens entwickelte, bewegliche Schnittstelle zum Gebäude übergeben und dort über die Wechselrichter an das Stromnetz des Hauses angeschlossen.

#### **7.4.2 Antrieb**

Die Nachführung dient der mechanischen Verstellung der Lamellen, mit der einerseits die Lichtführung gesteuert wird, andererseits der Ertrag maximiert werden kann. Der Antrieb der einzelnen Photovoltaiklamellen erfolgt über ein Zahnstangengetriebe. Dieses wird von einer Motorschnecke vertikal verschoben und treibt durch diese Bewegung die Lamellen an. Es ist eine Drehung von insgesamt 90° möglich. Eine speziell entwickelte Halterung sorgt für die exakte Führung der Stange entlang der Zahnräder. Zur Verminderung von Reibung zwischen Zahnstange und Zahnrädern wurde für die Zahnstange ein Kunststoffmaterial gewählt. Dies verhindert auch eine Kontaktkorrosion mit den Stahlzahnradern.

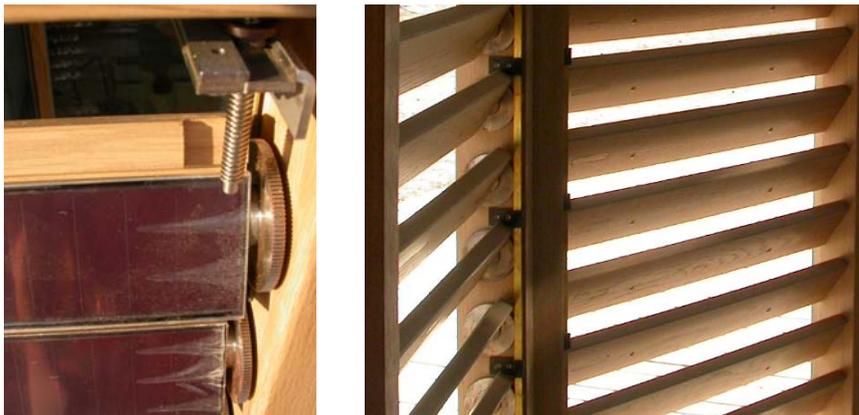


Abb. 158 Detail Stellschraube, Lamellenrahmen, Quelle: FG\_ee

#### **7.4.3 Motor**

Jeder Rahmen ist mit einem Stellmotor ausgestattet, der unsichtbar im Rahmenelement eingebaut ist. Bei dem Motor handelt es sich um einen Linear-

Stellantrieb. Er kann über eine spezielle Software direkt angesteuert werden, die eine automatisierte Nachführung der Lamellen entsprechend dem Sonnenstand ermöglicht. Zudem ist das, vom Sonnenstand unabhängige Öffnen und Schließen der Lamellen jedes einzelnen Rahmens entsprechend der individuellen Nutzerbedürfnissen nach Durchsicht oder Privatheit möglich.

## 7.5 Einbau der Lamelle

### 7.5.1 Rahmenaufbau

Die statischen Anforderungen an die Rahmen durch Falten und Schieben erforderten sehr stabile Rahmenecken. Dies wurde durch eine Verzahnung der Rahmenteile in den Ecken erreicht. Die gesamte Kabelführung ist in den vertikalen Rahmen integriert, der hierzu ausgefräst und nach der Verkabelung mit einer Stahlleiste geschlossen ist.



Abb. 159 Einbausituation der Lamelle im Rahmen, Quelle: FG\_ee

Im Norden und Süden sind jeweils zwei Rahmen sind zu einem Rahmenpaar zusammengefasst, das sich insgesamt öffnen und schließen lässt. Die Verkabelung der Rahmen untereinander erfolgt über einen speziellen Beschlag, der eine Leitungsdurchführung erlaubt. Demgegenüber sind die Lamellenläden im Osten und Westen einzeln gefertigt und fest montiert.



Abb. 160 Foto eines fertigen Rahmenelementes, Quelle: FG\_ee

### **7.5.2 Fassadenaufbau**

Jeder Rahmen ist mit 60 Lamellen bestückt. Die Lamellen sind so angeordnet, dass diese bei geschlossenem Zustand (Vertikalstellung) nicht überlappen, sondern einen Abstand von 6 mm aufweisen. Dieser Abstand soll eine diffuse Belichtung bei geschlossener Fassade ermöglichen sowie bei einer nächtlichen Innenbeleuchtung das Gebäude in Szene setzen.

### **7.6 Prototypenbau**

Der Bau von zwei Prototypen brachte viele wichtige Erkenntnisse, insbesondere für die Entwicklung einer geeigneten Antriebsmechanik sowie den Aufbau der Lamellen selbst. Auch konnte der Einsatz verschiedener Materialien und Komponenten getestet werden. Dies brachte wichtige Erkenntnisse über die Montagemöglichkeiten des Systems sowie das Einbringen und Befestigen der fertigen Lamellen im Holzrahmen mit späterer Austauschmöglichkeit jeder einzelnen Lamelle.

Die auf dem Prototyp montierten PV-Zellen wurde außerdem dauerhaft der Sonne ausgesetzt, um die Oberflächentemperatur der Zelle während des Betriebs zu ermitteln. Es konnte nachgewiesen werden, dass Verbrennungen bei Berührung ausgeschlossen sind.

Nach einer ausgiebigen Untersuchung der Prototypen auf ihre Gebrauchstauglichkeit wurde ein werkstattgefertigtes Bauteil realisiert. Nachdem dieses unter wirtschaftlichen Bedingungen als baubar eingestuft wurde, konnte eine Kleinserie von 48 Klappläden mit jeweils 60 Lamellen gefertigt werden. Diese sind im Süden, Osten und Westen mit photovoltaischen Elementen bestückt, während die Lamellen im Norden nicht aktiviert sind.

Diese Kleinserie wurde als Fassadensystem des deutschen Beitrages zum internationalen Studentenwettbewerb Solar Decathlon 2007 eingesetzt und unter den erhöhten Anforderungen eine öffentlichen Freiluftausstellung in den USA getestet.

### **7.7 Erkenntnisse**

Im Zuge der Ausstellung und der nachfolgenden Zeit in Deutschland wurden die Mechanik und das Materialverhalten der Lamellenrahmen analysiert und folgende Ergebnisse festgehalten.

- Das Zahnradsystem arbeitet noch ungenau. Entlang der Zahnstangen entstehen, bedingt durch die Konstruktionsweise, hohe Reibungen, die die Funktion teilweise stark beeinträchtigen.
- Das offenliegende Antriebssystem ist noch anfällig für Witterungsschäden und Verschmutzung
- Der Motor ist nicht zu komplexer Analyse seiner Arbeit fähig. Daraus ergeben sich Fehler bei der Nachführung.
- Die Selbsthemmung des Schneckengetriebes ist zu starr, so dass bei dem Versuch der manuellen Verstellung des Systems (z. B. durch Besucher) zu Beschädigungen der Lamellenaufhängung kommen kann.
- Die nachträgliche Reparatur an Teilen des Systems, insbesondere der Austausch defekter Lamellen, gestaltet sich aufwendig.

Die Messungen ergaben auch, dass die Nachführung der Lamellen in der Bilanzierung von Ertragsmehrung durch Nachführung zum hierfür notwendigen Stromverbrauch zu keinem Energiegewinn führt. Der erhöhte Energiegewinn durch die Nachführung wird also durch die Aufwendungen für den Antrieb wieder aufgehoben.

Unter diesen Gesichtspunkten wurde eine zweite Serie mit entsprechenden Änderungen in den Bereichen Stellmotor, Nachführung und Antriebsmechanik geplant und an einem zweiten Gebäude eingebaut.

- Als Stellmotor wurde nun ein Servo-Motor aus der Robotik eingesetzt, der BUS-basiert gesteuert werden kann und über ein umfangreiches Funktions-Analysesystem verfügt.
- Als mechanischer Antrieb wurde ein Zahnriemensystem entwickelt, welches aus Gründen des System- und Witterungsschutzes verdeckt am Holzrahmen liegt. Der Zahnriemen soll mit seiner metrischen Teilung die Genauigkeit des Systems erhöhen, Reibung im System vermindern und damit eine erhöhte Dauerhaftigkeit des Systems gewährleisten.
- Konstruktiv wurden einige Details für mögliche Reparaturen und Revision des Systems verbessert. Für feststehend am Gebäude montierte Lamellenrahmen wurde eine neue Unterkonstruktion zur erleichterten Montage entwickelt. Außerdem wurde auf Wunsch des Bauherrn eine Version mit feststehenden, also nicht nachführbaren Lamellen für die Lamellenläden im Osten und Westen als Verkleidung der opaken Wände des Gebäudes realisiert.

Nach ersten Erkenntnissen (Stand 02/2009) funktionieren insbesondere Antriebsmechanik, Motoren und Getriebe grundsätzlich besser. Es bestehen jedoch noch folgende Probleme, die es in weiteren Schritten zu lösen gilt.

- Der Zahnriemenantrieb lässt sich nicht optimal einbauen, dadurch entstehen weiterhin teilweise erhebliche Reibungen im System. Die materialbedingte Flexibilität des Zahnriemens führt zu Ungenauigkeiten bei der Nachführung und optischen Mängeln im geschlossenen Zustand.
- Eine mögliche Reparatur des Zahnriemens wäre mit erheblichem Aufwand verbunden. Durch die Komplexität des Systems besteht erhöhter Fertigungsaufwand.

## **7.8 Ausblick**

### **7.8.1 Leitfaden zur Integration energiegewinnender Systeme in die Gebäudehülle.**

Die Integration energiegewinnender System in die Gebäudehülle wird ein immer wichtiger werdender Bereich in der Anwendung dieser Bauteile. Der Leitfaden soll die Anwender frühzeitig auf die Möglichkeiten einer Integration aufmerksam machen, damit diese nicht im Nachhinein als additive Elemente auf die Dachflächen oder an die Fassaden montiert werden.

Die frühzeitige Einbindung dieser Planungskomponente spart dem Bauherrn Zeit und Geld. Dem Planer gibt dieser Leitfaden einen Einblick in dieses Arbeitsfeld. Dieser kann somit dem Bauherrn in der Entwurfsphase kompetente Grundlagen vermitteln, wie energiegewinnende Systeme gestalterisch wirksam mit in die Planung aufgenommen werden können.

Zudem kann der Planer durch die erlangten Kenntnisse sein Arbeitsfeld erweitern und hierdurch seine Marktchancen verbessern.

### **7.8.2 Solarintegrator**

Der Solarintegrator könnte dem Planenden bereits in der Entwurfsphase die Überprüfung und gegebenenfalls die Korrektur aktiver solarer Systeme ermöglichen. Mit wenigen einfachen Eingaben können Daten über den Einsatz und der Wirkung solarer Systeme gewonnen werden. Die Entwicklung des Solarintegrators würde dem Planer im Zusammenhang mit dem Leitfaden ein wirkungsvolles Werkzeug an die Hand geben, mit dem er Bauherren fachkundige und bereits mit Daten hinterlegte Auskünfte geben könnte. Die Entwicklung eines marktfähigen Solarintegrators sehen wir als Sinnvoll an, da er dem Anwender die Möglichkeit gäbe, über die Eingabe von Gebäudedaten und Nutzerverhalten in kurzer Zeit eine relativ genaue Auskunft über Größe und Ausrichtung der gewünschten Anlagen zu erlangen.

## **7.9 Produktentwicklung**

Die positive Resonanz auf die entwickelte Photovoltaik-Holzlamelle während des Wettbewerbes, Solar Decathlon 2007 in Washington (USA), sowie im Rahmen weiterer Veranstaltungen in Deutschland, zeigen eine mögliche Marktchance dieses Systems auf. Die Weiterentwicklung der Photovoltaik-Holzlamelle zu einem serienreifen Produkt wäre ein positiver Beitrag für die Anwendbarkeit solaraktiver Systeme in der Gebäudehülle oder deren Komponenten.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abb 1 Vernetzung der drei Forschungsprojekte, Quelle: FG.ee	3
Abb. 2 Marktsegment Photovoltaikanlagen in Deutschland, Quelle: Bundesverband Solarwirtschaft	7
Abb. 3 Mittlere jährliche Globalstrahlung weltweit, Quelle: Hegger et al. 2007, S. 51	12
Abb. 4 Mittlere jährliche Globalstrahlung, Quelle: Hegger et al. 2007, S. 53	13
Abb. 5 Kollektorneigung und Azimutwinkel, Quelle: Pistohl 2007a, S. B54	13
Abb. 6 Zusammenfassung der Sonnenstrahlungsdaten in Deutschland; Quelle: Pistohl 2007b, S. 186	14
Abb. 7 Einstrahlungswinkel, Quelle: Pistohl 2007b, S. 184 (links)	14
Abb. 8 Berechnung des Sonnenhöhenwinkels, Quelle: Pistohl 2007b, S.184 (rechts)	14
Abb. 9 Jährlicher Sonnenverlauf auf der Nordhalbkugel, Quelle: Hegger et al. 2007, S. 54 (links)	15
Abb. 10 Sonnenstanddiagramm für 51° nördlicher Breite (jeweils am 21. jeden Monats), Quelle: Hegger et al. 2007, S. 54 (rechts)	15
Abb. 11 Anteilmäßige Energieerträge für verschiedene Ausrichtungen solaraktiver Flächen (Referenz = Energieertrag bei optimaler Ausrichtung), Quelle: <a href="http://www.agsn.de/fileadmin/user_upload/Artikel/PV_Ausrichtung.gif">www.agsn.de/fileadmin/user_upload/Artikel/PV_Ausrichtung.gif</a>	16
Abb. 12 Energieertrag in Abhängigkeit der Neigung und Orientierung; Quelle: <a href="http://www.bine.info">www.bine.info</a>	16
Abb. 13 Mögliche PV-Verschattung, Quelle: <a href="http://www.agsn.de/fileadmin/user_upload/Artikel/PV_Abschattung.gif">www.agsn.de/fileadmin/user_upload/Artikel/PV_Abschattung.gif</a>	18
Abb. 14 Darstellung der Sonnenscheindauer in Prozent auf einem Dach und einer Fassade, / Quelle: FG_ee	19
Abb. 15 Einspeisevergütungssätze für Solarstromanlagen; Quelle: <a href="http://www.thema-energie.de">http://www.thema-energie.de</a>	20
Abb. 16 Konstruktion und Entwurfsstrategie mit aktiver Solartechnik; Quelle: Energieatlas Hegger et al, Seite 109	23
Abb. 17 Möglichkeiten der Gebäudeintegration, Quelle: <a href="http://www.energytech.at/photovoltaik/fotos/artikel1_02.gif">www.energytech.at/photovoltaik/fotos/artikel1_02.gif</a>	24
Abb. 18 Fassadenintegration solarthermischer Module; Quelle: <a href="http://www.reyelts.de">www.reyelts.de</a>	24
Abb. 19 Vakuumröhrenkollektoren als Fassadenprägendes Element; Quelle: <a href="http://www.solarwirtschaft.de">www.solarwirtschaft.de</a>	24

Abb. 20 Aufdachmontage, Quelle: <a href="http://www.energie-umwelt.de/images/PV/Schlo-Dach.jpg">www.energie-umwelt.de/images/PV/Schlo-Dach.jpg</a> (links)	25
Abb. 21 Indachmontage, Quelle: <a href="http://www.solarstrom.ch/deutsch/inhalt/download/pv_im_schnee.JPG">www.solarstrom.ch/deutsch/inhalt/download/pv_im_schnee.JPG</a> (rechts)	26
Abb. 22 Solarziegel, Quelle: <a href="http://www.staywithclay.com/images/content/clc-erection/photovoltaictiles.jpg">http://www.staywithclay.com/images/content/clc-erection/photovoltaictiles.jpg</a>	26
Abb. 23 Auf ein Flachdach aufgeständerte Photovoltaikmodule; Quelle: <a href="http://www.meikowe.de">www.meikowe.de</a>	26
Abb. 24 semitransparente Glas-Glas-Module; Quelle: <a href="http://www.ebersolar.de">www.ebersolar.de</a>	26
Abb. 25 Solarthermische Fassadenintegration Quelle: <a href="http://www.solid.de">www.solid.de</a>	27
Abb. 26 Semitransparente Photovoltaikmodule als Überkopfverglasung / Quelle: FG_ee27	27
Abb. 27 Opake PV-Lamellen als Sonnenschutz vor der Fassade, Quelle: <a href="http://www.jxj.com/magsandj/rew/2003_03/itoman_city_hall.html">www.jxj.com/magsandj/rew/2003_03/itoman_city_hall.html</a> (links)	28
Abb. 28 Sonnenschutzsystem aus HOE und PV an der Fassade, Quelle: <a href="http://arch.hku.hk/~cmhui/holo/holo.html">arch.hku.hk/~cmhui/holo/holo.html</a>	28
Abb. 29 Bewertungstabelle unterschiedlicher Parameter für die unterschiedlichen Integrationsarten	28
Abb. 30 Akademie Mont-Cenis, Quelle: Monika Nikolic	30
Abb. 31 Akademie Mont-Cenis, Quelle: Monika Nicolic	30
Abb. 32 Glas-in-Glas Modul, Quelle: <a href="http://www.solarintegration.de">www.solarintegration.de</a>	30
Abb. 33 Blick auf die Glasüberdachung des Innenhofs, Quelle: <a href="http://www.alwitra.de">www.alwitra.de</a>	32
Abb. 34 Dachdichtungsbahn mit integrierten Photovoltaik-Modulen, Quelle: <a href="http://www.alwitra.de">www.alwitra.de</a>	32
Abb. 35 Dünnschicht-PV-Module auf Flachdach, Quelle: <a href="http://www.baunetz.de">www.baunetz.de</a>	32
Abb. 36 Innenraum Lehrter Bahnhof, Quelle: Marcus Bredt	34
Abb. 37 Photovoltaik auf dem gekrümmten Dach, Quelle: Marcus Bredt	34
Abb. 38 Glas-Glas-Module im gekrümmten Dach	34
Abb. 39 Straßenansicht Modehaus ZARA, Köln, Quelle: <a href="http://www.solon-pv.de">www.solon-pv.de</a>	36
Abb. 40 Fassade Modehaus ZARA, Köln, Quelle: <a href="http://www.solo-pv.de">www.solo-pv.de</a>	36
Abb. 41 Südfassade Sporthalle Tübingen, Quelle: <a href="http://www.baunetz.de">www.baunetz.de</a>	38
Abb. 42 Glas-Folien-Lamine mit grünen multikristallinen Solarzellen bilden die Außenhaut der Südfassade, Quelle: <a href="http://www.baunetz.de">www.baunetz.de</a>	38
Abb. 43 Grüne multikristalline Siliziumzelle, Quelle: <a href="http://www.solarserver.de">www.solarserver.de</a>	38
Abb. 44 Turnhalle Burgweinting, Regensburg, Quelle: Hochbauamt Regensburg	40
Abb. 45 Innenansicht der Südfassade, Quelle <a href="http://www.baunetz.de">www.baunetz.de</a>	40

Abb. 46 Polykristallines Siliziummodul (ohne 20mm Rand), Quelle: <a href="http://www.solarwirtschaft.de">www.solarwirtschaft.de</a>	40
Abb. 47 Südfassade Kinderkrippe und Jugendfreizeitstätte in München, Quelle: <a href="http://www.baunetz.de">www.baunetz.de</a>	42
Abb. 48 Kinderkrippe und Jugendfreizeitstätte in München, Quelle: <a href="http://www.baunetz.de">www.baunetz.de</a>	42
Abb. 49 Polykristalline Siliziumzelle, Quelle: <a href="http://www.energie.at">www.energie.at</a>	42
Abb. 50 Montage der Photovoltaikmodule, Quelle: <a href="http://oekomarkt.at">oekomarkt.at</a>	43
Abb. 51 Plinkristalline Siliziumzelle, Quelle: <a href="http://www.solarwirtschaft.de">www.solarwirtschaft.de</a>	43
Abb. 52 PV-Kaltfassade zur Verkleidung der SO-Fassade eines Treppenhauses, Quelle: Raumplan Architekten	44
Abb. 53 PV-Brüstungsverkleidung, Quelle: Raumplan Architekten	44
Abb. 54 Detail Verkleidung aus grauen polykristallinen Siliziumzellen, Quelle: Raumplan Architekten	44
Abb. 55 Semitransparente PV-Module in der Überdachung des Atriums, Quelle: Raumplan Architekten	45
Abb. 56 Inneneindruck der Isolierglas-PV-Module über den Musiksälen, Quelle: Raumplan Architekten	45
Abb. 57 Südseitig eingesetzte Isolierglas-PV-Module in Lichtbändern, Quelle: Raumplan Architekten	45
Abb. 58 Technische Daten der PV-Teilgeneratoren des Schulzentrums Barsinghausen, Quelle: Raumplan Architekten	45
Abb. 59 Solarzentrum, Wietow, in saniertem Gutshof, Quelle: <a href="http://www.solarintegration.de">www.solarintegration.de</a>	47
Abb. 60 Solarer Fensterladen, Quelle: Astrid Schneider	47
Abb. 61 Detail Solarer Fensterladen, Quelle: Astrid Schneider	47
Abb. 62 Lamellenfassade des Beitrags der TU Darmstadt zum „Solar Decathlon 2007“, Quelle: FG ee	49
Abb. 63 Detail Lamellenfassade und Verandaüberdachung, Quelle: FG ee	49
Abb. 64 PV-Modul vor der Montage auf den Holzlamellen, Quelle: FG ee	49
Abb. 65 Detail Lamellenfassade, Quelle: FG ee	49
Abb. 66 Veranda des Beitrags der TU Darmstadt zum "Solar Decathlon 2007", Quelle: FG ee	51
Abb. 67 Detail Verandaüberdachung, Quelle: FG ee	51
Abb. 68 PV Glas-Glas-Modul vor dem Einbau in die Verandaüberdachung, Quelle: FG ee	51
Abb. 69 Lamellenbehang, Quelle: Markus Spinnler	53
Abb. 70 Detailausschnitt des Lamellenbehang, Quelle: Markus Spinnler	53

Abb. 71 Detail Lamellensteuerung, Quelle: Markus Spinnler	53
Abb. 72 Alexandre Edmond Becquerel, Quelle: <a href="http://www.wikipedia.org/wiki/Alexandre_Edmund_Becquerel">www.wikipedia.org/wiki/Alexandre_Edmund_Becquerel</a>	54
Abb. 73 Funktionsschema Solarzelle, Quelle: Quelle: <a href="http://www.baunetz.de/sixcms_4/sixcms/detail.php?template_id=4133&amp;id=71529">www.baunetz.de/sixcms_4/sixcms/detail.php?template_id=4133&amp;id=71529</a>	55
Abb. 74 Marktgängige Solarzellen, Quelle: Energie at, S. 138	56
Abb. 75 Farbbeispiele für polykristalline Solarzellen, Quelle: Energie at., S. 138	56
Abb. 76 Dünnwandiges monokristallines Siliziumrohr. Aus den Wänden werden Wafer für EFG-Solarzellen (EFG = Edge-defined Film-fed Growth; ungefähr: kantendefiniertes Filmwachstum)geschnitten. Quelle: [A.Schneider], <a href="http://www.solarintegration.de">www.solarintegration.de</a>	57
Abb. 77 Wirkungsgrad von Solarzellen in Abhängigkeit zur Zelltemperatur (in%), Quelle: Humm, Toggweiler. Photovoltaik und Architektur. Die Integration von Solarzellen in Gebäudehüllen. Basel, 1993. S.99	59
Abb. 78 Zellwirkungsgrade und Modulwirkungsgrade für verschiedene Solarzellenmaterialien, Quelle: <a href="http://www.solarintegration.de/index.php?id=359">www.solarintegration.de/index.php?id=359</a>	59
Abb. 79 Schema Inselbetrieb, Quelle: <a href="http://www.ib-jrippel.de/Solarstrom.html">www.ib-jrippel.de/Solarstrom.html</a> . Komponenten eines Inselsystems: 1. PV-Module zur Umwandlung von Licht in elektrischen Strom. 2. Laderegler zur Kontrolle der Lade- und Entladevorgänge in der Solaranlage. 3. Wechselrichter zur Aufbereitung des Solarstroms in Netzqualität. 4. Solarbatterie zur Speicherung des erzeugen Gleichstroms.	61
Abb. 80 Schema Netzgekoppelter Betrieb, Quelle: <a href="http://www.ib-jrippel.de/Solarstrom.html">www.ib-jrippel.de/Solarstrom.html</a> . Komponenten einer netzgekoppelten PV-Anlage: 1. PV-Module zur Umwandlung von Licht in elektrischen Strom. 2. Wechselrichter zur Aufbereitung des Solarstroms in Netzqualität + Sicherheitskomponenten zur elektrischen Absicherung der PV-Anlage. 3. Einspeisestromzähler zur Erfassung des Stromertrags. 4. Bezugsstromzähler zur Erfassung des verbrauchten Stroms	61
Abb. 81 Kostenentwicklung PV-Module (\$/Wp) und installierte Leistung (MW), Quelle: <a href="http://greenpeace">greenpeace</a>	62
Abb. 82 Monokristallines Silizium, Quelle: Hegger et al 2007, S. 139	64
Abb. 83 Polykristallines Silizium, Quelle: Hegger et al 2007, S. 139	65
Abb. 84 Amorphes Silizium, Quelle: Hegger et al 2007, S. 139	66
Abb. 85 Kupfer-Indium-Selen, Quelle: Energieatlas Hegger et al 2007, S.139	67
Abb. 86 Cadmium-Tellurid-Zelle, Quelle: Energieatlas Hegger et al 2007, S.139	68
Abb. 87 Prototyp einer Farbstoffsolarzelle, Quelle: Fraunhofer ISE	69

Abb. 88 ITO-freie« invertierte organische Solarzelle auf einem flexiblen Substrat (Unverkapselt), Quelle: <a href="http://www.ise.fhg.de">www.ise.fhg.de</a>	70
Abb. 89 Funktionsprinzip Solarthermie, Quelle: <a href="http://www.thema-energie.de">www.thema-energie.de</a>	71
Abb. 90 Funktionsprinzip Solarthermie, Quelle: <a href="http://www.thema-energie.de">www.thema-energie.de</a>	73
Abb. 91 offener Schwimmbadabsorber, Quelle: <a href="http://www.loebbeshop.de">www.loebbeshop.de</a> Abb. 92 Funktionsprinzip offener Absorber, Quelle: <a href="http://www.leifi.physik.uni-muenchen.de">www.leifi.physik.uni-muenchen.de</a>	73
Abb. 93 Flachkollektor   Quelle: <a href="http://www.solarserver.de">www.solarserver.de</a>	74
Abb. 94 Schema einer solarthermischen Anlage   Quelle: <a href="http://www.impulsprogramm.de">www.impulsprogramm.de</a>	74
Abb. 95 Vakuumflachkollektor   Quelle: <a href="http://www.impulsprogramm.de">www.impulsprogramm.de</a>	75
Abb. 96 Speicherkollektor   Quelle: <a href="http://www.justlanded.com">www.justlanded.com</a>	75
Abb. 97 Vakuumröhrenkollektor   Quelle: <a href="http://www.solarthermietechologie.de">www.solarthermietechologie.de</a>	76
Abb. 98 Aufbau Flachkollektor und Lichtdurchlass   Quelle: <a href="http://www.energiesparmobil.de">www.energiesparmobil.de</a>	77
Abb. 99 Schema eines Warmwasserspeichers   Quelle: <a href="http://www.kleinke.de">www.kleinke.de</a>	77
Abb. 100 Wohnanlage Batschuns, Quelle: <a href="http://www.nextroom.de">www.nextroom.de</a> Abb. 101 Wohnanlage Batschuns, Quelle: Energieatlas, S.94, Abb. B 3.42	80
Abb. 102 Gesamtansicht MFH, Quelle: Dokumentation Sunny Woods, Zürich-Höngg, Beat Kämpfen Abb. 103 und Detail Brüstungen, Quelle: Energieatlas, S.94 Abb. B 3.44	81
Abb. 104 Straßenansicht Wohn- und Bürohaus, Quelle: opus Architekten Abb. 105 Blick auf Solarthermie-Elemente, Quelle: opus Architekten	82
Abb. 106 Detail Quickstep-Treppendach, Quelle: <a href="http://www.rheinzink.de">www.rheinzink.de</a> Abb. 107 Zweifamilienhaus Berlin, Quistep, Quelle: <a href="http://www.rheinzink.de">www.rheinzink.de</a>	83
Abb. 108 Schema unverglaster Sonnenkollektor Quickstep Solarthermie, Quelle: <a href="http://www.rheinzink.de">www.rheinzink.de</a> Abb. 109 Prinzip Quickstep Einfamilienhaus Berlin, Quelle: <a href="http://www.rheinzink.de">www.rheinzink.de</a>	83
Abb. 110 Südansicht des Wohnhauses, Quelle: dd1 Architekten, Bildnachweis: Petra Steiner, Berlin Abb. 111 Schnitt durch das Gebäude, Quelle: dd1 Architekten	85
Abb. 112 Solarthermiemodul während des Einbaus, Quelle: FG_ee Abb. 113 Solarthermiemodul eingebaut, Quelle: FG_ee	86
Abb. 114 PharmaServiceCenter Binzen, Fassadenschnitt (Luftkollektor, Betonwand) und Verwaltung (Luftkollektor, Brettstapelwand), Quelle: <a href="http://www.pfeifer-kuhn.de">www.pfeifer-kuhn.de</a> Abb. 115 Dach-Verlegung des Luftkollektor-Systems "puren Bomatherm", Quelle: <a href="http://www.baulinks.de">www.baulinks.de</a>	87
Abb. 116 Gesamtsystem Zulufterwärmung durch Luftkollektor, Quelle: <a href="http://www.archiv.ensan.de">www.archiv.ensan.de</a> Abb. 117 Luftkollektor, Quelle: RWE Bau-Handbuch 2004, S.17/14	88

Abb. 118 Überströmung, Quelle: <a href="http://www.archiv.ensan.de">www.archiv.ensan.de</a>	88
Abb. 119 Unterströmung, Quelle: <a href="http://www.archiv.ensan.de">www.archiv.ensan.de</a>	89
Abb. 120 Umströmung, Quelle: <a href="http://www.archiv.ensan.de">www.archiv.ensan.de</a>	89
Abb. 121 Durchströmung, Quelle: <a href="http://www.archiv.ensan.de">www.archiv.ensan.de</a>	89
Abb. 122 Warmwasserzubereitung in einem Hypokaustensystem, Quelle: <a href="http://www.bine.de">www.bine.de</a>	89
Abb. 123 Funktionsschema solares Luftsystem, Quelle: <a href="http://www.baunetz.de">www.baunetz.de</a> , Bildnachweis: AFS Solar-Lufttechnik GmbH, Südlohn	90
Abb. 124 Fassadenschnitt mit Luftführung (Winterbetrieb), Quelle: <a href="http://www.bine.de">www.bine.de</a>	91
Abb. 125 Luftkollektorfassade am Gründerzentrum Hamm, Quelle: FG_ee	93
Abb. 126 Gesamtansicht Gründerzentrum, Quelle: FG_ee	93
Abb. 127 Südostansicht Institutsgebäude, Verglasung vor massiver Holzwand als Speichermasse, Quelle: <a href="http://www.pfeifer-kuhn.de">www.pfeifer-kuhn.de</a>	94
Abb. 128 Energieschema Sommer und Winter, Quelle: <a href="http://www.pfeifer-kuhn.de">www.pfeifer-kuhn.de</a>	94
Abb. 129 Wohnanlage mit Luftkollektoren, Kolding (DK), Quelle: Detail 2002/6, Solares Bauen, S.758-761	95
Abb. 130 Schema Solarwand Wohnanlage Kolding (DK), Quelle: Detail 2002/6, Solares Bauen, S.758-761	95
Abb. 131 Patchworkhaus Gesamtansicht, Quelle: <a href="http://www.pfeifer-kuhn.de">www.pfeifer-kuhn.de</a>	96
Abb. 132 Detail transparentes Polycarbonat, Quelle: <a href="http://www.pfeifer-kuhn.de">www.pfeifer-kuhn.de</a>	96
Abb. 133 Schnitt durch das Patchworkhaus, Quelle: <a href="http://www.architektur.tu-darmstadt.de/powerhouse">www.architektur.tu-darmstadt.de/powerhouse</a>	96
Abb. 134 PV-Luftkollektor mit Rippenabsorber, Quelle: <a href="http://www.baunetz.de">www.baunetz.de</a>	98
Abb. 135 Klostersaler Umwelthütte – Silvretta, Quelle: <a href="http://www.grammer-solar.de">www.grammer-solar.de</a>	98
Abb. 136 Autarke Fassaden-Kollektoranlage in Holz-Rahmen-Bauweise, Quelle: <a href="http://www.grammer-solar.de">www.grammer-solar.de</a>	98
Abb. 137 Synergie Hybridkollektor, schematische Darstellung	99
Abb. 138 Multi-Hybrid-Kollektoren (5-er und 3er) der Firma solarhybrid, Quelle: <a href="http://www.solarhybrid.ag">www.solarhybrid.ag</a>	99
Abb. 139 Aufdach-Montage auf einem Einfamilienhaus in Zaberfeld, Quelle: <a href="http://www.solarhybrid.ag">www.solarhybrid.ag</a>	99
Abb. 140 Funktionsprinzip Hybridkollektor mit Wärmepumpe und Latentspeicher (System solaera von consolar)	100
Abb. 141 Aufbau eines Luft-Wasser-Hybridkollektors, Quelle: <a href="http://www.ersotec.de">www.ersotec.de</a>	100
Abb. 142 Erstellung des Standortprofils, Quelle: FG_ee	102
Abb. 143 Erstellung des Gebäudeprofils, Quelle: FG_ee	103
Abb. 144 Erstellung des Nutzerprofils, Quelle: FG_ee	103
Abb. 145 Wahl der Photovoltaikmodule, Quelle: FG_ee	104

Abb. 146 Ergebnisformular der möglichen Belegungsdichte von Photovoltaikmodulen, Quelle: GF_ee	105
Abb. 147 Strombedarfsdeckung als Übersicht, Quelle: FG_ee	105
Abb. 148 Struktogramm des SolarIntegrators, Quelle: FG_ee	106
Abb. 149 Zahnkranz an Lamelle, Quelle: FG_ee	109
Abb. 150 Eingebettetes PV-Modul mit Verkabelung, Quelle: FG_ee	110
Abb. 151 Detailausschnitt des Eingebettetes PV-Modul, Quelle: FG_ee	110
Abb. 152 Kantenansicht des PV-Modul, Quelle: FG_ee	111
Abb. 153 Untersicht des PV-Moduls mit Kabelausgang und Befestigungsstift, Quelle: FG_ee	111
Abb. 154 Lamellenuntersicht mit Fräsung, Quelle: FG_ee	112
Abb. 155 Detailausschnitt der fertigen Lamelle, Quelle: FG_ee	112
Abb. 156 Planausschnitt der Verkabelungssystematik, Quelle: FG_ee	113
Abb. 157 Detailfoto der Verkabelung, Quelle: FG_ee	113
Abb. 158 Detail Stellschraube, Lamellenrahmen, Quelle: FG_ee	114
Abb. 159 Einbausituation der Lamelle im Rahmen, Quelle: FG_ee	115
Abb. 160 Foto eines fertigen Rahmenelementes, Quelle: FG_ee	115