
Montagegerechte Gestaltung eines Befestigungssystems für Photovoltaikgeneratoren

von Diplom-Ingenieur
Sven Schumann
aus Berlin

von der Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme,
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H. Meyer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. G. Seliger

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. F. Ziegler

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 14. Mai 2004

Berlin 2004

D 83

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin (TUB) im Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger, dem Leiter des Fachgebiets Montagetechnik und Fabrikbetrieb am IWF. Seine Förderung, fachliche Betreuung und konstruktive Kritik haben zum Entstehen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler, dem Leiter des Fachgebiets Maschinen- und Energietechnik am Institut für Energietechnik, danke ich für seine wohlwollende Unterstützung und die vielen wertvollen Anregungen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning J. Meyer, dem Leiter des Fachgebiets Konstruktion von Maschinensystemen am Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik, danke ich für sein dieser Arbeit entgegengebrachtes Interesse sowie für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Mein Dank gilt ferner allen Kollegen und Mitarbeitern im Produktionstechnischen Zentrum (PTZ) Berlin für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung beim Erstellen der Arbeit. Hervorheben möchte ich dabei Herrn cand. ing. Sebastian Hennig, Herrn cand. ing. Daniel Becker und Herrn cand. ing. Roman Schückerk, die mir als studentische Mitarbeiter durch ihr ideenreiches Engagement und ihre gewissenhafte und unermüdliche Mitarbeit eine große Hilfe waren. Weiterhin danke ich allen Freunden, die mir während der Entstehung der Arbeit viel Geduld und Verständnis entgegenbrachten.

Schließlich danke ich vor allem meiner Frau Bianca und meinen Eltern, die mir stets den notwendigen Rückhalt gegeben haben und ohne deren Unterstützung die Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Berlin, im Mai 2004

Sven Schumann

Montagegerechte Gestaltung eines Befestigungssystems
für Photovoltaikgeneratoren

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung.....	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit.....	4
2	Stand der Technik	5
2.1	Begriffe und Grundlagen	5
2.1.1	Photovoltaiksystem.....	6
2.1.1.1	Solarzelle.....	7
2.1.1.2	Modul	10
2.1.1.3	Generator	12
2.1.1.4	Balance-of-Systems	13
2.1.2	Anwendungsarten und –gebiete.....	13
2.1.3	Wirtschaftlichkeit.....	20
2.1.4	Montage	25
2.2	Aufbau von Befestigungssystemen	27
2.2.1	Aufdach	28
2.2.1.1	Dachanbindung	31
2.2.1.2	Trägerprofile.....	35
2.2.1.3	Modulbefestigung	37
2.2.1.4	Elektrische Verschaltung	38
2.2.2	Indach.....	38
2.2.3	Systemmerkmale.....	41
3	Handlungsbedarf	46
3.1	Beanspruchungen	46
3.1.1	Mechanisch	46

3.1.2	Thermisch.....	47
3.1.3	Tribologisch	48
3.1.4	Elektrisch	49
3.2	Resultierende allgemeine Anforderungen.....	50
3.3	Bestehende Defizite.....	50
4	Bewertungsmethodik.....	55
4.1	Erstellung.....	55
4.1.1	Anforderungsquellen.....	55
4.1.2	Anforderungsbereiche	57
4.1.3	Kombination.....	58
4.1.4	Bewertungsliste	60
4.2	Anwendung und Ergebnisse.....	62
4.3	Ergänzende Montageversuche.....	64
4.3.1	Aufdach	65
4.3.2	Indach.....	66
4.3.3	Elektrische Verschaltung	67
4.4	Abgeleitete Gestaltungshinweise.....	68
5	Konzeptionelle Gestaltung	72
5.1	Funktionsstruktur	72
5.1.1	Gesamtfunktion.....	72
5.1.2	Teilfunktionen	73
5.1.3	Detailfunktionen	75
5.2	Wirkprinzipien und Lösungsansätze	77
5.2.1	Aufnahme von Massen und angreifenden Kräften.....	78
5.2.2	Positionierung der Module	79
5.2.3	Elektrische Verbindung.....	81
5.2.4	Verbindung mit dem Dach	84
5.2.5	Dichten zwischen den Modulen	84
5.2.6	Ableiten von Wasser.....	86

5.3	Lösungskombination.....	89
6	Konstruktive Gestaltung.....	93
6.1	Dachbefestigung	93
6.2	Verbindung der PV-Module mit den Trägerprofilschienen	95
6.2.1	Aufnehmer.....	97
6.2.2	Modulverbinder.....	100
6.2.2.1	Nichtleitend.....	105
6.2.2.2	Leitend	105
6.2.2.3	Endstück	107
6.2.3	Niederhalter und Hammerkopfschraube.....	108
6.3	Dichtung der Modulfläche.....	111
6.4	Wasserableitung.....	114
6.4.1	Anschlussblech.....	115
6.4.2	Anschlussecke.....	117
7	Systembewertung	121
7.1	Anforderungserfüllung	121
7.2	Wirtschaftlichkeit.....	124
8	Zusammenfassung und Ausblick	128
9	Literatur.....	130
10	Anhang.....	144

Bilderverzeichnis

Bild 1:	Entwicklung des Weltenergieverbrauchs, nach [BRÖ00]	2
Bild 2:	Energiewürfel [QUA03]	3
Bild 3:	Arten regenerativer Energien und Einfluss der Sonne [BRÖ00]	5
Bild 4:	Störstellenleitung bei n-dotiertem Silizium (links) und p-dotiertem Silizium (rechts) [QUA03]	8
Bild 5:	Solarzelle mit einem p/n-Übergang [QUA03]	9
Bild 6:	PV-Modul bestehend aus 72 verschalteten Solarzellen	10
Bild 7:	Schematischer Aufbau eines PV-Moduls mit kristallinen Zellen [DEU01]	11
Bild 8:	Prinzipieller Aufbau eines PV-Systems	13
Bild 9:	Schematischer Aufbau eines netzgekoppelten PV-Systems	14
Bild 10:	Prinzipieller Aufbau eines Solar-Home-Systems	16
Bild 11:	Anteile der neu installierten Leistung gemäss den spezifischen Anwendungsgebieten am gesamten, weltweiten PV-Markt 2001, nach [BUT02]	18
Bild 12:	Systematisierung von PV-Systemen	19
Bild 13:	Marktanteile von PV-Systemen nach Anwendungsart bezogen auf die im Jahr 2001 installierten Leistung, nach [BUT02]	19
Bild 14:	Mittlere spezifische Klimafolgekosten (externe Kosten) verschiedener Energieerzeugungsformen, nach [HOH02]	21
Bild 15:	Budgets ausgewählter Staaten zur Förderung der Photovoltaik in 2000, nach [IEA01]	22
Bild 16:	Prognose der Entwicklung des weltweiten PV-Marktes (MW Zellen und Module, ohne Doppelzählungen) bis 2010, nach [BUT02]	23
Bild 17:	Kostenanteile bei einem netzgekoppelten PV-Standardsystem	24
Bild 18:	Montagearten von PV-Systemen an Gebäuden, nach [WÖR04]	26
Bild 19:	Installationsorte von PV-Systemen	27
Bild 20:	Aufdachmontierter PV-Generator auf einem Schrägdach	28
Bild 21:	Aufdachmontierter PV-Generator auf einem Flachdach	29
Bild 22:	Flachdachbefestigung mittels Aluminiumgestell	29
Bild 23:	Flachdachbefestigung mittels Wanne	30
Bild 24:	Längsträger	30

Bild 25:	Querträger	31
Bild 26:	Dachstuhl	31
Bild 27:	Prinzipzeichnung eines Lattenhakens	32
Bild 28:	Prinzipzeichnung eines Sparrenhakens	32
Bild 29:	Beispiel eines Sparrenhakens [OSM04].....	32
Bild 30:	Prinzipzeichnung einer standardisierten Ziegelschnittstelle	33
Bild 31:	Beispiel einer standardisierten Ziegelschnittstelle [LAF04]	33
Bild 32:	Prinzipzeichnung einer Stockschraube	34
Bild 33:	Beispiel einer Stockschraube [SCH04].....	34
Bild 34:	Prinzipzeichnung einer Blechfalzklemme	35
Bild 35:	Beispiel einer Blechfalzklemme [SOL04a].....	35
Bild 36:	Trägerprofilquerschnitte	36
Bild 37:	Hammerkopfschraubenverbindung	36
Bild 38:	Befestigung eines Trägerprofils am Dachhaken mittels Hammerkopfschraube	36
Bild 39:	Niederhalter [IBC04].....	37
Bild 40:	Indachmontierter PV-Generator	38
Bild 41:	Gummigedichtete Fuge zwischen niveaugleichen PV-Modulen, nach [SOL04a]	40
Bild 42:	Gummigedichtete Fuge zwischen überlappenden PV-Modulen, nach [CON04].....	40
Bild 43:	Blechgedichtete Fuge zwischen PV-Generator und umgebender Dacheindeckung.....	41
Bild 44:	Dichtung des Übergangs zwischen PV-Generator und umgebender Dachhaut mittels Folie.....	41
Bild 45:	Aufdach-Befestigungen für Schräg- und Kuppeldächer	42
Bild 46:	Aufdach-Befestigungen für Flachdächer	43
Bild 47:	Indach-Befestigungen für Schräg- und Kuppeldächer.....	44
Bild 48:	Dachströmung und Windlasten	46
Bild 49:	Schneelast.....	46
Bild 50:	Dachdurchdringungen	48
Bild 51:	Anzahl der befragten Firmen nach Branchenzugehörigkeit.....	51
Bild 52:	Einschätzung des Wachstumspotentials des PV-Marktes.....	52
Bild 53:	Installationsarten	52

Bild 54:	Verwendete PV-Modularten.....	53
Bild 55:	Probleme mit PV-Modulen.....	53
Bild 56:	Anforderungsquellen	56
Bild 57:	Erfüllungsgrad der Anforderungen bei den untersuchten Systemen.....	64
Bild 58:	Montagefehler durch fehlende Zwangslagezuordnung	66
Bild 59:	Elektrische Anschlussdose	68
Bild 60:	Herkömmliche elektrische Verschaltung.....	68
Bild 61:	Verbesserungsbedarf bei den untersuchten Systemen	70
Bild 62:	Gesamtfunktionsstruktur eines PV-Generators	73
Bild 63:	Teilfunktionsstruktur eines PV-Generators	74
Bild 64:	Detailfunktionsstruktur des Befestigungssystems.....	76
Bild 65:	Dachstuhlkoordinatensystem.....	80
Bild 66:	Lage der Trägerprofile	81
Bild 67:	Anforderungsgerechte Anschlusslage durch interne Verschaltung eines PV-Moduls (links) oder durch Umrüstung eines handelsüblichen PV-Moduls (rechts).....	82
Bild 68:	Elektrische Verbindungsmöglichkeit eines zweireihigen PV-Modulfelds (Alternative A).....	82
Bild 69:	Elektrische Verbindungsmöglichkeit eines zweireihigen PV-Modulfelds (Alternative B).....	83
Bild 70:	Elektrische Verbindungsmöglichkeit eines dreireihigen PV-Modulfelds	83
Bild 71:	Steckverbindung.....	84
Bild 72:	Flachdichtung	85
Bild 73:	T-förmige Profildichtung beim Einbau (links) und eingebaut (rechts)	85
Bild 74:	Eckbereich der Anschlussbleche, kritischer Bereich (links), Eckbauteil (rechts).....	87
Bild 75:	Seitliche Schnittstellen der Anschlussbleche.....	87
Bild 76:	Anschlussblech mit Schürze.....	88
Bild 77:	Obere Schnittstelle des Anschlussbleches	88
Bild 78:	Untere Schnittstelle des Anschlussbleches	89
Bild 79:	Lösungskombination Modulverbinder	90

Bild 80:	Montageabfolge Modulverbinder (I).....	91
Bild 81:	Montageabfolge Modulverbinder (II).....	91
Bild 82:	Montagegerechtes Befestigungssystem, Indach-Variante	93
Bild 83:	Trägerprofilschiene.....	94
Bild 84:	Abgedecktes Dach mit Trägerprofilschienen, Indach-Variante.....	95
Bild 85:	Diagonaler Querschnitt durch die Baugruppe zur Fixierung der PV-Module auf den Trägerprofilschienen	96
Bild 86:	Eingebaute Baugruppe zur Fixierung der PV-Module auf den Trägerprofilschienen, Indach-Variante	96
Bild 87:	Aufnehmer.....	97
Bild 88:	Aufnehmer an einem rahmenlosen PV-Modul.....	98
Bild 89:	Aufnehmer an einem gerahmten PV-Modul	98
Bild 90:	Schnitt durch den Aufnehmer bei einem System-Modul.....	99
Bild 91:	Schnitt durch den Aufnehmer bei einem herkömmlichen PV-Modul.....	100
Bild 92:	Einbaufälle des Aufnehmers bei herkömmlichen PV-Modulen	100
Bild 93:	Modulverbinder, einzelne Zweierstecker (links) und montiert zum Viererstecker (rechts).....	101
Bild 94:	Montagemöglichkeiten eines oder zweier Modulverbinder	102
Bild 95:	Modulverbinder als Zweierstecker auf Trägerprofilschienen	102
Bild 96:	Modulverbinder als Viererstecker auf Trägerprofilschienen.....	103
Bild 97:	Modulverbinder als Viererstecker mit einem gerahmten PV-Modul.....	104
Bild 98:	Zweierstecker (links) und Viererstecker (rechts) auf Trägerprofilschiene montiert.....	104
Bild 99:	Schnitt durch einen nichtleitenden Modulverbinder mit Aufnehmern.....	105
Bild 100:	Schnitt durch einen leitenden Modulverbinder.....	106
Bild 101:	Schnitt durch einen leitenden Modulverbinder mit Aufnehmern	107
Bild 102:	Endstück-Variante des Modulverbinders.....	108
Bild 103:	Hammerkopfschraubenverbindung	109
Bild 104:	Eingebauter Niederhalter, Indach-Variante	109
Bild 105:	Niederhalter eines Zweier-Modulverbinders am Modulflächenrand, Indach-Variante.....	110

Bild 106:	Niederhalter, Ansicht der Unterseite	110
Bild 107:	Schnitt durch einen eingebauten Niederhalter	111
Bild 108:	T-Dichtung für ungerahmte PV-Module	112
Bild 109:	Montage der T-Dichtung zwischen ungerahmten PV-Modulen.....	112
Bild 110:	T-Dichtung für gerahmte PV-Module	113
Bild 111:	Dichtung unter dem Niederhalter	113
Bild 112:	Verbundstoff	115
Bild 113:	Querschnitt des Anschlussblechs	115
Bild 114:	Anschlussblech, eingebaut am seitlichen Modulfeldrand	116
Bild 115:	Eingebauter Niederhalter am seitlichen Anschlussblech	116
Bild 116:	Anschlussblech, eingebaut am unteren Modulfeldrand	117
Bild 117:	Anschlussblech, eingebaut am oberen Modulfeldrand	117
Bild 118:	Anschlussecke.....	118
Bild 119:	Montage der Anschlussecke (I)	118
Bild 120:	Montage der Anschlussecke (II)	119
Bild 121:	Dichtung unter der Anschlussecke	120
Bild 122:	Dichten der Fugen um die Anschlussecke mittels Tape	120
Bild 123:	Kostenanteile eines netzgekoppelten PV-Systems (2 kWp) mit Standard-Befestigungssystem und mit montagegerechtem Befestigungssystem	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Statische Reichweiten nicht erneuerbarer Energierohstoffe, nach [BRI03, BMW02, STA98].....	1
Tabelle 2: Kenndaten von PV-Modulen unterschiedlicher Hersteller [AIC03, FLA03, PHO03]	12
Tabelle 3: Anwendungsmöglichkeiten netzgekoppelter PV-Systeme, nach [HAD00].....	16
Tabelle 4: Anwendungsmöglichkeiten von PV-Inselsystemen, nach [HAD00]	18
Tabelle 5: Kosten eines netzgekoppelten PV-Standardsystems (2 kW _p), nach [BER03, SUN03, QUA03, WOY01, WOD00].....	24
Tabelle 6: Montageaufwand bei Aufdach-PV-Generatoren, nach [SOL04a]	26
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Montageschritte und deren Montagezeitanteile bei Aufdach- und Indach-Befestigungssystemen	45
Tabelle 8: Gewichtete allgemeine Anforderungen an ein montagegerechtes Befestigungssystem	50
Tabelle 9: Bezeichnungssystem für Anforderungen.....	58
Tabelle 10: Struktur der Anforderungsmatrix	59
Tabelle 11: Muss-Anforderungen zur Systembewertung	60
Tabelle 12: Struktur der Bewertungsliste	61
Tabelle 13: Von allen Systemen erfüllte Anforderungen	63
Tabelle 14: Von einem System erfüllte Anforderungen.....	63
Tabelle 15: Von keinem System erfüllte Anforderungen	64
Tabelle 16: Aufdach-Montage der Trägerprofile des Befestigungssystems mit PV-Modulen.....	65
Tabelle 17: Indach-Montage des Befestigungssystems mit gedichteten Fugen	67
Tabelle 18: Gewichtete spezielle Anforderungen an ein montagegerechtes Befestigungssystem	71
Tabelle 19: Wirkprinzipien für die einsatzortunabhängigen Detailfunktionen	77
Tabelle 20: Wirkprinzipien für die einsatzortabhängigen Detailfunktionen	78
Tabelle 21: Eigenschaften der Lösungskombination des Modulverbinders.....	92
Tabelle 22: Bewertung der Erfüllung allgemeiner Anforderungen.....	122
Tabelle 23: Bewertung der Erfüllung spezieller Anforderungen	123

Tabelle 24: Kosten der Komponenten des montagegerechten Befestigungssystems	124
Tabelle 25: Gegenüberstellung der Montageschritte bei Standard-Aufdach- und montagegerechtem Befestigungssystem und Ableiten der Montagezeitersparnis	125
Tabelle 26: Gegenüberstellung des Montagearbeitsaufwands bei Standard-Aufdach- und montagegerechtem Befestigungssystem und Ableiten der Montagekosten	125
Tabelle 27: Gegenüberstellung der Kosten eines netzgekoppelten PV-Systems (2 kW _p) mit Standard-Befestigungssystem und mit montagegerechtem Befestigungssystem.....	126

Verwendete Kurzzeichen

A	Ampere: Einheit der Stromstärke
a	Jahr
BOS	Balance-of-Systems
CSM	Chlorsulfonierter Polyethylen-Kautschuk
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EIA	Energy Information Administration
EUR	Euro, Währungszeichen €
EVA	Ethyl-Venyl-Acetat
Fa.	Firma
h	Stunde
HTDP	100.000 Dächer-Programm
I	Strom; Einheit ist [A]
I_{MPP}	Strom am Maximum Power Point; Einheit ist [A]
IEA	International Energy Agency
k	Kilo, entspricht 10^3
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
m	Milli, entspricht 10^{-3}
M	Mega, entspricht 10^6
MPP	Maximum Power Point: Punkt im Leistungsverlauf einer Solarzelle oder eines PV-Moduls, an dem das Produkt aus Strom und Spannung maximal ist
MwSt.	Mehrwertsteuer
μ	Mikro, entspricht 10^{-6}
n	elektrisch negativ
P_N	Nennleistung: Maximal mögliche Leistung einer Solarzelle oder eines PV-Moduls bei Standardtestbedingungen (senkrechter Strahlung von 1000 W/m^2 , konstantem Lichtspektrum, Zelltemperatur von 25°C); Einheit ist [W_p]
p	elektrisch positiv
p.a.	per annum
PV	Photovoltaik
PV-Generator	Photovoltaikgenerator
PV-Modul	Photovoltaikmodul
PV-System	Photovoltaiksystem

T	Tera, entspricht 10^{12}
TWh	Terawattstunden
U	Spannung; Einheit ist [V]
U_{MPP}	Spannung am Maximum Power Point; Einheit ist [V]
UV	Ultraviolett
V	Volt: Einheit der elektrischen Spannung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W	Watt; Einheit der elektrischen Leistung
Wirkungsgrad	Verhältnis zwischen abgegebener MPP-Leistung einer Solarzelle oder eines PV-Moduls und auftreffender Strahlungsleistung bei 25°C Solarzellentemperatur; Angabe in %
W_p	Watt peak; Einheitsbezeichnung der elektrischen Nennleistung

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die Versorgung mit elektrischer Energie ist der Motor für die wirtschaftliche Entwicklung eines Landes. In den industriell hoch entwickelten Ländern wird der Großteil der elektrischen Energie durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas bereitgestellt. Die konventionellen fossilen Energieträger, deren Entstehung mehrere Jahrtausende gedauert hat, sind trotz immer effizienterer Gewinnungsmethoden und neu entdeckter Ressourcen in ihren Vorkommen begrenzt [WEI95]. Die bekannten, wirtschaftlich förderbaren Reserven der wichtigsten Energieträger reichen bei den gegenwärtigen Fördermengen nach heutigem Kenntnisstand für die kommenden zwei bis acht Generationen (Tabelle 1) [BRI03, QUA03, BMW02, REM00, STA98].

Rohstoff	Anteil am Weltenergieverbrauch	Reichweite
Erdöl	38,5 %	43 Jahre
Erdgas	23,7 %	67 Jahre
Kohle	24,7 %	164 Jahre
Uran	6,6 %	34 Jahre

Tabelle 1: Statische Reichweiten nicht erneuerbarer Energierohstoffe, nach [BRI03, BMW02, STA98]

Durch das gestiegene Komfortbedürfnis, die erhöhte Mobilität sowie die stetig wachsende Weltbevölkerung ist der Energiebedarf innerhalb der letzten drei Jahrzehnte stark angestiegen [SEL00a]. Die durchschnittliche jährliche Zunahme der nachgefragten Energiemenge betrug in diesem Zeitraum 2,3 %. Eine Umkehr dieses Trends ist wenig wahrscheinlich, da durch das anhaltende Bevölkerungswachstum, die zunehmende Globalisierung und der damit einhergehenden Forcierung des internationalen Handels eher mit einer weiteren Zunahme der benötigten Energiemenge zu rechnen ist [BRI03, BRÖ00, KRA98]. So geht die amerikanische Energy Information Administration in ihrem Energieausblick 2003 von einem jährlichen Anstieg des Bedarfs jedes Erdenbürgers an Energie um 0,7 % bis zum Jahr 2025 aus [EIA03]. Der steigende Weltenergieverbrauch kann bei der erwiesenen Begrenztheit der erschöpflichen Energien nur durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien befriedigt werden (Bild 1); eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung ist erforderlich [SEL02, UBA02, SEL01a, WEI95]. Unter nachhaltiger Entwicklung wird dabei eine Entwicklung verstanden, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Genera-

tionen zu gefährden [MÜL01, SEL00b]. Das Konzept der Nachhaltigkeit wird seit Mitte der 1980er Jahre von allen wichtigen multilateralen Organisationen vertreten und stand im Mittelpunkt der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Jahre 1992 in Rio de Janeiro sowie des Weltgipfels für Nachhaltige Entwicklung 2002 in Johannesburg [GAB02a, UBA02]. Die internationale Staatengemeinschaft hat sich unter dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung mit der Agenda 21 ein globales Aktionsprogramm für das 21. Jahrhundert auferlegt. Das Kyoto-Protokoll von 1997 ist ein weiterer wesentlicher Schritt auf dem Weg zur Anerkennung der gemeinsamen Verantwortung für die Umwelt [FRI01]. Die unterzeichnenden Staaten verpflichteten sich, ihre CO₂-Emissionen bis 2012 auf 95 % der Werte von 1990 zu reduzieren [FLE00]. All diesen Anforderungen kann nur durch die intensivere Nutzung regenerativer Energiequellen wie Photovoltaik, Wasser- und Windkraft als Alternativen zur fossilen und nuklearen Energieerzeugung entsprochen werden.

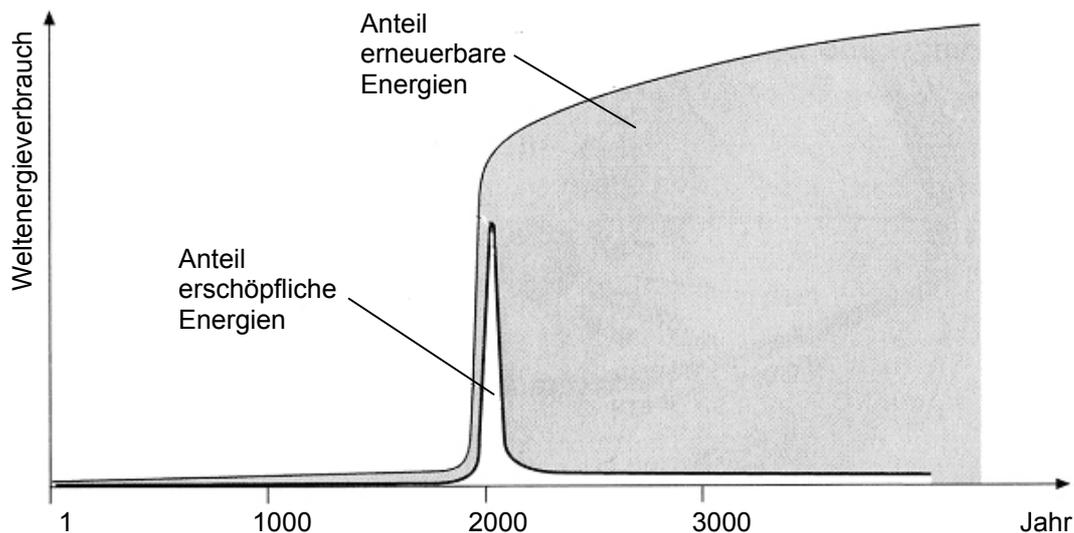


Bild 1: Entwicklung des Weltenergieverbrauchs, nach [BRÖ00]

Der Photovoltaik kommt bei der nachhaltigen Umstrukturierung der Energieversorgungssysteme eine wesentliche Rolle zu, da sie neben der Wind- und Wasserkraft schon eine fortgeschrittene Technologiereife besitzt [BMU02a, LAU02]. Mit der Photovoltaik (PV) gelingt es, die Sonnenenergie direkt in den Universalenergieträger Elektrizität umzuwandeln. Sonnenenergie ist weltweit unbegrenzt und unentgeltlich verfügbar. Bild 2 stellt bezogen auf die Erde anschaulich in einem sog. Energiewürfel die Energiemenge der jährlichen Sonneneinstrahlung dem jährlichen Energieverbrauch gegenüber. Die in den heute bekannten Mengen der Reserven anderer Energieträger enthaltenen Energiemengen sind zum Vergleich ebenfalls eingezeichnet. Die direkte Nutzung der Sonneneinstrahlung trägt mo-

mentan jedoch erst zu einem äußerst geringen Anteil zur Energieversorgung und Stromerzeugung bei. Der Anteil der Photovoltaik an der Stromerzeugung liegt beispielsweise in Deutschland zur Zeit erst bei unter 0,01 % [QUA03, BSE02].

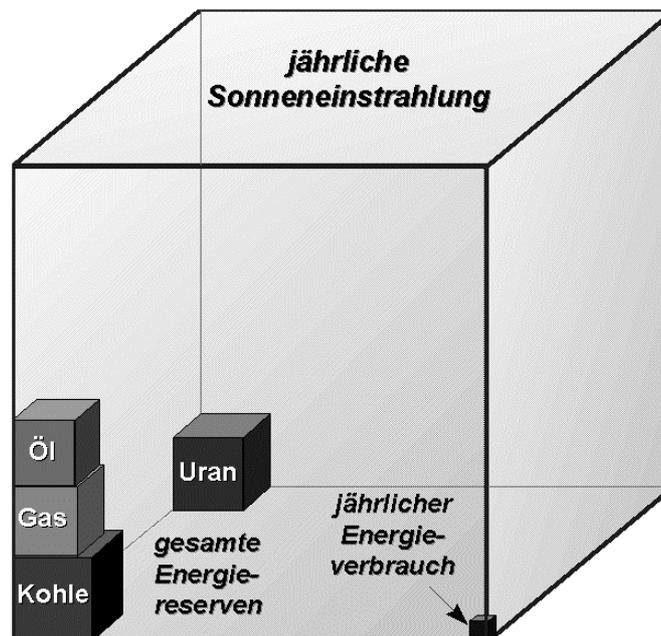


Bild 2: Energiewürfel [QUA03]

Eine effiziente und nachhaltige Nutzung der Sonnenenergie durch photovoltaische Systeme (PV-Systeme) könnte den Energiebedarf der Weltbevölkerung decken [QUA03]. Die Strahlung der Sonne versorgt allein Deutschland mit 135 Mal so viel Energie, wie verbraucht wird. So reichen beispielsweise in Deutschland die vorhandenen und erschließbaren Infrastrukturflächen wie Dächer, Fassaden, Verkehrswege und Freiflächen zur Erzeugung von annähernd 30 % des jährlichen Stromverbrauchs von 571 TWh in 2001 aus [BRI03, QUA03]. Weitere Vorteile der Photovoltaik sind neben den allgemeinen Vorteilen der regenerativen Energiequellen, die Möglichkeit der kostengünstigen dezentralen Energieversorgung und die nachhaltige Integrierbarkeit in die Umwelt [KLO03, QUA99]. Photovoltaische Systeme arbeiten während des Betriebs geräuschfrei und ohne bewegte Teile; die Lebensdauer der Systeme liegt bei über 25 Jahren. Es werden keine CO₂-Emissionen oder Schadstoffe an die Umwelt abgegeben und die Hauptausgangsstoffe Silizium, Glas und Stahl für ein PV-System sind noch für sehr lange Zeit verfügbar.

Bisher wurden bei der Weiterentwicklung der PV-Systeme die Schwerpunkte der Forschungen auf die Neuentwicklung und Verbesserung der photovoltaisch-aktiven Schicht und deren Wirkungsgrade sowie auf rationellere Produktionsver-

fahren gelegt. Demgegenüber ist eine Betrachtung der angrenzenden Systeme, wie der Befestigungssysteme, weitgehend unterblieben, so dass in diesem Bereich noch erhebliches Verbesserungspotential realisiert werden kann.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines montagegerecht gestalteten Befestigungssystems für Photovoltaikgeneratoren. Dazu wird im ersten Teil des zweiten Kapitels der Stand der Technik im Bezug auf Photovoltaiksysteme, deren Aufbau, Anwendungsarten und –gebiete sowie deren Wirtschaftlichkeit und Montage vorgestellt. Die Anwendungsgebiete der photovoltaischen Stromerzeugung werden analysiert, klassifiziert und das gegenwärtige und zukünftige Hauptanwendungsgebiet identifiziert. Im zweiten Teil des zweiten Kapitels werden sowohl der Aufbau als auch die Merkmale der im Hauptanwendungsgebiet am Markt vorhandenen Befestigungssysteme für Photovoltaikgeneratoren dargestellt und analysiert.

Der Handlungsbedarf in Bezug auf eine montagegerechtere Gestaltung der Befestigungssysteme wird im dritten Kapitel bestimmt. Es werden dazu die Beanspruchungen eines solchen Systems identifiziert und die daraus resultierenden Anforderungen aufgestellt. Im Abgleich der Anforderungen mit den im zweiten Kapitel erarbeiteten Merkmalen der Befestigungssysteme werden bestehende allgemeine Defizite identifiziert. Um detaillierte Gestaltungshinweise für ein montagegerechtes Befestigungssystem für Photovoltaikgeneratoren zu erhalten, wird im vierten Kapitel eine Methodik zur Bewertung der Montagegerechtheit dieser Systeme entwickelt und angewandt. Die Methodik stützt sich auf eine umfassende Recherche der Anforderungen an ein solches System. Die mit dieser Methodik erarbeiteten Gestaltungshinweise werden durch ergänzend durchgeführte Montageversuche erweitert, detailliert und verifiziert.

Basierend auf diesen Gestaltungshinweisen wird im fünften Kapitel ein montagegerechtes Befestigungssystem konzeptionell gestaltet. Dabei werden die Funktionsstruktur für dieses System aufgestellt und detailliert, Wirkprinzipien und Lösungsansätze für die Detailfunktionen erarbeitet sowie darauf aufbauend Kombinationen der Detaillösungen konzipiert. Im sechsten Kapitel wird das montagegerechte Befestigungssystem für Photovoltaikgeneratoren konstruktiv gestaltet. Dabei werden die für die Umsetzung der im fünften Kapitel konzipierten Detaillösungen und Lösungskombination erforderlichen einzelnen Bestandteile des Befestigungssystems ausgearbeitet. Abschließend wird das in dieser Arbeit konstruierte Befestigungssystem hinsichtlich der erzielten Verbesserung der Montagegerechtheit analysiert und bewertet.

2 Stand der Technik

2.1 Begriffe und Grundlagen

Die Quelle nahezu aller Energie auf der Erde ist die Sonne. Die Sonnenstrahlung ist nicht nur selbst eine Energiequelle, sondern auch der Ursprung der meisten anderen erneuerbaren Energieträger (Bild 3). Durch Erwärmung der Atmosphäre entsteht Wind, durch Verdampfung von Wasser und durch Regen wird der Lauf der Flüsse aufrechterhalten, durch Photosynthese wachsen Holz, Stroh und andere nachwachsende Biomassen. Diese Formen der Energiequellen werden auch als regenerative Energien oder erneuerbare Energien bezeichnet. Eine nachhaltige Nutzung dieser regenerativen Energiequellen schont die Ressourcen der Erde und trägt zur Reduzierung der Umweltbelastung bei [QUA03, BMU02a HIR01].

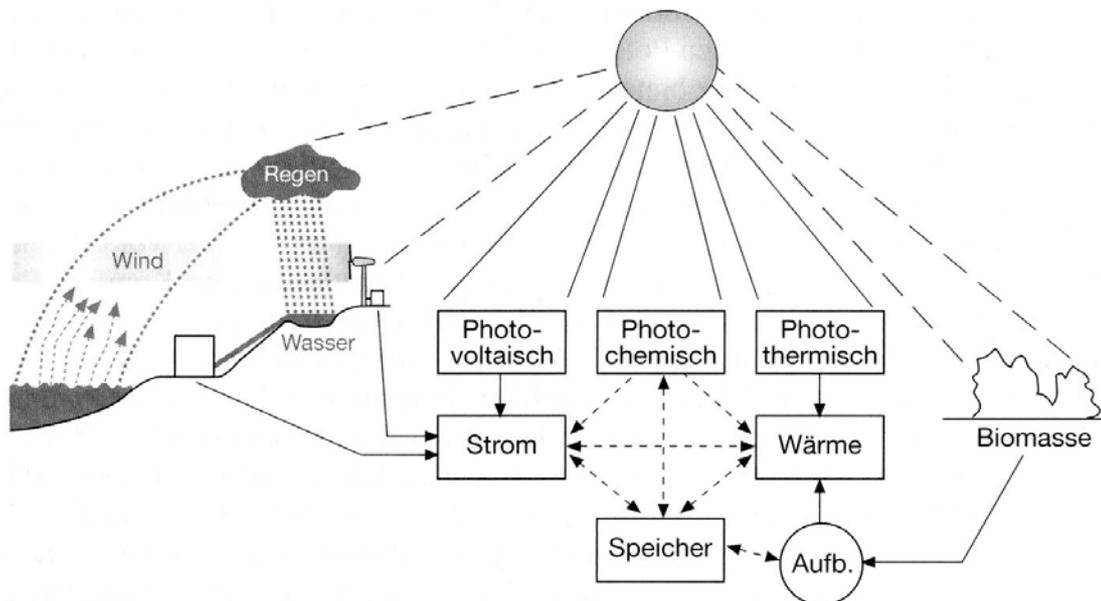


Bild 3: Arten regenerativer Energien und Einfluss der Sonne [BRÖ00]

Das mit Abstand größte Potential bietet die direkte Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie mittels Photovoltaik. Der Begriff *Photovoltaik* setzt sich aus den zwei Worten *Photo* und *Volta* zusammen. Hierbei steht *Photo* für das Licht und *Volta* für die Einheit der elektrischen Spannung [QUA03]. Photovoltaik bezeichnet die *direkte Gewinnung elektrischen Stroms aus Sonnenlicht* oder genauer die *Technik der direkten Umwandlung eingestrahelter Lichtenergie in elektrische Energie* [KHA97]. Dies beruht auf der Fähigkeit von Halbleitern, durch Lichtenergie erzeugte Ladungsträger unter bestimmten Bedingungen gerichtet freizusetzen bzw. räumlich zu trennen, was als photovoltaischer Effekt bezeichnet

wird. Der photovoltaische Effekt wurde 1839 von *BEQUEREL* entdeckt und 1954 erstmals von *BELL TELEPHONE (USA)* als Solarzellenprinzip praktisch angewendet [HAD00].

Die photovoltaischen Systeme sind von solarthermischen Anlagen zu unterscheiden. In solarthermischen Anlagen wird in sog. (Sonnen-)Kollektoren Sonnenstrahlung zur Erwärmung von Brauchwasser gesammelt. Es wird keine elektrische Energie erzeugt. Es existieren aber so genannte „Hybridkonzepte“, in denen beide Wirkprinzipien gekoppelt werden. Während eine photovoltaische Schicht nur bestimmte Wellenlängen des gesamten Sonnenlichtspektrums absorbiert, nutzt ein darunter liegender Kollektor die Wärmestrahlung sowie Abwärme der Solarzellen [BRÖ00].

2.1.1 Photovoltaiksystem

Bevor man über die Förderung einer neuen Technologie wie der Photovoltaik nachdenkt, muss man die Frage nach deren ökologischer Unbedenklichkeit und Nachhaltigkeit beantworten. Für den Betrieb von PV-Systemen lässt sich eindeutig feststellen, dass sich keine unerwünschten Folgen für Bürger, Gesundheit, Klima u.ä. ergeben. Dies wurde in mehreren Lebenszyklusanalysen verschiedener Autoren bestätigt [BIN98, KAT95, LEH95, ALS94, KAR92, KOL92]. Außerdem verhindert jede photovoltaisch erzeugte Kilowattstunde Strom den Ausstoß von ca. 0,7 kg CO₂ [BSE02, ELI98]. Der Zeitraum, in dem sich die zur Herstellung eines Energieerzeugungssystems aufgewendete Energie durch die Energieerzeugung des Systems im Betrieb amortisiert hat, wird als *energetische Amortisationszeit* bezeichnet. Untersuchungen der energetischen Amortisationszeit von PV-Systemen haben für ein auf polykristallinem Silizium basierendes System eine durchschnittliche Energierückzahlzeit von drei Jahren ergeben [KAL03, PAL92]. Dem stehen durchschnittliche System-Lebensdauern von 25 bis 30 Jahren gegenüber.

Photovoltaische Systeme sind hinsichtlich der Leistungsgröße flexibel. Von wenigen Milliwatt für z.B. Taschenrechner [STA99] über private Anwendungen im Kilowatt-Bereich bei beispielsweise Dachinstallationen bis hin zu Großkraftwerken mit mehreren Megawatt werden die erzielbaren Leistungen nur durch den Platzbedarf des Systems begrenzt [BSE02]. PV-Systeme vereinen Vorteile, die für ein stromerzeugendes System einmalig sind [WOY01]: Zur Funktionserfüllung sind keine bewegenden Teile erforderlich, daraus folgernd ergibt sich keine Notwendigkeit einer regelmäßigen Wartung, ein geräuschloser Betrieb sowie kein Ausstoß von Emissionen beim Betrieb. Daraus resultiert eine Einfachheit des Systems, welche

auch den Betrieb unter wechselnden, technisch unversierten Nutzern ermöglicht. In der Folge werden die Bestandteile eines PV-Systems vorgestellt.

2.1.1.1 Solarzelle

Zur Gewinnung elektrischen Stroms aus Sonnenlicht werden sog. *Solarzellen* verwendet. Prinzipiell besteht eine Solarzelle aus einer Kombination eines p- und eines n-Halbleiters. Die gebräuchlichsten Solarzellen bestehen aus n- und p-Halbleitern auf Siliziumbasis. Silizium bietet als nach Sauerstoff zweithäufigstes Element der Erdrinde den Vorteil, in ausreichenden Mengen vorhanden zu sein und eine umweltverträgliche Verarbeitung zu ermöglichen [QUA03]. Das Siliziumatom verfügt in seiner Elektronenschale über vier Valenzelektronen. Jedes Atom strebt die stabile Edelgaskonfiguration an. Um diese zu erhalten, müssen acht Valenzelektronen in ihrer Schale vorhanden sein. Aus diesem Grund umgibt sich ein Siliziumatom im Siliziumkristall mit vier weiteren Siliziumatomen. Im Bändermodell ist das Valenzband voll besetzt und das Leitungsband leer, da keine frei beweglichen Elektronen vorhanden sind. Durch den Einfluss von Licht oder Wärme kann ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden. Es befinden sich ein freier Ladungsträger und ein positiv geladenes Loch im Kristallgitter. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung wandern die frei beweglichen Elektronen zur Anode. Dieser Effekt wird *Eigenleitung des Halbleiters* genannt [KHA97].

Zur Herstellung eines n-Halbleiters wird ein Siliziumkristall mit einem Element der fünften Hauptgruppe dotiert. Das heißt, dass in ein Siliziumkristall ein Atom mit fünf Valenzelektronen, in der Regel Phosphor (P), eingebaut wird. Das Phosphoratom verbindet sich mit vier Siliziumatomen (Si). Da es aber fünf Valenzelektronen besitzt, wird ein Valenzelektron nur sehr locker gebunden. Es kann mit relativ wenig Energieaufwand vom Atom getrennt werden und steht dann als freies Elektron zur Verfügung. Bei der p-Dotierung wird in ein Siliziumkristall ein Atom der dritten Hauptgruppe, in der Regel Bor (B), eingebaut. Das Boratom besitzt drei Valenzelektronen, also ein Valenzelektron zu wenig. Es entsteht ein sog. *Elektronenloch* als Störstelle. Durch die p-Dotierung wird der Halbleiter p-leitend (Bild 4).

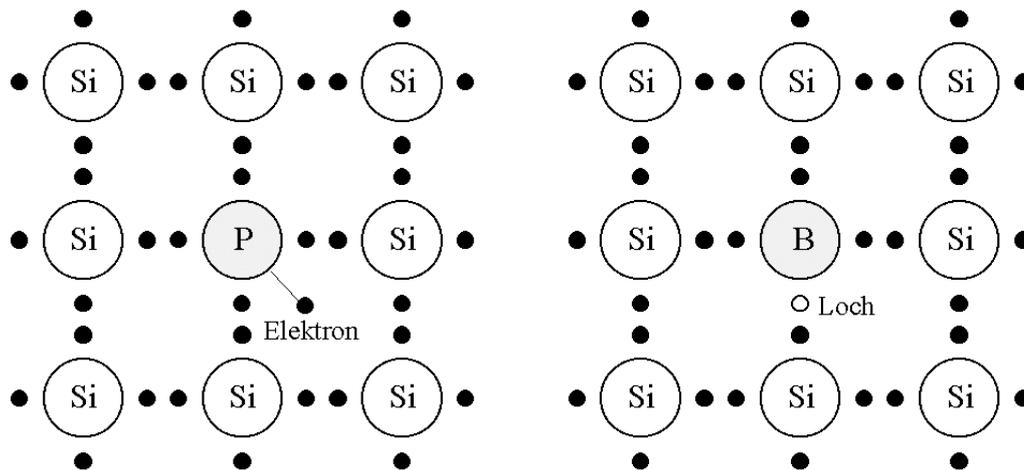


Bild 4: Störstellenleitung bei n-dotiertem Silizium (links) und p-dotiertem Silizium (rechts) [QUA03]

Werden ein p- und ein n-Halbleiter in Kontakt gebracht, so entsteht ein p/n-Übergang. Die freien Elektronen diffundieren in das Gebiet des p-Halbleiters. Es bleiben positiv ionisierte Donatoratome zurück. Hier entsteht eine positive Raumladungszone. Im p-Gebiet bleiben negativ ionisierte Donatoratome zurück. Es entsteht eine negative Raumladungszone. Zwischen dem n- und dem p-Gebiet entsteht ein elektrisches Feld, das der Diffusion der Ladungsträger entgegengesetzt ist, so dass die Diffusion nicht endlos fortgesetzt werden kann. Es entsteht schließlich die Diffusionsspannung [QUA03].

Wird eine Solarzelle mit einem p/n-Übergang einer Lichtquelle ausgesetzt, so werden Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben. Diese Elektronen wandern in das n-Gebiet. An den Metallkontakten, die sich an der Oberflächen der Solarzelle befinden, entsteht eine Spannung. Diese Spannung führt in einem äußeren geschlossenen Stromkreis zu einem Gleichstrom (**Bild 5**) [KHA97]. Die Stärke dieses Effekts und damit die Leistung der Solarzelle hängen im Wesentlichen von der Energie und der Wellenlänge des eingestrahlt Lichts, den Materialeigenschaften und der Temperatur des Halbleiters ab [QUA03].

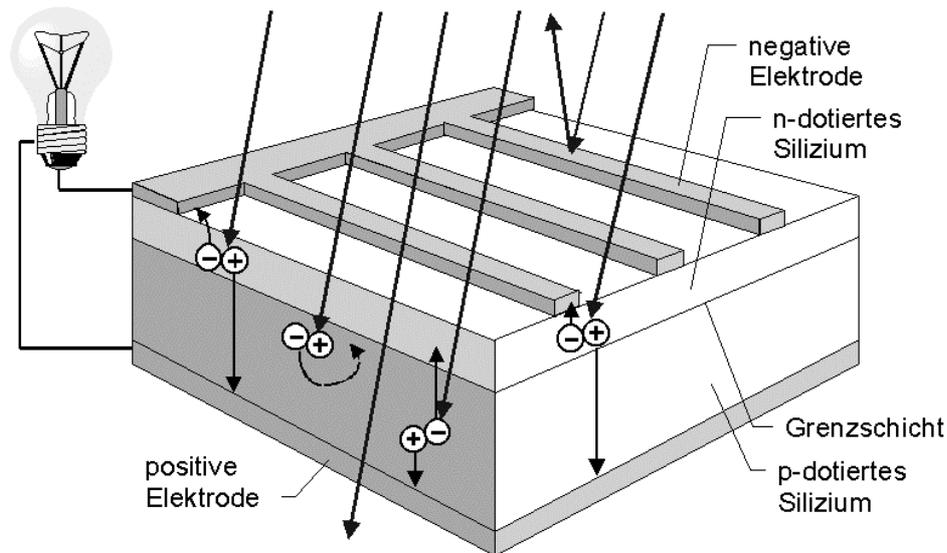


Bild 5: Solarzelle mit einem p/n-Übergang [QUA03]

Klassisches Ausgangsmaterial für Solarzellen ist hochreines Halbleitersilizium. Man unterscheidet zwischen mono- und polykristallinem Halbleitersilizium. Ein polykristallines Material besteht aus vielen, möglichst großen Kristallen, die durch Korngrenzen miteinander verbunden sind. Diese Korngrenzen sind Störungen im Kristallgitter und führen zu einer Verminderung des Wirkungsgrades einer Solarzelle. Im monokristallinen Silizium sind diese Störungen nicht vorhanden. Aus diesem Grund sind die erreichten Wirkungsgrade mit bis zu 16,5 % etwas größer als bei den polykristallinen Solarzellen mit bis zu 12 % [HAD00]. Das Silizium wird in der Herstellung als Monokristall aus der Schmelze gezogen oder als Polykristall in einer Form gegossen. Die Herstellung monokristalliner Siliziumkristalle gestaltet sich aufwendiger als bei polykristallinem Silizium, woraus die erhöhten Herstellungskosten resultieren. Diese Ausgangsformen werden in dünne Scheiben, sog. Wafer, gesägt und anschließend durch Strukturierung und interne Verschaltung zu Solarzellen veredelt.

Bei amorphen Solarzellen wird das Silizium aus einer gasförmigen Verbindung auf ein Trägermaterial, z.B. Glas, aufgedampft. Die Herstellungskosten liegen unter denen kristalliner Solarzellen. Durch die unregelmäßige Anordnung der Siliziumatome werden hohe Absorptionsgrade der Sonnenstrahlen erreicht. Amorphe Solarzellen sind mit ca. 1 μm Dicke sehr viel dünner als mono- oder polykristalline Solarzellen. Der Wirkungsgrad amorpher Solarzellen beträgt ca. 6 % [HAD00, YAN99].

In Zukunft können sog. CIS-Zellen eine größere Bedeutung erlangen. Unter Verwendung des Ausgangsmaterials Gallium-Arsenid (GaAs) oder Cadmium-Tellurid

(CdTe) sind im Labormaßstab Wirkungsgrade von bis zu 20 % realisiert worden. Die industrielle Produktion ist inzwischen angelaufen. Aufgrund der noch hohen Herstellungskosten wird sich diese Technologie im zivilen Anwendungsbereich vorerst nicht durchsetzen können. Derzeit ist lediglich in der Luft- und Raumfahrt eine breite Anwendung dieser Technologie zu erkennen [BUT02].

Solarzellen haben in der Regel eine quadratische Form mit einer Kantenlänge von 100 mm x 100 mm bzw. 150 mm x 150 mm und einer Dicke von 0,1 bis 0,3 mm. Eine einzige Solarzelle kann je nach Halbleitermaterial zwischen 0,3 und 0,9 V erzeugen. Um höhere Spannungen zu erhalten, werden mehrere Zellen zu sog. *Modulen* elektrisch zusammengeschaltet [QUA03].

2.1.1.2 Modul

Das Grundelement eines PV-Systems ist das *Photovoltaikmodul* (PV-Modul). Um die Leistung eines PV-Moduls an die jeweiligen Anforderungen anpassen zu können, werden in dem Modul Solarzellen in Reihen- und/oder Parallelschaltung elektrisch leitend verbunden. Üblich sind Verschaltungen von 36 bzw. 72 Zellen (Bild 6), um damit 12 bzw. 24 V Gleichstrom je Modul zu erzeugen.



Bild 6: PV-Modul bestehend aus 72 verschalteten Solarzellen

Ein PV-Modul muss im Wesentlichen folgende Anforderungen erfüllen: Beständigkeit gegen gebietspezifische Klimaeinflüsse, wie z.B. Feuchtigkeit, Hagel, Salz, usw., Temperaturbeständigkeit zwischen -50°C und $+90^{\circ}\text{C}$, mechanische Stabilität, Resistenz gegen Ultraviolett(UV)-Strahlung sowie elektrische Sicherheit. Zusätzlich ist Montagegerechtheit, ein niedriger Preis, eine gute Flächenausnutzung,

ein möglichst geringes Gewicht und ein ansprechendes optisches Design wünschenswert.

Der schematische Aufbau eines marktüblichen PV-Moduls ist in (Bild 7) dargestellt. Die Vorderseite des Moduls besteht aus einem hochtransparenten, gehärteten, eisenfreien Spezialglas. Die empfindlichen Solarzellen sind zum Schutz gegen mechanische Beschädigung und Feuchtigkeit zwischen diesem Frontglas und einer hochsteifen Trägerplatte (z.B. Tedlar®-Polyester-Tedlar-Verbund) in einer Einbettfolie aus Ethyl-Venyl-Acetat (EVA) einlaminieren. Die elektrische Verbindung der Solarzellen wird mit Verbindungsbändchen aus Aluminium hergestellt. Ein Modul kann je nach Anforderung in einem Profilrahmen aus Aluminium oder Edelstahl eingefasst sein oder rahmenlos als sog. *Laminat* vorliegen. Eine um den Rand laufende Kautschukdichtung schützt das Modul vor eindringender Feuchtigkeit [HAD00].

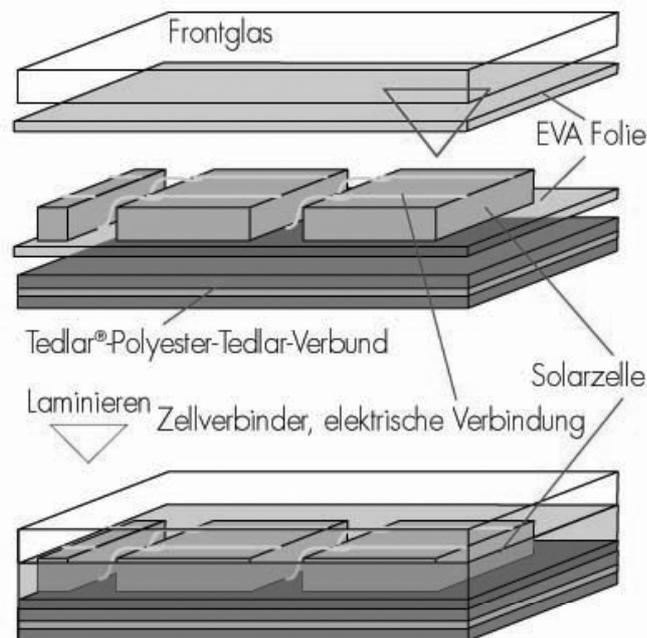


Bild 7: Schematischer Aufbau eines PV-Moduls mit kristallinen Zellen [DEU01]

Bereits 1999 existierten 170 verschiedene Modultypen mit einer Leistung größer 50 W auf dem deutschen Markt [HAD00]. In den letzten Jahren verkleinerten verschiedene Hersteller ihr Sortiment an PV-Modulen und erweiterten deren Leistungsbereich, um mittels Reduzierung der Produktvielfalt eine Senkung der Herstellungs- und Montagekosten zu realisieren [AIC03]. In Tabelle 2 sind einige Modultypen verschiedener Hersteller mit den charakteristischen Daten für unter-

schiedliche Leistungsbereiche aufgeführt. Die Leistungsangaben in W_p beziehen sich stets auf die maximal mögliche Leistung bei Standardtestbedingungen (Standard Test Conditions), also unter senkrechter Strahlung von 1000 W/m^2 bei konstantem Lichtspektrum und einer Zelltemperatur von 25°C .

Hersteller	Typ	Zellen- typ	P_N [W_p]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	Wirkungs- grad [%]	Gewicht [kg]
ASE-Phototr.	ASE-30	amorph	32	68,0	0,47	5,84	12,0
BP-Solar	BP1210S	monokr.	10	17,0	0,59	n.b.	1,6
BP-Solar	BP5130	monokr.	133	29,8	4,50	16,0	13,0
Braas*	SRT35 PV700	polykr.	35	8,5	4,15	12,4	6,0
Helios	H 800	monokr.	80	17,0	4,70	11,3	8,5
Kyocera	KC 40	polykr.	40	16,9	2,34	11,7	6,0
Pilkington- Optisol Solar*	SMF 128	polykr.	250	30,1	8,30	11,9	50,0
Siemens	ST 5	CIS	5	15,6	0,32	n.b.	1,4
Siemens	SM10	monokr.	10	16,3	0,61	n.b.	1,8
Siemens	SM 55	monokr.	55	17,4	3,15	12,9	5,5
Solarex	SA-5	amorph	5	15,0	0,34	4,4	1,7

*: für Dachintegration; n.b.: nicht benannt

Tabelle 2: Kenndaten von PV-Modulen unterschiedlicher Hersteller [AIC03, FLA03, PHO03]

2.1.1.3 Generator

Der *Photovoltaikgenerator* (PV-Generator) ist die aktive Grundkomponente eines photovoltaischen Energieversorgungssystems. Zum Erreichen einer bestimmten Generatorleistung werden einzelne PV-Module elektrisch in Reihe und/oder parallel verschaltet [KRA98, GRA96]. Die elektrischen Ausgangswerte eines Generators sind definiert durch die Generatorausgangsspannung und den Generatorausgangsstrom. Die Generatorausgangsspannung wird durch die Anzahl der in Reihe geschalteten PV-Module bestimmt, der Generatorausgangsstrom durch die Anzahl paralleler Stränge von in Reihe geschalteten PV-Modulen. Der jeweilige Anwendungsfall entscheidet über die Wahl der Spannung und des Bemessungsstroms [BRÖ00].

Die häufigsten Defekte, die an einem PV-Generator auftreten können, sind Kurzschlüsse, Masseschlüsse, Leistungsunterbrechungen oder Verschattungen. Verschattungen können zu Beschädigungen einzelner Solarzellen führen. Durch die Verschaltung sog. Bypass- und Strangdioden werden diese Art von Schäden wirkungsvoll verhindert [QUA03, HAD00].

2.1.1.4 Balance-of-Systems

Neben dem PV-Generator, bestehend aus den PV-Modulen, gehören zu einem PV-System Befestigungen, elektrische Verkabelungen sowie, je nach Anwendungsfall, Wechselrichter und/oder Akkumulator (Bild 8). Diese Komponenten werden auch als *Balance-of-Systems (BOS)* zusammengefasst [BER03, STA96]. Ein Wechselrichter dient der Umwandlung des von einem PV-Generator erzeugten Gleichstroms in sinusförmigen, netzkonformen Wechselstrom [KLE00]. Da elektrische Klein- und Großgeräte in der Regel mit Wechselstrom betrieben werden, kommen Wechselrichter bei nahezu jedem PV-System zum Einsatz [RIN00]. Bei einigen Lösungen sind elektronische Komponenten, wie z.B. der Wechselrichter, im PV-Modul bereits integriert. In diesen Fällen ist die elektronische Komponente als ein Bauteil des PV-Moduls zu verstehen.

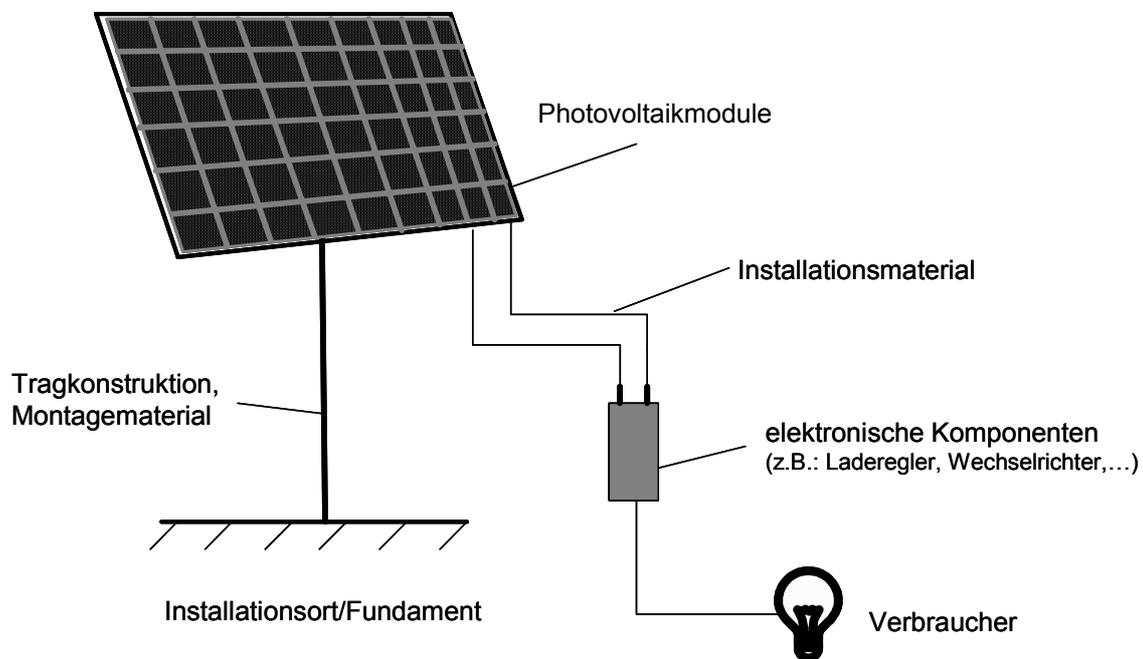


Bild 8: Prinzipieller Aufbau eines PV-Systems

Als *Befestigungssystem* werden alle Komponenten zusammengefasst, die

- der Befestigung des PV-Generators in der Einsatzumgebung,
- dem Zusammenhalt der PV-Module zu einem PV-Generator und
- der elektrischen Verschaltung der PV-Module untereinander dienen.

2.1.2 Anwendungsarten und –gebiete

Es werden nach *DIN EN 61277* zwei Arten von PV-Systemen unterschieden: Zum einen *autonome netzunabhängige PV-Systeme*, die auch als *PV-Inselssysteme* bezeichnet werden. Zum anderen *netzgekoppelte PV-Systeme* [DIN61277]. Der Einsatz eines PV-Systems als Insellösung ermöglicht eine dezentrale Energiever-

sorgung in netzfernen Regionen oder in Regionen unzureichender Stromnetzinfrastruktur sowie nicht ortsgebundener Endverbraucher [WOY01, VER98, HEU96]. Die über den zeitgleichen Bedarf hinausgehende erzeugte elektrische Energie wird in der Regel in einem Akkumulator zwischengespeichert. So steht elektrischer Strom in Zeiten schlechter Energieausbeute zur Verfügung. Bei der Speicherung in einem Akkumulator geht allerdings elektrische Energie verloren [BRU99]. Sollte die erzeugte elektrische Leistung nicht ausreichend sein, besteht die Möglichkeit, zusätzliche Generatoren, wie z.B. Verbrennungsmotoren, parallel zu schalten. Mittels dieser sog. *hybriden Systeme* kann die Versorgung mit elektrischer Energie zu jeder Tageszeit und Witterung und bei Betriebsstörungen des PV-Inselsystems sichergestellt werden [KLE95]. Ist eine Netzinfrastruktur vorhanden und kann auf diese unkompliziert zugegriffen werden, ist der Einsatz eines netzgekoppelten PV-Systems sinnvoll. Netzgekoppelte PV-Systeme arbeiten im Netzparallelbetrieb. Die über den zeitgleichen Bedarf hinausgehende erzeugte elektrische Energie wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist und vergütet. In Zeiten schlechter Energieausbeute bzw. bei geringer Intensität oder fehlender Sonneneinstrahlung werden die elektrischen Geräte aus dem öffentlichen Versorgernetz gespeist (Bild 9) [REI02]. Aufwendige Energiespeichersysteme, die den Gesamtwirkungsgrad des PV-Systems reduzieren, sind somit überflüssig [BET02, HEU96].

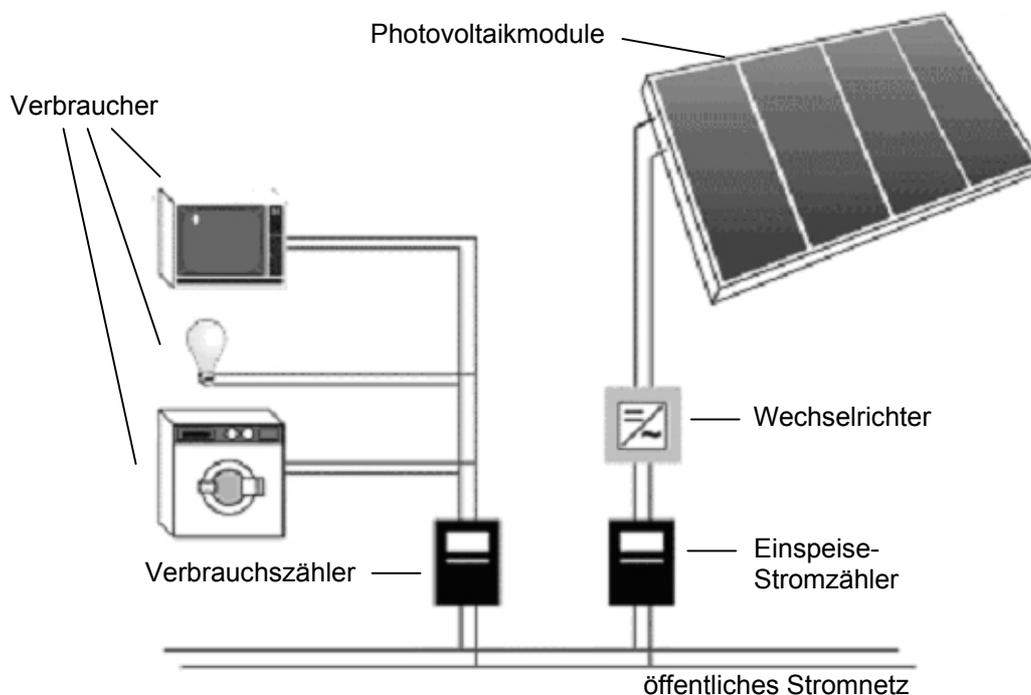


Bild 9: Schematischer Aufbau eines netzgekoppelten PV-Systems

Die Anwendung der Photovoltaik unterscheidet sich ferner in Industrie-, Entwicklungs- und Schwellenländer. Während in den Ländern der 1. Welt die Anbindung der privaten Haushalte an das Stromnetz seit längerer Zeit selbstverständlich ist, haben in den Entwicklungs- und Schwellenländern mehrere Milliarden Menschen keinen Zugang zu einer verlässlichen Stromversorgung [ISE02]. Die Hauptgründe hierfür sind eine schlecht ausgebaute Netzinfrastruktur und die hohen Anschaffungskosten zur Bereitstellung elektrischen Stroms. Umstände wie schlecht zugängliches Gelände in dünn besiedelten Gebieten werden auch in Zukunft den Ausbau des Stromnetzes behindern. Viele dieser Länder befinden sich in Äquatornähe, in Gebieten hoher Sonneneinstrahlungsintensität und -dauer. Für diese Länder wäre eine nachhaltige dezentrale Stromversorgung durch regenerative Energiequellen sehr effektiv. Die photovoltaische Stromerzeugung gilt als „Schlüsseltechnologie zur künftigen Stromversorgung von Entwicklungsländern“ [BMW01]. Dabei ist die Elektrifizierung netzferner Regionen in der Dritten Welt in doppelter Hinsicht eine nachhaltige Entwicklung: Die Umwelt wird durch den Einsatz der Photovoltaik und die Substitution fossiler Brennstoffe geschützt, gleichzeitig die soziale und ökonomische Entwicklung u.a. durch die Schaffung von Kommunikationsmöglichkeiten gefördert. Mit einer installierten Maximalleistung von 50 W_p liefern die sog. Solar-Home-Systems (Bild 10) genügend Strom für TV, Radio und 3 Leuchtstofflampen, welche mit Gleichstrom betrieben werden. Die standardisierte Versorgungseinheit besteht aus einem PV-Modul mit einer Fläche von $0,5 \text{ m}^2$ mit Befestigungssystem, einer Batterie und 3 m Kabel und sichert so den Grundbedarf an Strom. Neben dieser einfachen photovoltaischen Versorgung einzelner Haushalte werden hybride PV-Systeme für öffentliche Einrichtungen wie Krankenhäuser oder Schulen eingesetzt [GAB99].

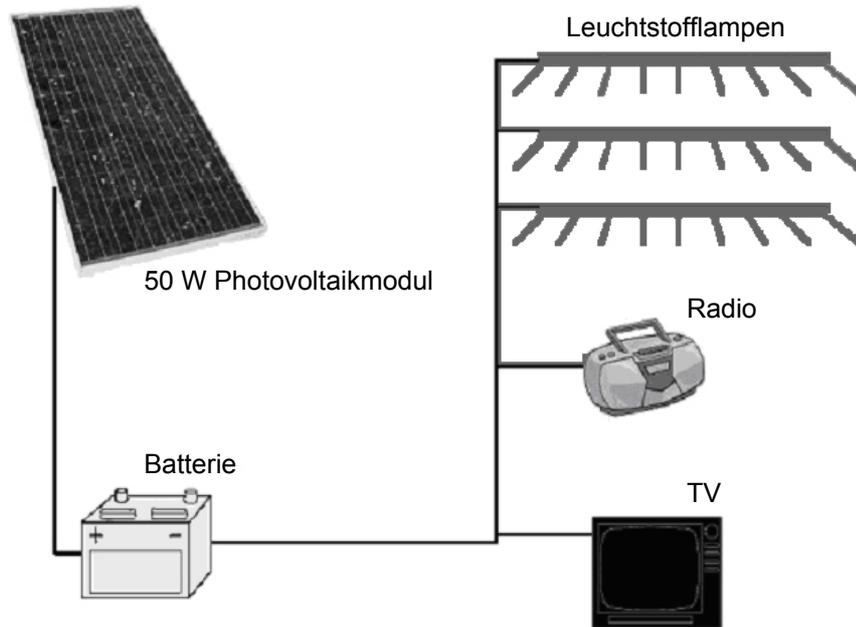


Bild 10: Prinzipieller Aufbau eines Solar-Home-Systems

In den Industrieländern sind gerade aus der Erkenntnis der Notwendigkeit eines langfristigen Wandels der Energieversorgung hin zu mehr Nachhaltigkeit eine Reihe von Maßnahmen zur Förderung regenerativer Energien ins Leben gerufen worden. Diese nachfrageorientierte Politik hat hier u.a. die ersten Impulse zur Verbreitung der Photovoltaik geliefert. In den Industrieländern lassen sich mit der Installation von PV-Generatoren auf privaten, öffentlichen bzw. gewerblichen Dächern das vorhandene Flächenpotential zugunsten einer umweltfreundlichen photovoltaischen Energieerzeugung nutzen. Vereinzelt sind sogar photovoltaische Kraftwerke entstanden. Diese zentralen PV-Systeme mit mindestens 100 kW_p installierter Leistung befinden sich ausschließlich in sehr sonnenreichen Gegenden und sind bisher auch dort erst spärlich verbreitet [BUT02]. In Tabelle 3 ist ein Auszug möglicher Anwendungen für netzgekoppelte PV-Systeme aufgeführt.

Einsatzgebiet	Anwendungsbeispiel
Wohnhäuser, Bürohäuser, Fabrikgebäude	Beleuchtung Klimaanlage Radio/TV Telekommunikation
elektrische Schienenfahrzeuge	Beleuchtung Betriebsfunk Klimaanlage
Kraftwerke	zusätzliche Stromerzeugungskomponente

Tabelle 3: Anwendungsmöglichkeiten netzgekoppelter PV-Systeme, nach [HAD00]

PV-Systeme, die über keinen Anschluss an das öffentliche Stromversorgungsnetz verfügen, lassen sich in den Industrieländern grob in Systeme zur Stromversorgung entfernter Gegenden, in mobile Konsumenten-Anwendungen und in Systeme zur Versorgung nachrichtentechnischer Einrichtungen unterteilen. Allein in den alten Bundesländern Deutschlands gibt es 114.000 Haushalte mit mindestens drei Personen, die nicht an das Stromnetz angeschlossen sind. In der überwiegenden Zahl dieser Fälle sorgen hybride PV-Systeme für die Versorgung dieser netzfernen Gegenden [PHO02, ISE02]. Dies macht jedoch die optimale Auslegung des Gesamtsystems erforderlich. Wenn möglich, wird die Fläche des PV-Generators so dimensioniert, dass der Bedarf an Elektrizität mit der ungünstigsten Strahlungssituation im Winter gedeckt werden kann [HEU96]. Große Bedeutung hat der Einsatz der Photovoltaik in den Industrieländern im Konsumenten- und Freizeitbereich. Bei der mobilen Stromversorgung von portablen Kleingeräten stellt die Photovoltaik bereits heute auch ökonomisch eine echte Alternative zur Energieversorgung mit Batterien dar. Wichtige Einsatzgebiete für dezentrale Kleinanwendungen sind darüber hinaus der Camping- und Bootssektor. Zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit ist in der Regel jedoch die Integration eines Energiespeichers, meist in Form eines Akkumulators, erforderlich. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für die Photovoltaik sind Telekommunikationsanlagen. Diese befinden sich oft an schlecht zugänglichen, exponierten Orten, welche keinen Zugang zum Stromnetz haben und bei denen eine Erweiterung des Stromnetzes ökonomisch nicht sinnvoll ist. Die flächendeckende Errichtung von Sendemasten für den Mobilfunk ist ein Beispiel für diese Anwendungsmöglichkeit [BUT02]. In Tabelle 4 ist ein Auszug möglicher Anwendungen von PV-Inselsystemen zusammengestellt. Die relative Verteilung der Anwendungsgebiete ist in Bild 11 dargestellt.

Einsatzgebiet	Anwendungsbeispiel
Wochenend-, Ferienhäuser, Berghütten	Beleuchtung Radio/TV
Wohnmobile	Batterienachladung Beleuchtung Radio/TV Kühlung
Verkehr	Straßen- und Baustellenbeleuchtung Notrufsäulen Parkuhren
Mobilfunk	Sendemasten
Werbung	Beleuchtung Mobiles
Landwirtschaft	Weidezäune Bewässerung Wasserpumpen
Hobby/Freizeit	Boote Solarautos Radio/TV

Tabelle 4: Anwendungsmöglichkeiten von PV-Inselsystemen, nach [HAD00]

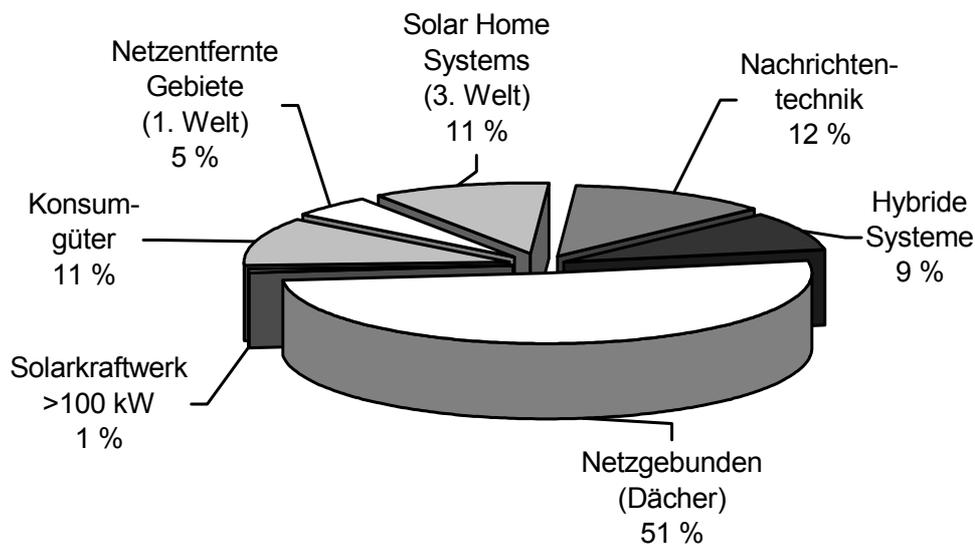


Bild 11: Anteile der neu installierten Leistung gemäss den spezifischen Anwendungsgebieten am gesamten, weltweiten PV-Markt 2001, nach [BUT02]

Bild 12 zeigt zusammenfassend eine Systematisierung der PV-Systeme. Die Anwendungsarten von PV-Systemen werden nach der *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA)* in vier Kategorien eingeteilt: Inselsysteme auf Wohnhäusern, Inselsysteme im Nicht-Wohnbereich, netzgekoppelte zentrale Systeme und netzgekop-

pelte dezentrale Systeme [IEA01]. Die Marktanteile gemäß dieser Unterteilung stellt Bild 13 dar.

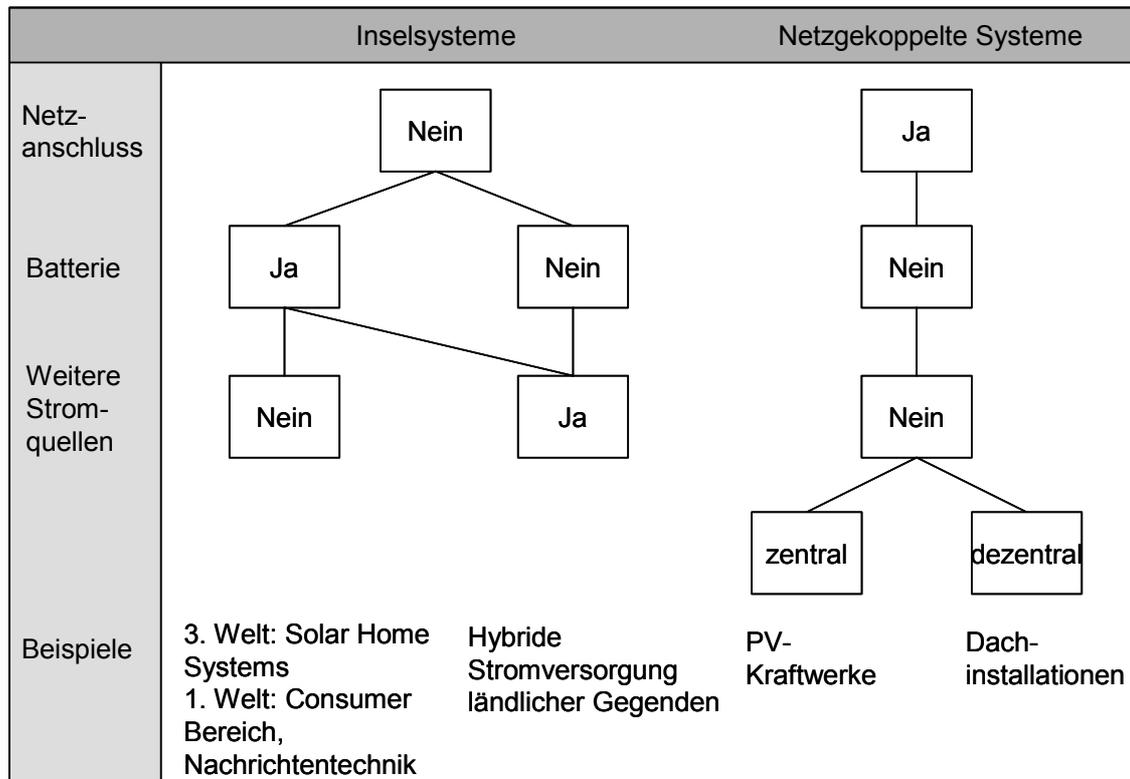


Bild 12: Systematisierung von PV-Systemen

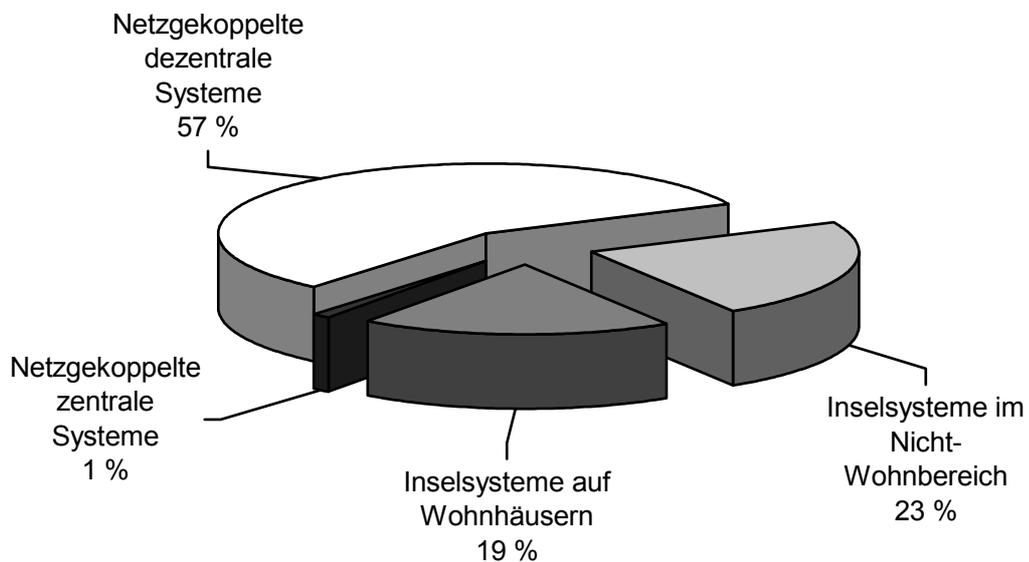


Bild 13: Marktanteile von PV-Systemen nach Anwendungsart bezogen auf die im Jahr 2001 installierten Leistung, nach [BUT02]

Wie in Bild 11 und Bild 13 gezeigt, ist der größte Anteil von PV-Systemen auf Dächern befestigt. Dies ist auch das Hauptanwendungsgebiet der photovoltaischen Stromerzeugung in den Industrieländern. Die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit konzentrieren sich daher auf diesen Bereich.

2.1.3 Wirtschaftlichkeit

Für den Einsatz photovoltaischer Systeme zur Nutzung der Sonnenenergie gibt es, wie oben dargestellt, eine Reihe von Möglichkeiten. Zur Verdeutlichung des Flächenbedarfs und der Leistung von photovoltaischen Systemen sei ein PV-Generator aus kristallinen Solarzellen mit einer Maximalleistung von 1 kW betrachtet. Dieser benötigt dafür eine sonnenbestrahlte Fläche der PV-Module von ca. 10 m². Bei einer durchschnittlichen Strahlung von 1000 kWh/m²a in Deutschland kann bei einem Wirkungsgrad des Gesamtsystems von 10 % bei diesem PV-Generator theoretisch mit einer Leistung von 1000 kWh/a gerechnet werden. Die Umwelt wird bei solch einer Anlage um bis zu 700 kg CO₂ pro Jahr entlastet und 2400 bis 2700 kWh/a Primärenergie werden substituiert [BSE02, GAB02b, ELI98].

Obwohl die bislang in den Strompreisen noch nicht berücksichtigten externen Kosten der Stromerzeugung aus fossilen Rohstoffen (Bild 14) weitaus höher sind als die der Photovoltaik, verbessert sich die Wettbewerbsposition der Stromerzeugung aus Licht auch bei Berücksichtigung dieser gesamtwirtschaftlichen Kosten des Klimawandels für Deutschland jedoch nicht. Die Addition der Stromgestehungskosten und der externen Kosten bestimmt die volkswirtschaftlichen Stromerzeugungskosten, welche selbst im für die Photovoltaik günstigsten Fall noch 0,10 EUR/kWh über den Gesamtkosten einer Stromerzeugung aus Kohle liegt. Wettbewerbsfähig dagegen ist photovoltaisch erzeugter Strom überall dort, wo er mit Batterien und kleinen Dieselaggregaten in Konkurrenz steht oder eine mobile Stromversorgung erforderlich ist [WEC99, ZOP99, WIE96].

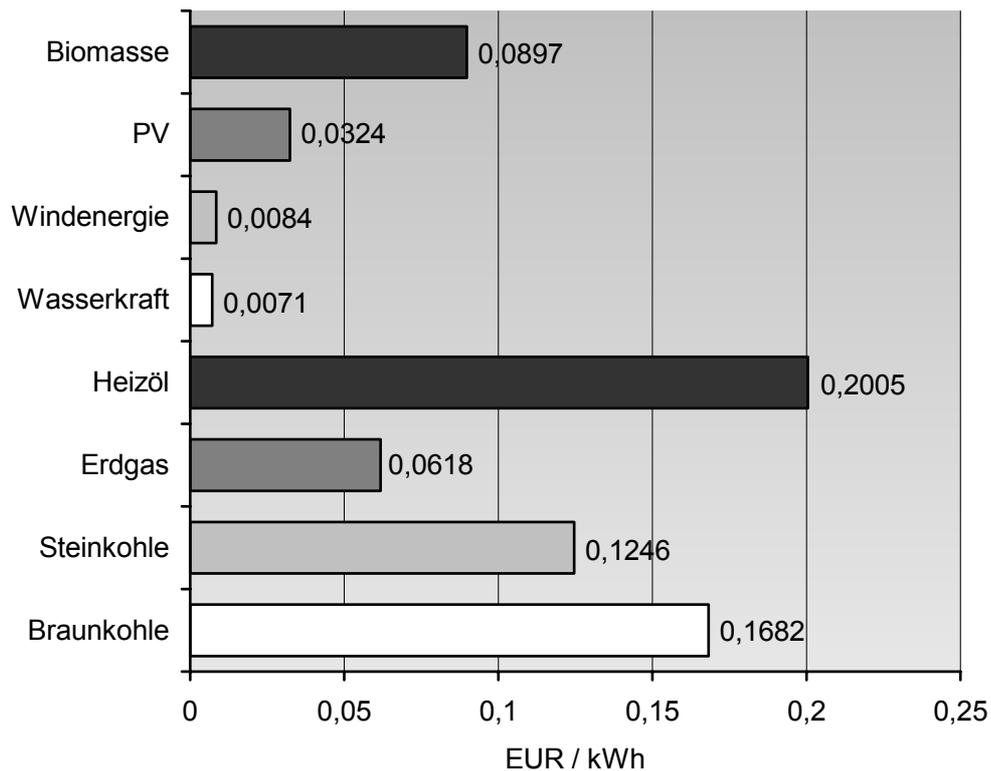


Bild 14: Mittlere spezifische Klimafolgekosten (externe Kosten) verschiedener Energieerzeugungsformen, nach [HOH02]

Da die Substituierung der umweltschädlichen und auf endlichen Rohstoffen basierenden Energieerzeugung ein Ziel nationaler und internationaler Energiepolitik ist, sind in Deutschland und einer Reihe von anderen Staaten Förderprogrammen zugunsten erneuerbarer Energiequellen entwickelt worden (Bild 15). Ziel dieser Programme ist zum einen die finanzielle Entlastung der Käufer bezüglich der hohen Anfangsinvestitionen, andererseits soll durch die künstlich gesteigerte Nachfrage eine langfristige Kostenreduktion erreicht werden. Die Unterstützung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der PV-Industrie zielt über das Erreichen von technischen Fortschritten ebenfalls auf eine langfristige Senkung der Herstellungskosten [BMU02a]. Neben der rein ökonomischen Seite der Förderpolitik zugunsten der Photovoltaik dienen Fördermittel für Demonstrationssysteme der Schaffung einer Akzeptanz der Technologie in der Gesellschaft.

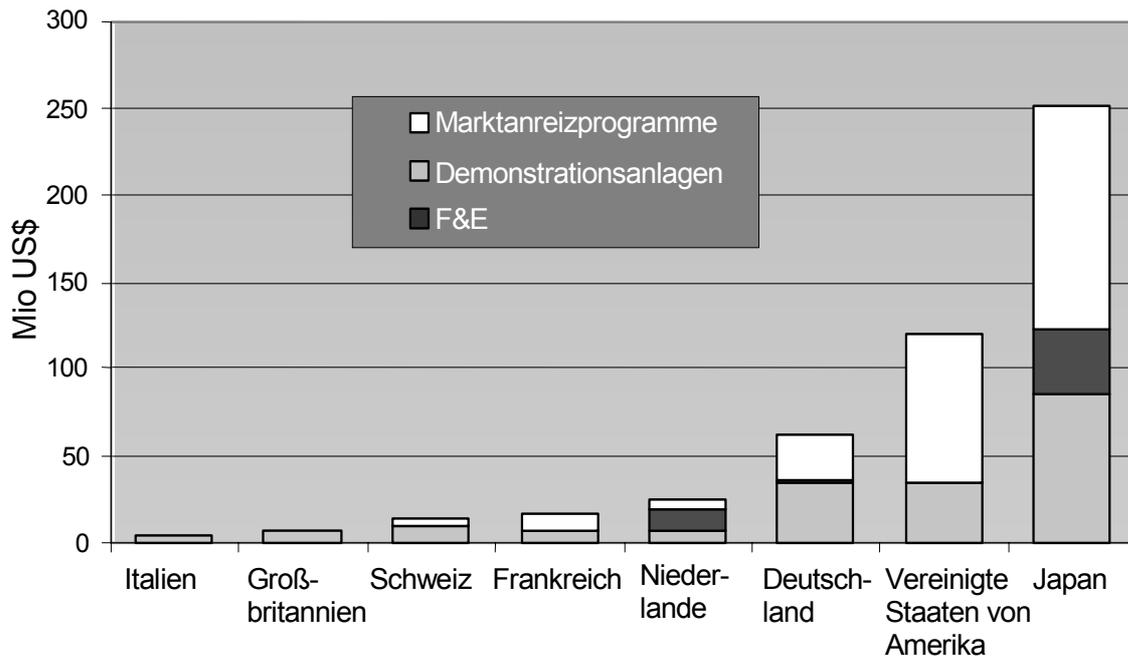


Bild 15: Budgets ausgewählter Staaten zur Förderung der Photovoltaik in 2000, nach [IEA01]

Den Betreibern von photovoltaischen Systemen wird in einer Reihe von Industrieländern finanzielle Unterstützung in Form von Steuervergünstigungen, Rabatten oder zinsverbilligten Krediten gewährt [SOL02]. In Deutschland sieht das sog. „Erneuerbare Energien Gesetz“ (EEG) [EEG00] beispielsweise für in 2003 errichtete netzgebundene PV-Systeme für die Dauer von 20 Jahren eine Einspeisevergütung von 0,455 EUR je photovoltaisch-erzeugter kWh vor. Ursprünglich sollte die staatliche Förderung der Photovoltaik auf eine installierte Gesamtleistung von 350 MW_p begrenzt sein. Im Juni 2002 wurde jedoch die Fortsetzung und Erweiterung des Programms auf 1000 MW_p im Bundestag beschlossen [BMU02b]. Die Kosten der Vergütung werden im Rahmen der Ökologischen Steuerreform auf alle Verbraucher umgelegt. Das 100.000-Dächer-Programm (HTDP) bietet Niedrigzins-Darlehen (z.Z. 1,91 %_{eff} p.a., 10 Jahre Tilgung bei zwei tilgungsfreien Anfangsjahren) über die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) zur Unterstützung der Anschaffung von PV-Systemen. Der Deutsche Fachverband Solarenergie hat das Ziel des EEG übernommen, Kostenreduktionen von durchschnittlich mindestens 5 % p.a. für die nächsten Jahre zu realisieren [STR01].

Nicht zuletzt durch diese Marktanreizprogramme ist in der Entwicklung des technischen Potentials der Photovoltaik schon ein beträchtlicher Fortschritt erzielt worden, so dass man heutzutage von einer beachtlichen Technologiereife sprechen kann [BMU02a, LAU02]. Eine weitere Entwicklung hin zu einer Konkurrenzfähig-

keit der Photovoltaik gegenüber den anderen Technologien zur Energieversorgung wird durch Preisreduktion vor allem aufgrund von Skaleneffekten erfolgen können. So steigerten beispielsweise die Solarzellenhersteller in Europa die Produktion um 39,7 % in 2001 und um 39,4 % in 2002 zum jeweiligen Vorjahr. Ähnliche Steigerungsraten sind selbst im gegenwärtig allgemeinwirtschaftlich schlechten Umfeld für die nächsten Jahre zu erwarten [SCH03a]. Aktuelle Prognosen lassen noch immer ein kaum gebremstes Wachstum des weltweiten PV-Marktes erwarten (Bild 16).

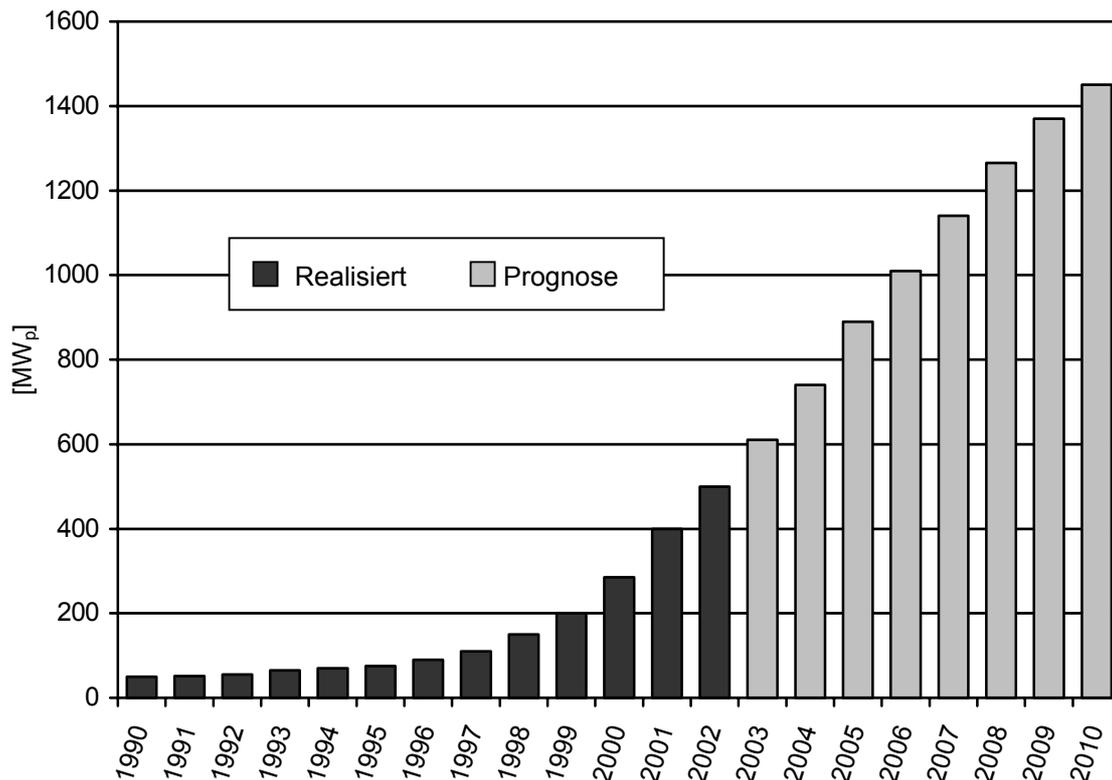


Bild 16: Prognose der Entwicklung des weltweiten PV-Marktes (MW Zellen und Module, ohne Doppelzählungen) bis 2010, nach [BUT02]

Dieses Marktwachstum bewirkt eine Zunahme der Hersteller am Markt. Es haben sich im Bereich der Produktion von PV-Modulen bereits einige große Hersteller herausgebildet. Im Bereich der Befestigungssysteme ist der Markt noch angefüllt mit vielen kleinen Anbietern, welche Befestigungssysteme in sehr unterschiedlichen Ausführungen und Qualitäten anbieten. Hier besteht ein sehr großes Potential für technische Verbesserungen dieser Befestigungssysteme.

Die Kosten für ein marktübliches netzgekoppeltes PV-System inklusive Montagekosten belaufen sich derzeit auf etwa EUR 7.000 pro installiertem kW_p bzw. 10 m² Modulfläche [BER03]. Um einen Haushalt einer Familie versorgen zu können,

werden etwa 3 kW_p benötigt. Das entspricht einem Investitionsrahmen von etwa EUR 21.000 und einer Generatorfläche von 30 m² [SUN03]. Die Kosten und Preise der einzelnen Systemkomponenten zeigt Tabelle 5, die Netto-Kostenverteilung ist in Bild 17 dargestellt.

	Durchschnittskosten in EUR/W _p
PV-Module	
Silizium	0,42
Wafer	0,95
Zelle	1,01
Modulherstellung	0,82
Vertrieb	0,86
Summe	4,06
Wechselrichter	0,29
Elektrische Verkabelung	0,37
Befestigungskomponenten und Installation	1,31
Summe	6,03
Mehrwertsteuer (16 %)	0,97
Gesamtsystem	7,00

Tabelle 5: Kosten eines netzgekoppelten PV-Standardsystems (2 kW_p), nach [BER03, SUN03, QUA03, WOY01, WOD00]

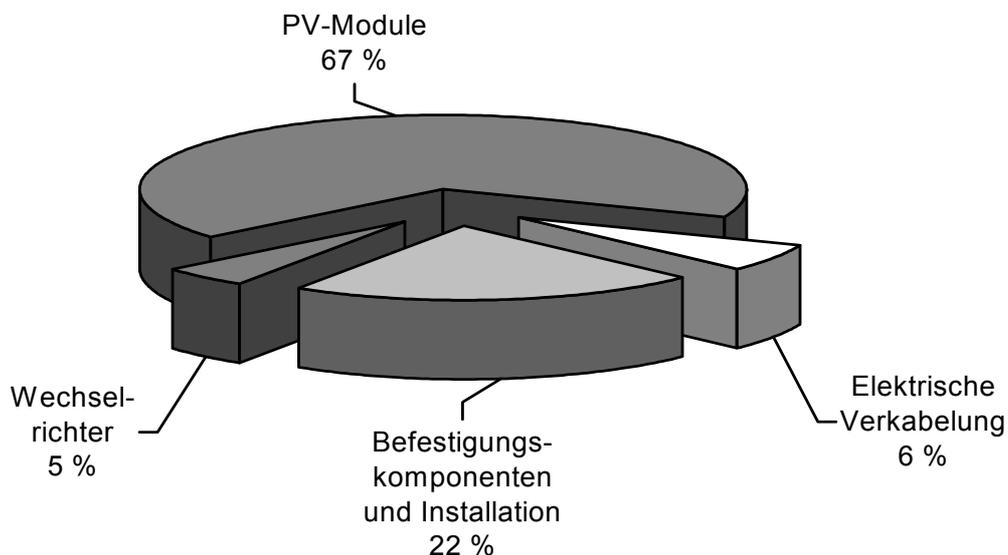


Bild 17: Kostenanteile bei einem netzgekoppelten PV-Standardsystem

Die Kosten der Installation variieren aufgrund der Vielfältigkeit und Unterschiedlichkeit der örtlichen Gegebenheiten. Die anteiligen Kosten der PV-Module neh-

men mit steigender Systemgröße zu, da bei der Herstellung, anders als bei den BOS-Komponenten, keine Größendegressionseffekte auftreten. Dennoch sinken die spezifischen Kosten des Gesamtsystems (EUR/W_p) mit steigender Anlagengröße [FUH00].

Zur Reduzierung der Kosten der Photovoltaik müssen alle kostenverursachenden Faktoren im Hinblick auf ihr Kostensenkungspotential betrachtet werden [SEL01b, SEL00c]. Bei einem Kostenanteil der elektrischen Verkabelung, der Befestigungskomponenten und der Installation von ca. 28 % an den Gesamtkosten eines PV-Systems (Bild 17), lassen sich durch Verbesserungen in diesen Bereichen erhebliche Einsparungen realisieren [FUH00].

2.1.4 Montage

Die Montage ist gemäß *DIN 8593* als „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen in der Fertigung“ definiert [DIN8593]. Ein manuelles Montagesystem besteht aus einem Montageplatz, dem Arbeitsplatz, mit einem Monteur, der an einem bestimmten Ort und mit bestimmten Betriebsmitteln den Zusammenbau bestimmter Arbeitsobjekte vornimmt. Bei der Baustellenmontage bleiben sowohl die Arbeitsplätze als auch die Arbeitsobjekte ortsfest [SPU86]. PV-Systeme werden ortsfest installiert. Es handelt sich also um eine stationäre Montage oder auch Baustellenmontage. Arbeitskräfte und Arbeitsmittel müssen beweglich sein, um zur Baustelle hin transportiert werden zu können. Für die Baustellenmontage wird eine Modulbildung angestrebt, um einzelne Teile vorab in der Innen- oder Werkmontage vorzufertigen und zu prüfen [SPU86]. Ferner wird die Montage von PV-Generatoren in die Einsatzumgebung nicht in geschlossenen Räumen durchgeführt, daher handelt es sich um eine sog. Außenmontage, welche durch sehr inhomogene Arbeitsbedingungen gekennzeichnet ist [KER96]. Die Montagearten für PV-Generatoren auf Gebäuden werden wie folgt klassifiziert (Bild 18): Indach-Montage bei Schrägdächern, Aufdach-Montage bei Schrägdächern sowie Aufdach-Montage bei Flachdächern.

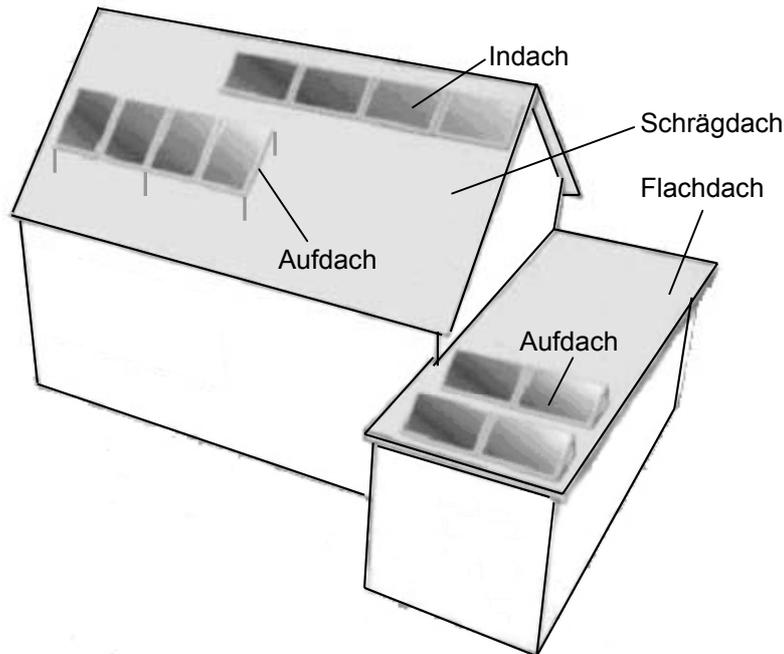


Bild 18: Montagearten von PV-Systemen an Gebäuden, nach [WÖR04]

In Tabelle 6 ist eine Schätzung des Montageaufwands bei Aufdach-PV-Generatoren dargestellt. Es wird berücksichtigt, dass der Aufwand für jedes zusätzlich installierte kW_p abnimmt. Der Anfangsaufwand, welcher die Vorbereitungen am Dach und die Vormontage des PV-Generators beinhaltet, ist bei jeder Installation vergleichbar. Der Montageaufwand bei Indach-PV-Generatoren ist stark abhängig von der Beschaffenheit der Dachhaut sowie der Höhe und Neigung des Daches. Der Aufwand variiert daher stark, ist durchschnittlich jedoch wesentlich höher als im Falle einer Aufdach- oder Flachdachlösung [SOL04a].

Installierte Leistung	Arbeitsaufwand [je kW_p]	Montagekosten [je kW_p]
1 kW_p	18~30 Std.	EUR 615~1.025
2 kW_p	15~23 Std.	EUR 515~770
3 kW_p	15~18 Std.	EUR 515~615
4 kW_p	15 Std.	EUR 515

Tabelle 6: Montageaufwand bei Aufdach-PV-Generatoren, nach [SOL04a]

Gerade im Falle einer schwer zugänglichen Baustelle bzw. eines Montageortes ist der montagegerechten Gestaltung sehr große Bedeutung beizumessen. Die Installation von PV-Generatoren auf dem Dach stellt allein aufgrund der Höhe des Arbeitsortes eine Montage an einem nur erschwert zugänglichen Ort dar [BET02]. Hinzu kommt für den Monteur bei Schrägdächern ein unsicherer Stand. Die erhöhten Anforderungen an die Aufmerksamkeit des Monteurs bei Arbeiten auf dem

Dach gehen zu Lasten der Fähigkeiten bei der Montagetätigkeit. Ein Monteur wird komplexe Tätigkeiten an einem nur schwer zugänglichen Montageort weniger schnell und gründlich erledigen, als an einem eingerichteten Montageplatz in der Innenmontage. Folglich sind die Montagetätigkeiten möglichst einfach zu gestalten [SPU86, MYR85].

2.2 Aufbau von Befestigungssystemen

Im Sinne dieser Arbeit sind alle Elemente, welche Aufgaben zur Befestigung und elektrischen Verschaltung von PV-Modulen in einem PV-Generator übernehmen, dabei aber nicht Teil des herkömmlichen, ursprünglichen Installationsobjektes oder des PV-Moduls sind, Bestandteile des Befestigungssystems. Der Aufbau von Befestigungssystemen ist sehr stark vom Installationsort abhängig [FIS98]. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, Systeme geordnet nach ihrem Installationsort in Gruppen zusammenzufassen (Bild 19). Innerhalb dieser Gruppen können ähnliche Lösungen gesucht werden.

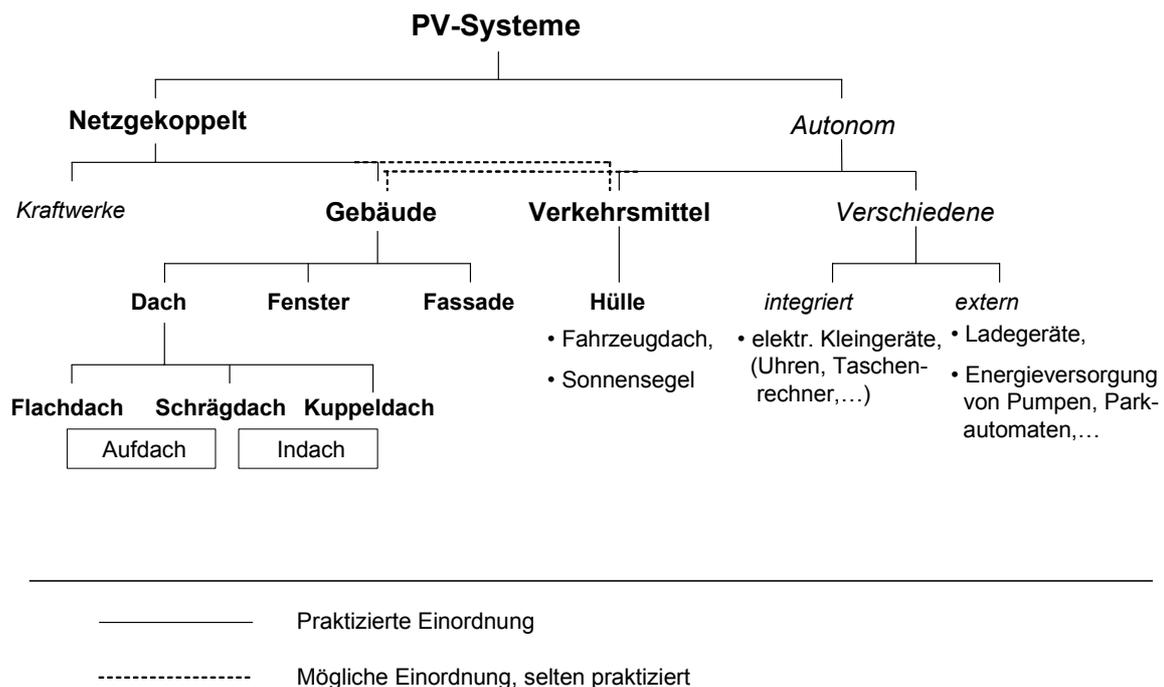


Bild 19: Installationsorte von PV-Systemen

Die im Bild 19 hervorgehobenen Installationsorte finden in der Praxis die häufigste Anwendung, da in den industriell hoch entwickelten Ländern Gebäude und Fahrzeuge die größte für die Photovoltaik nutzbare Fläche zur Verfügung stellen und auf diese Weise die elektrische Energie verbrauchernah bereitgestellt werden kann [REX02]. Aufgrund des größten Marktanteils (Bild 11) und des größten Po-

tentials für eine flächendeckende Energieversorgung in der Zukunft konzentrieren sich die weiteren Betrachtungen auf die Dächer von Gebäuden.

PV-Generatoren können auf dem Dach montiert oder in das Dach integriert werden. Verschiedene Funktionalitäten wie bspw. Wetterschutz, Wärme- und Schalldämmung, Abschattung und Stromerzeugung lassen sich dabei in die Gebäudehülle integrieren, so dass nicht nur funktionale Komponenten substituiert werden, sondern auch die Primärenergiebilanz des Gebäudes verbessert oder sogar ausgeglichen wird [GAB02b, CHE98]. Ferner ist bei der photovoltaischen Stromerzeugung an Gebäuden vorteilhaft, dass keine Verteilungsverluste auftreten, da der Strom dort erzeugt wird, wo er verbraucht wird [BIR02].

2.2.1 Aufdach

Bei der Aufdach-Montage von PV-Generatoren werden PV-Module mittels des Befestigungssystems etwa 50 bis 150 mm über der vorhandenen Dacheindeckung eines Schräg- oder Kuppeldachs (Bild 20) oder auf einem Flachdach (Bild 21) installiert. Zwischen den PV-Modulen und dem Dach verbleibt ein Abstand [SIE03a]. Eine ausreichende Hinterlüftung bzw. Wärmeabfuhr der PV-Module wird durch diesen Abstand ermöglicht. Auf- bzw. Abwinde können sich hier aber fangen und Sogkräfte erzeugen, die das Befestigungssystem und den Dachstuhl zusätzlich belasten. Des weiteren führt das zusätzliche Gewicht zu einer erhöhten Belastung der Dachkonstruktion. Die Dachfunktion, Abdichtung gegen Witterungseinflüsse und thermische Isolation des Gebäudes, wird weiterhin von der bestehenden Dacheindeckung erfüllt. Das Befestigungssystem schafft eine Verbindung mit der Eindeckung oder durchdringt diese an einer begrenzten Anzahl von Stellen, um eine Verbindung zum Dachstuhl herzustellen.



Bild 20: Aufdachmontierter PV-Generator auf einem Schrägdach

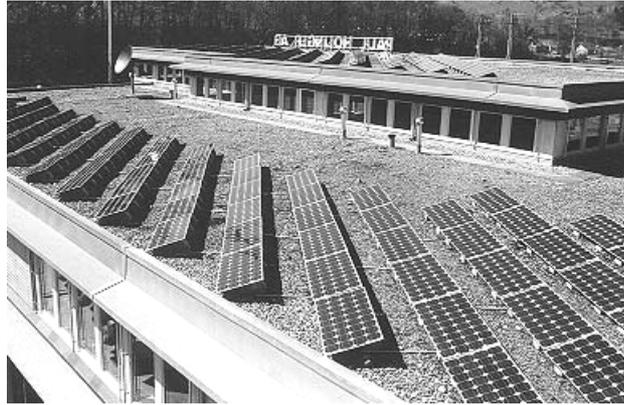


Bild 21: Aufdachmontierter PV-Generator auf einem Flachdach

Bei den Flachdachbefestigungen handelt es sich um Aufständereien, deren Verbindungssystematik mit dem Dach meist auf hohem Eigengewicht beruht. Mit geeigneten Gestellen können die für Schräg- oder Kuppeldächer verwendeten Befestigungssysteme auch zur Flachdachmontage verwendet werden. Die Fixierung der Module erfolgt dann in gleicher Weise wie bei der ursprünglichen Montageart. **Bild 22** zeigt eine solche Stütze, die die ursprünglich zur Montage auf Dachhaken konstruierten Profile trägt. Insbesondere für kies- und erdbedeckte Flachdächer werden auch Wannens angeboten, an denen PV-Module verschraubt werden können. Es erfolgt keine formschlüssige Verbindung mit der Dachhaut. Die Wannens werden nur mittels der vorhandenen Kies- oder Erdschicht beschwert (**Bild 23**).

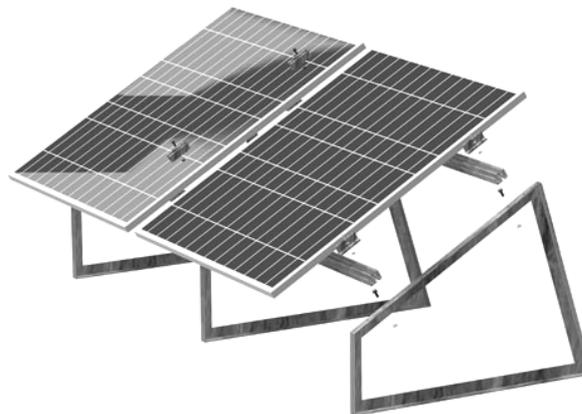


Bild 22: Flachdachbefestigung mittels Aluminiumgestell

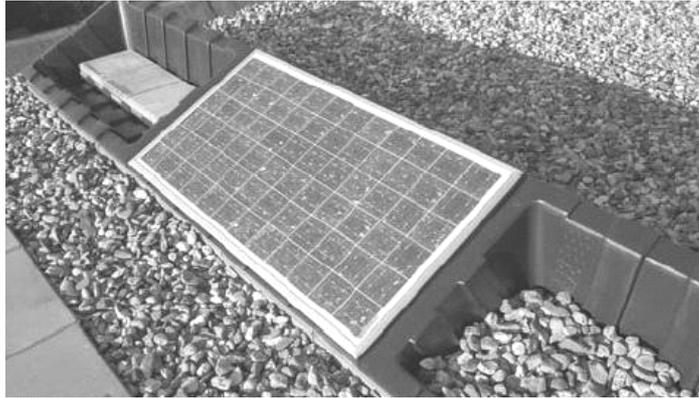


Bild 23: Flachdachbefestigung mittels Wanne

Bei der Aufdach-Montage hat sich das sog. Trägerprofilssystem am Markt durchgesetzt. Gerahmte PV-Module werden auf Trägerprofile montiert, die vorher punktuell an der Dachkonstruktion befestigt werden. Trägerprofile werden je nach Anordnung als Quer- oder Längsträger bezeichnet. Senkrecht zum Dachfirst verlaufende Profile heißen Längsträger (Bild 24), parallel verlaufende Profile werden als Querträger bezeichnet (Bild 25). Die häufigste Anwendung finden Querträger, auf denen rechteckige Module hochkant, d.h. mit der längeren Seite senkrecht zum First, montiert werden. Bei der Montage von kleineren Modulen, die nicht als geschlossene Fläche, sondern vereinzelt und quer auf dem Dach angeordnet werden, werden bevorzugt Längsträger angewendet.

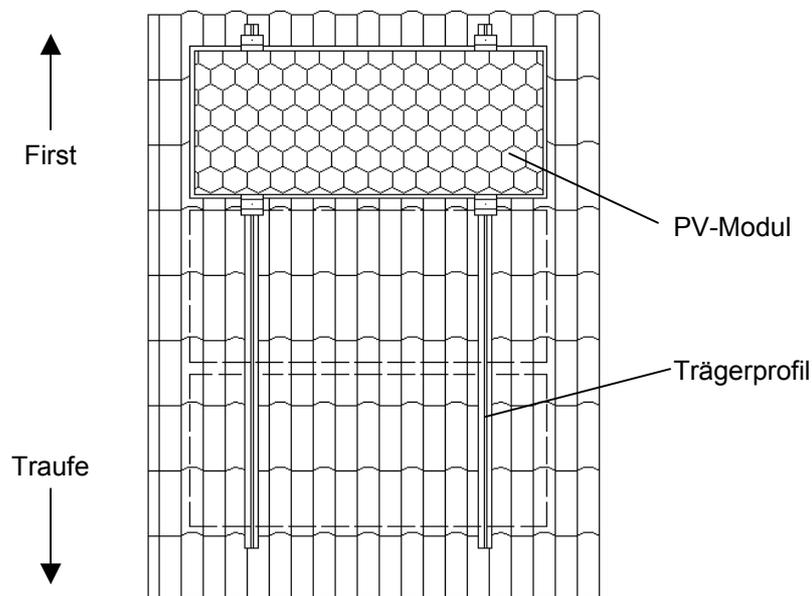


Bild 24: Längsträger

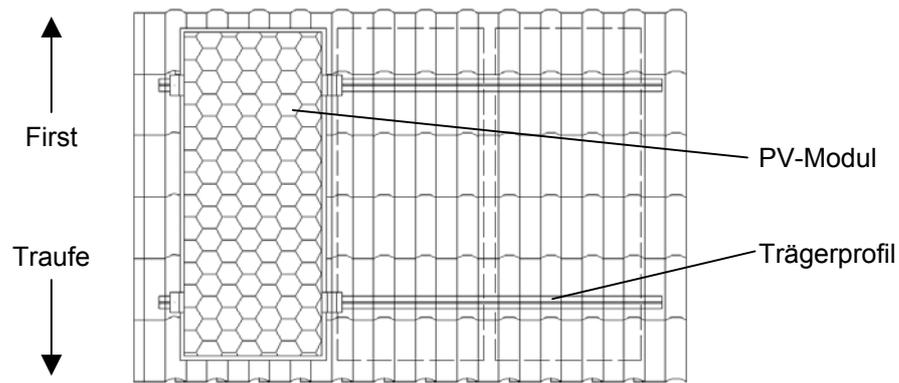


Bild 25: Querträger

2.2.1.1 Dachanbindung

Zur Verbindung von Trägerprofilen mit dem Dachstuhl (**Bild 26**) werden je nach Dachart unterschiedliche Konstruktionselemente eingesetzt. Zur Montage an Ziegeldächern haben sich zwei Techniken durchgesetzt: Der Dachhaken und die weniger verbreitete standardisierte Ziegelschnittstelle.

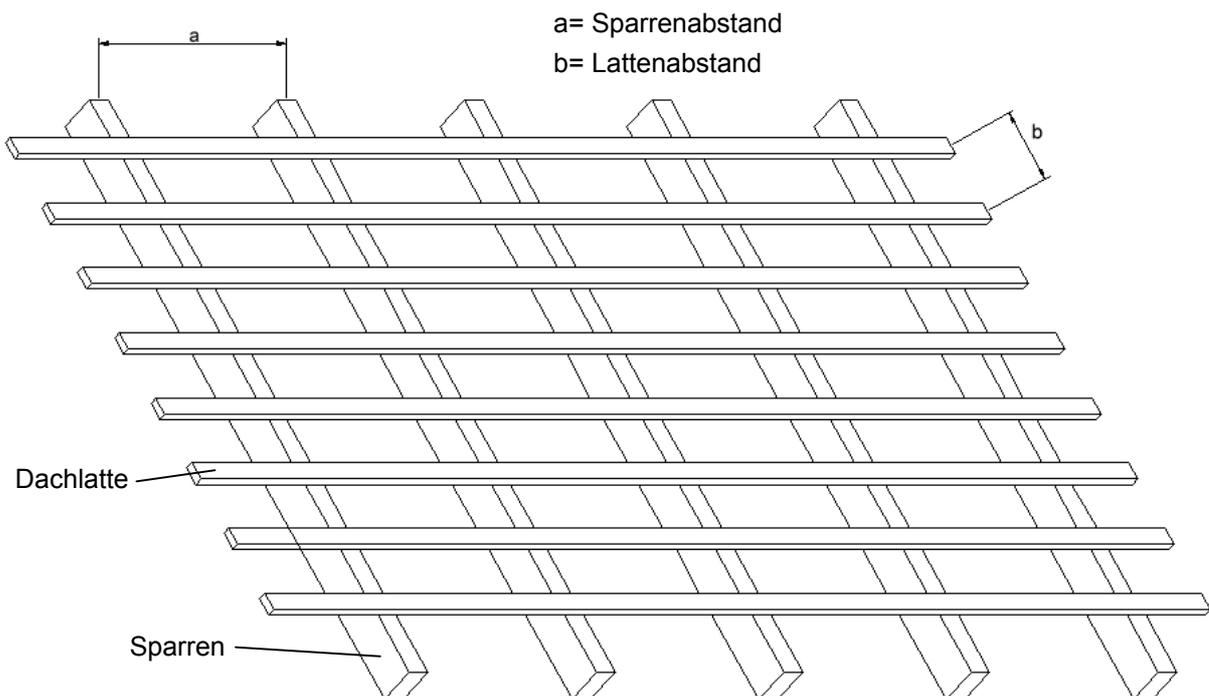


Bild 26: Dachstuhl

Der Dachhaken stellt die Verbindung zwischen Dachstuhl und den Komponenten des Befestigungssystems her. Er wird zwischen die Dachziegel oder -pfannen eingelegt und mit der darunter liegenden Dachkonstruktion verbunden. Zur Montage muss das Dach stellenweise aufgedeckt und ein Durchführungskanal durch

die sich zur Abdichtung überlappenden Dachelemente geschlagen oder gefräst werden. Dachhaken können entweder an den Dachlatten (Bild 27) oder an den Sparren (Bild 28, Bild 29) montiert werden [LAU02].

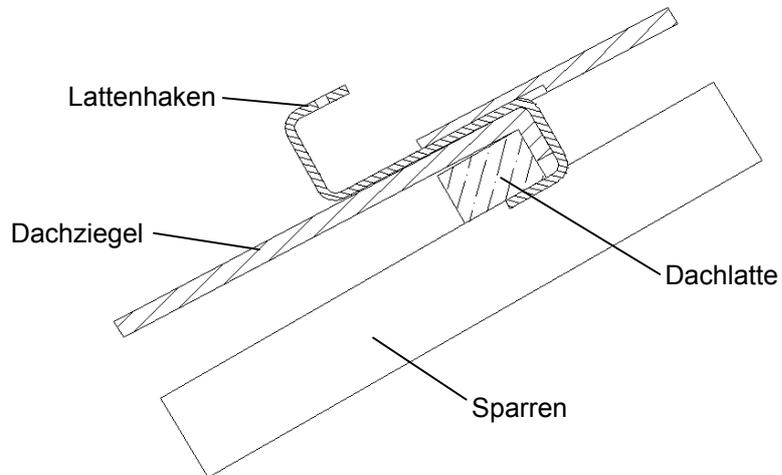


Bild 27: Prinzipzeichnung eines Lattenhakens

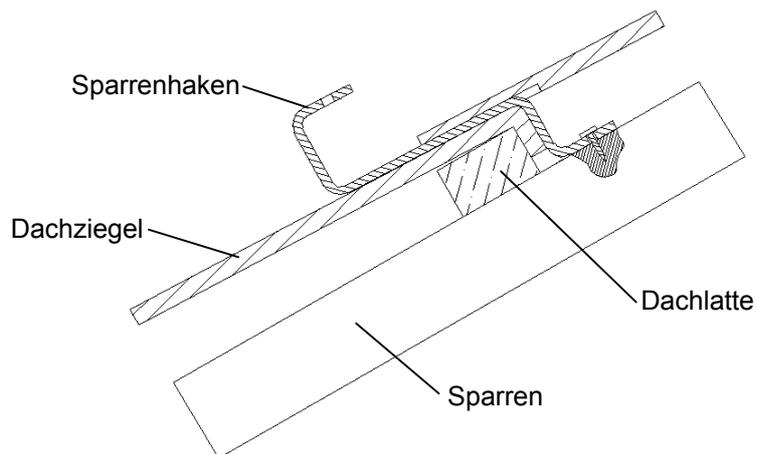


Bild 28: Prinzipzeichnung eines Sparrenhakens



Bild 29: Beispiel eines Sparrenhakens [OSM04]

Bei der standardisierten Ziegelschnittstelle werden partiell Dachziegel durch einen Kunststoffziegel ersetzt, welcher ein Aufnahmesystem für die Trägerprofile besitzt (Bild 30, Bild 31). Die Dachhaut wird nicht durchdrungen. Da die Schnittstelle jedoch nur durch ihr Eigengewicht auf dem Dachstuhl fixiert ist, können nur geringe Zuglasten aufgenommen werden.

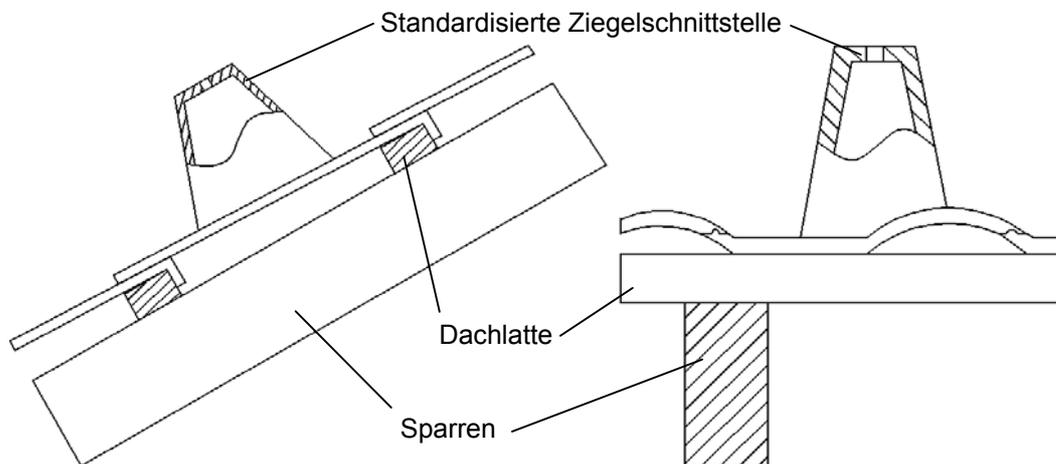


Bild 30: Prinzipzeichnung einer standardisierten Ziegelschnittstelle



Bild 31: Beispiel einer standardisierten Ziegelschnittstelle [LAF04]

Bei Welldächern wird ausschließlich die sog. Stockschraube als Verbindungselement zum Dachstuhl eingesetzt (Bild 32, Bild 33). Zur Montage wird die Wellplatte über einem Sparren an einer Hochwelle durchbohrt und die Stockschraube mit dem Holzgewinde an ihrem unteren Ende in den Sparren eingeschraubt. Die Durchdringungsstelle wird mit einer Gummidichtung mit Innengewinde, die auf das obere metrische Gewinde der Stockschraube aufgedreht wird, gedichtet. Zur Auf-

nahme des Trägerprofils wird mittels zweier gekonterter Sechskantmuttern ein Verbindungsblech mit Bohrung im gewünschten Abstand zur Wellplatte montiert.

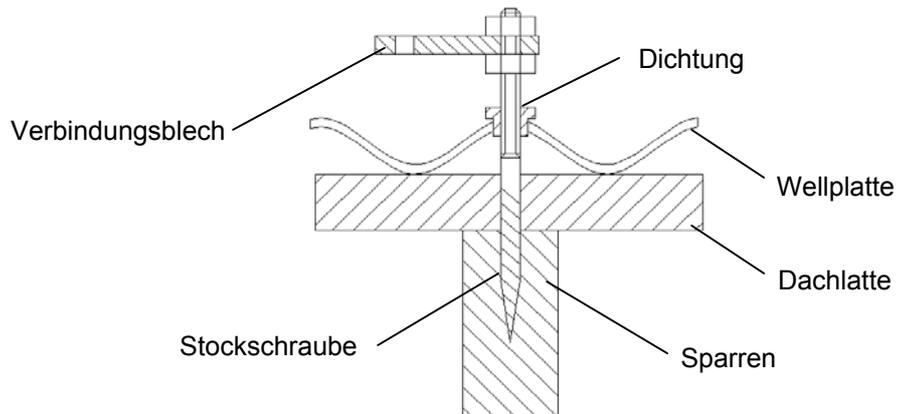


Bild 32: Prinzipzeichnung einer Stockschraube

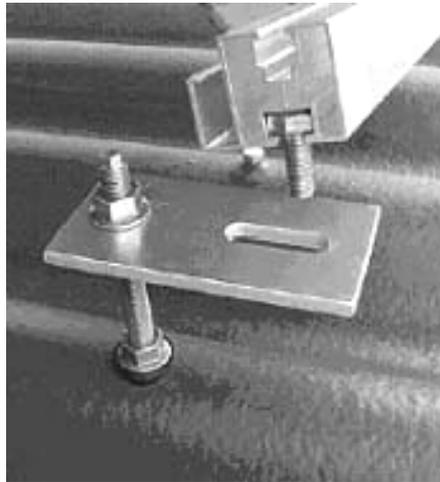


Bild 33: Beispiel einer Stockschraube [SCH04]

An Blechdächern werden Trägerprofile mittels an den Blechfalzen angebrachten Falzklemmen montiert (Bild 34, Bild 35). Hierbei wird die Dachstruktur nicht durchdrungen, sondern ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Blech und Klemme hergestellt.

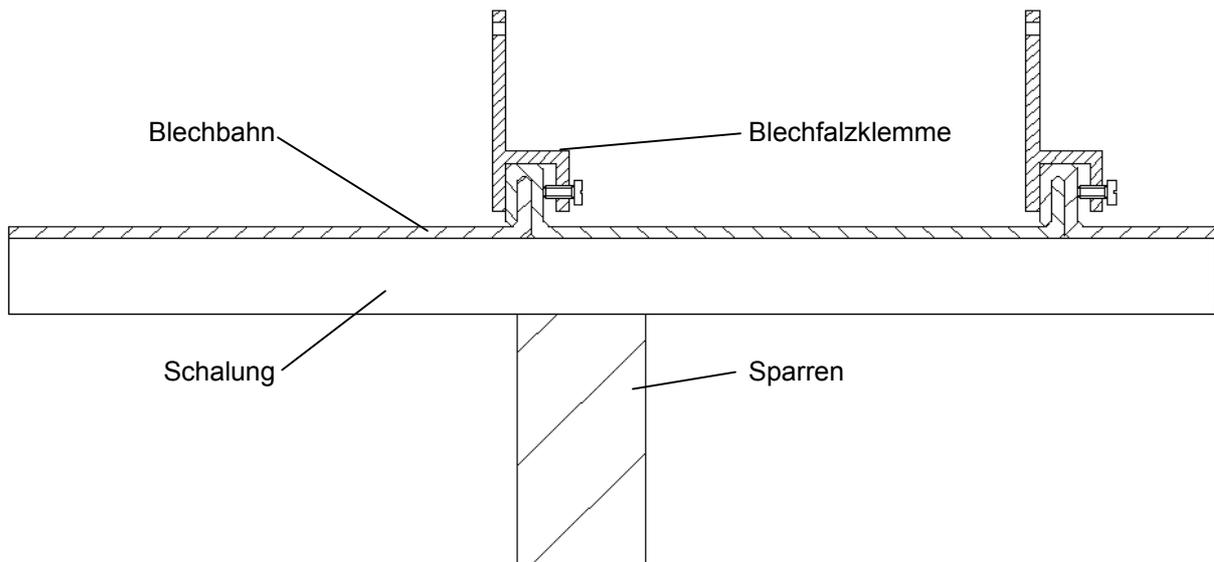


Bild 34: Prinzipzeichnung einer Blechfalzklemme

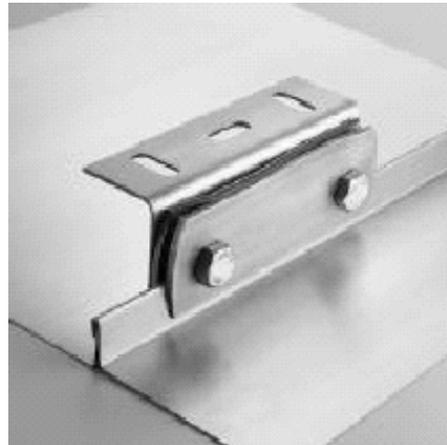


Bild 35: Beispiel einer Blechfalzklemme [SOL04a]

2.2.1.2 Trägerprofile

Die Trägerprofile bestehen aus stranggepressten Stahl- oder Aluminiumprofilen, die Schlitznuten zur Aufnahme von Hammerkopfschrauben enthalten, mittels derer sie an den genannten Verbindungselementen montiert werden (Bild 36, Bild 37 und Bild 38). Die Hammerkopfschraube kann an einer beliebigen Stelle in der Schlitznut montiert werden. Bei der Montage muss nur der Schaft zugänglich sein, da sich der Hammerkopf durch seine Geometrie in der Schlitznut nicht verdrehen kann.

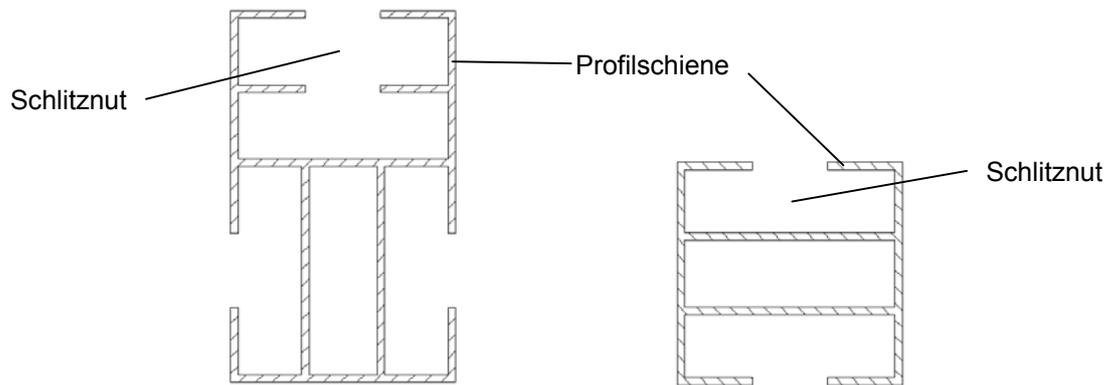


Bild 36: Trägerprofilquerschnitte

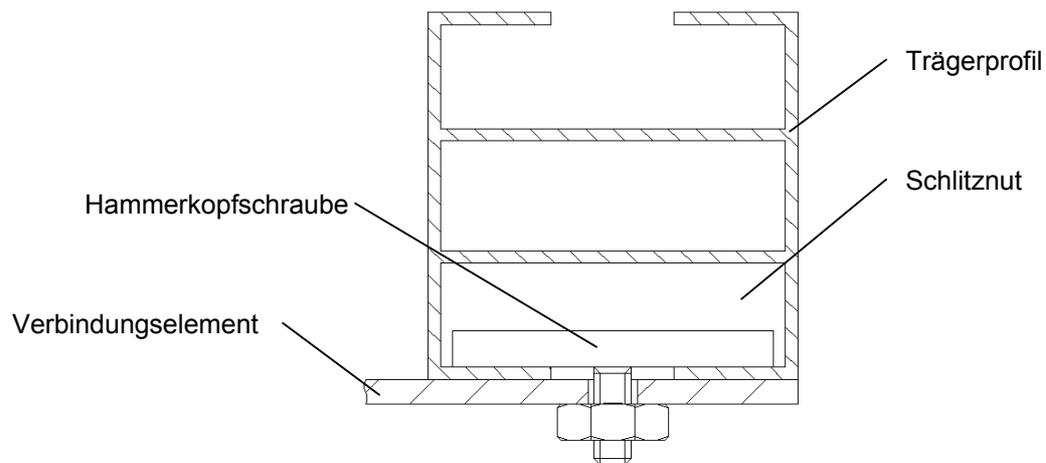


Bild 37: Hammerkopfschraubenverbindung

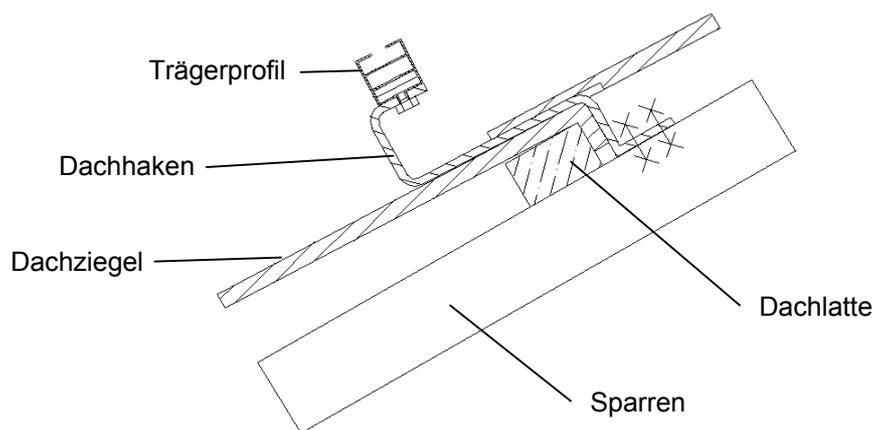


Bild 38: Befestigung eines Trägerprofils am Dachhaken mittels Hammerkopfschraube

2.2.1.3 Modulbefestigung

Niederhalter werden verwendet, um die PV-Module auf den Trägerprofilen zu befestigen. Unterschiedliche Kräfte, die an die Trägerprofile abgeleitet werden müssen, greifen an den Modulen an: Druckkräfte durch Eigengewicht, Schnee- und Windlasten und Zugkräfte durch Windlasten. Die Drucklasten teilen sich durch die Dachneigung in Komponenten senkrecht und parallel zur Dachebene auf. Der Teil senkrecht zur Dachebene wird von den Trägerprofilen unabhängig von der Art der Verbindung zwischen Modulen und Trägern aufgenommen; der parallele Anteil muss hingegen durch Kraftschluss an den Kontaktflächen aufgenommen werden. Gerahmte PV-Module liegen an vier Stellen auf zwei Trägerprofilen auf. Bei den meisten Befestigungssystemen werden sie an diesen Stellen von den Niederhaltern auf die Querträger gepresst (Bild 39). Die Normalkraft auf die Kontaktfläche muss dabei mindestens so groß sein, dass die Reibung in der Kontaktzone ausreicht, um die parallelen Anteile der Gewichtskräfte aufzunehmen. Die Aufnahme der Zuglasten senkrecht zur Dachebene wird formschlüssig durch den Umgriff des Niederhalters am Modul realisiert. Dieser Umgriff sollte flexibel auf die unterschiedlichen Rahmenhöhen anpassbar sein und darf keine unnötigen Verschattungen des PV-Moduls hervorrufen. Die Niederhalter werden mit Schrauben in Vierkantmuttern, die in Schlitznuten auf der Oberseite der Trägerprofilsschienen laufen, eingeschraubt. Der Bolzen muss bei der Montage seitlich am Modul vorbei geführt werden und von oben zugänglich sein. Der minimale Abstand zwischen zwei Modulreihen ist somit durch die Breite des Niederhalters, der den Bolzen aufnehmen muss, festgelegt. Während die Niederhalter zwischen zwei Modulreihen von beiden Seiten gleichmäßig belastet werden, wird ein Niederhalter am Rand eines Modulfelds nur von einer Seite her belastet (Bild 39, links). Der Kraftangriffspunkt liegt dort außerhalb des Bolzenzentrums, was dazu führen kann, dass der Niederhalter aufgespreizt wird und seitlich auswandert.

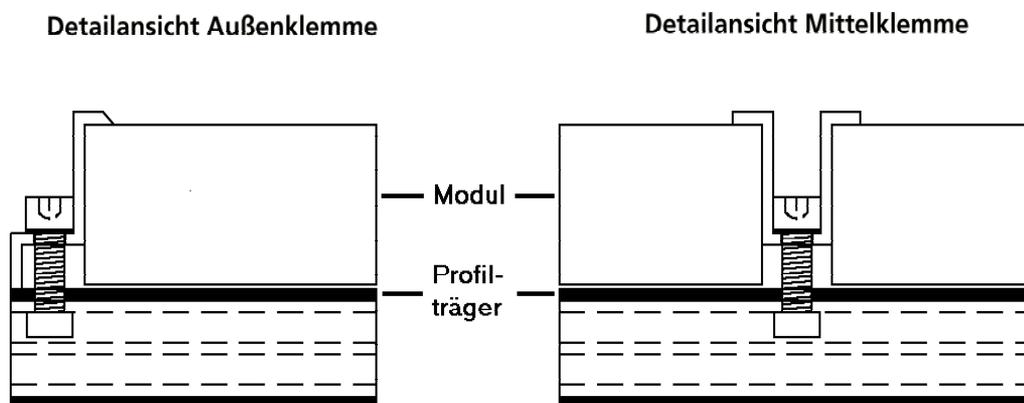


Bild 39: Niederhalter [IBC04]

2.2.1.4 Elektrische Verschaltung

Zur elektrischen Verschaltung der PV-Module werden Kabel eingesetzt. Die Kabel hängen meist frei unter den Modulen. Nur sehr wenige Befestigungssysteme sehen in den Querträgern spezielle Nuten zur Kabelführung vor. Freihängende Kabel sind dem UV-Licht ausgesetzt, können von abrutschendem Schnee beschädigt werden und sich im Wind bewegen, was zu einer Beeinträchtigung der elektrischen Verbindungspunkte oder zu einer Beschädigung der Kabel führen kann. Ferner wird neben den erwähnten funktionalen Fehlermöglichkeiten die optische Erscheinung eines PV-Generators durch für einen Betrachter sichtbar hängende Kabel entscheidend verschlechtert. Die Befestigung der Kabel mit Kabelbindern an den Trägerprofilen ist aufgrund der erschwerten und stark eingeschränkten Zugänglichkeit unter den PV-Modulen nur schlecht möglich.

2.2.2 Indach

Bei der Indach-Montage von PV-Generatoren werden die PV-Module in die vorhandene Eindeckung von Schräg- oder Kuppeldächern integriert. Die herkömmliche Dacheindeckung wird an dieser Stelle entfernt bzw. entfällt bei Neueindeckung (Bild 40), der PV-Generator übernimmt die Wetterschutz- und Dichtungsfunktion. Eine große Herausforderung stellt hierbei der regensichere Anschluss an die umgebende Dacheindeckung dar [KÄL02]. Durch die abstandsfreie Integration des PV-Generators wird der Dachstuhl und das Befestigungssystem nicht durch Sogkräfte belastet, und durch die Einsparung der herkömmlichen Eindeckung ist die Gewichtsbelastung geringer als bei einer Aufdach-Montage. Die dadurch bedingte schlechtere Hinterlüftung der PV-Module kann zu einem verringerten Stromertrag durch eine höhere Betriebstemperatur der Solarzellen führen.

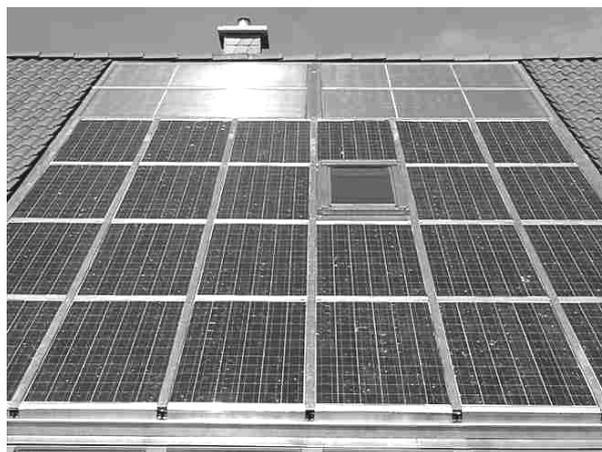


Bild 40: Indachmontierter PV-Generator

Es existierenden auf dem Markt für Indach-Befestigungssysteme drei unterschiedliche Konzepte, um die geforderte Wetterschutz- und Dichtungsfunktion zu erfüllen: Das Dichten aller entstehenden Fugen zu der umgebenden Dacheindeckung und zwischen den PV-Modulen des Generators, und, als wenig verbreitete Sonderformen, das Dichten durch eine Dichtschicht unter dem PV-Generator sowie der sog. Solardachziegel. Das Konzept des Dichtens durch eine Dichtschicht unter dem PV-Generator beruht auf dem Prinzip, die Dichtfunktion nicht vom Befestigungssystem übernehmen zu lassen, sondern von einer vorher gesondert zu montierenden Dichtschicht in der herkömmlichen Dachstruktur. Das Befestigungssystem wird danach quasi als Aufdach-System montiert. Damit die dabei erforderlichen Bohrungen in der Dichtschicht keine Auswirkungen auf die Dichtheit haben, muss jede Schraubenverbindung mit zwei Dichtringen ausgestattet werden [ECO04]. Bei dem Konzept der Solardachziegel werden sonderangefertigte PV-Module in spezielle Dachziegel integriert. Damit werden die Eigenschaften der herkömmlichen Dacheindeckung bewahrt. Dieses System ist ausschließlich für die Nachrüstung eines mit sog. Frankfurter oder Harzer Pfanne gedeckten Daches geeignet. Zusätzlich eignet sich dieses System aufgrund des gegenüber marktüblichen PV-Modulen wesentlich höheren Preises nur für sehr kleine Dachbereiche [LAF04].

Bei dem Konzept des Dichtens der Fugen kann das Dichten aller horizontalen und vertikalen Fugen zwischen den PV-Modulen durch Aluminiumschienen mit Gummiprofilen erfolgen [ESA04, OSM04, SOL04a]. Dabei müssen zusätzliche vertikale Dachlatten in Abständen, die der Breite der PV-Module entsprechen, angebracht werden, auf denen die Aluminiumschienen befestigt werden. Die horizontalen Schienen werden auf dem Rand der vertikalen befestigt. Auf die Aluminiumschienen werden formschlüssig Auflagegummis gesteckt, auf welche die PV-Module gelegt werden. Die Fuge zwischen den PV-Modulen wird durch einen zusätzlichen ankerförmigen Klemmgummi gedichtet, der ebenfalls formschlüssig in der Aluminiumschiene befestigt wird (Bild 41). Wenn die vertikalen Schienen so eingebaut werden, dass sich die PV-Module an den horizontalen Fugen überlappen und so kein Wasser eindringen kann, werden keine horizontalen Schienen benötigt. Um das Eindringen von Wasser auch bei Regen mit extrem steilem Einfallwinkel zu verhindern, werden an den horizontalen Kanten der Module zusätzlich Kanten-schutzgummis angebracht (Bild 42) [CON04, OSM04].

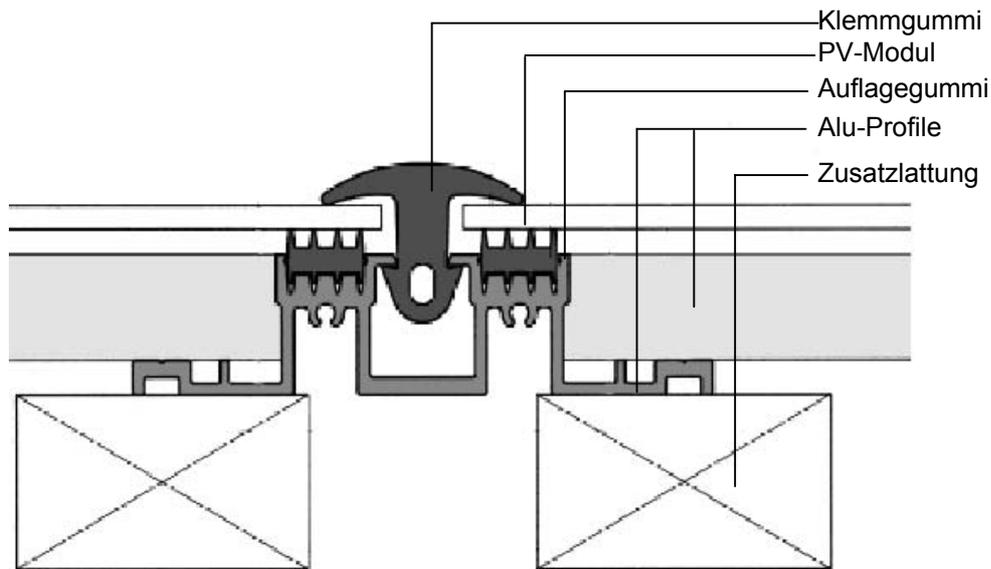


Bild 41: Gummigedichtete Fuge zwischen niveaugleichen PV-Modulen, nach [SOL04a]

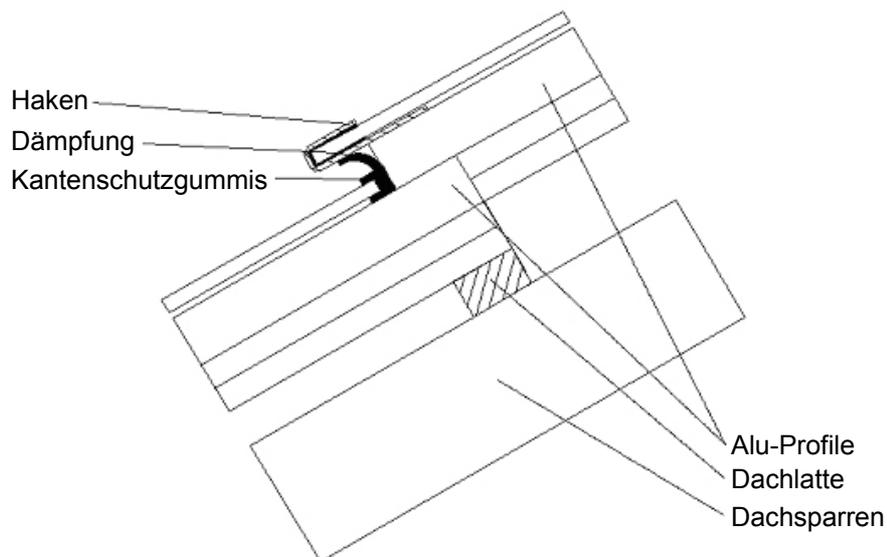


Bild 42: Gummigedichtete Fuge zwischen überlappenden PV-Modulen, nach [CON04]

Das Dichten der Fugen zu der umgebenden Dacheindeckung wird bei diesem Befestigungssystem an den Seitenrändern und am oberen Rand des PV-Generators durch Abtropfbleche aus verzinktem Stahl, reinem Zink oder Blei, am unteren Rand durch ein Anschlussblech in Verbindung mit einem Bleiblech realisiert. Dabei überlappen die Bleche ähnlich wie Ziegel mit der umgebenden Dacheindeckung und stellen so die Dichtigkeit her (Bild 43). Anstelle der Abtropfbleche kann auch eine selbstklebende, mit einem Aluminiumnetz verstärkte Folie verwendet werden. Diese ist wasserdicht, UV- und temperaturbeständig und wird in mehreren

Farben angeboten (Bild 44). Die Montage eines solchen Befestigungssystems ist aufwendig, da zusätzliche Dachlatten angebracht und die Aluminiumschienen für jede Modulgröße zugeschnitten werden müssen.



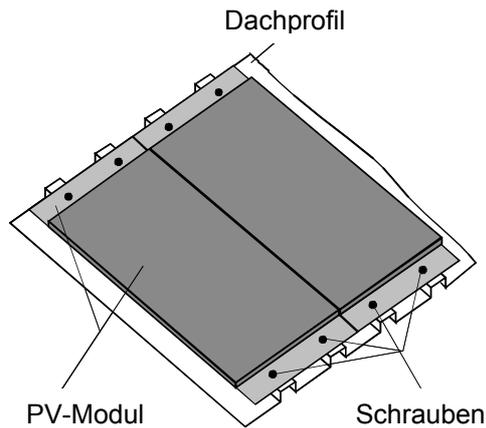
Bild 43: Blechgedichtete Fuge zwischen PV-Generator und umgebender Dacheindeckung



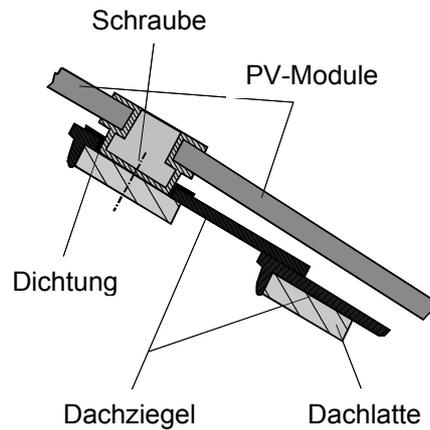
Bild 44: Dichtung des Übergangs zwischen PV-Generator und umgebender Dachhaut mittels Folie

2.2.3 Systemmerkmale

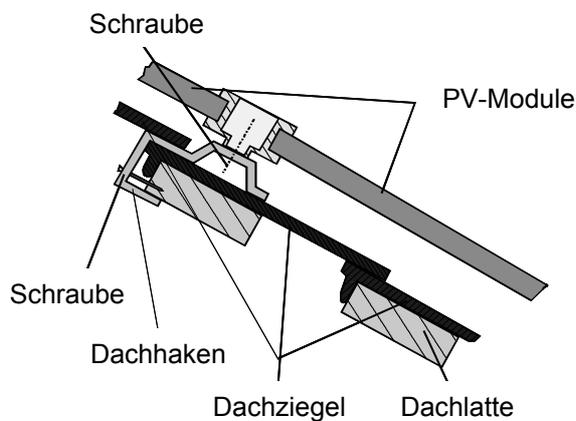
In Bild 45 sind zusammenfassend schematisch Aufdach-Befestigungen für Schräg- und Kuppeldächer mit ihren Merkmalen dargestellt. Bild 46 stellt die Aufdach-Befestigungen mit ihren Merkmalen für Flachdächer dar. Die Indach-Befestigungen für Schräg- und Kuppeldächer mit ihren Merkmalen werden in Bild 47 aufgezeigt.



- + wartungsfreundlich
- + trittfest
- + geschlossene Fläche → Design
- + individuelle Anpassbarkeit der Generatorleistung
- Abdichten der Bohrungen gegen Feuchtigkeit
- Installation bei Dacherneuerung, Gebäudeneubau sinnvoll
- schwierige Montage
- mäßige Hinterlüftung, abhängig von Dachprofilform



- + ansprechendes Design
- + gute Stabilität
- + für die häufigsten Schrägdächer geeignet
- schwieriges Austauschen von PV-Modulen
- zusätzliches Gewicht auf Dachkonstruktion
- Wind- und Sogkräfte
- Abdichten gegen Feuchtigkeit
- Beschädigung von einzelnen Dachziegeln
- nur bei nachträglicher Installation auf langlebigen Dächern sinnvoll



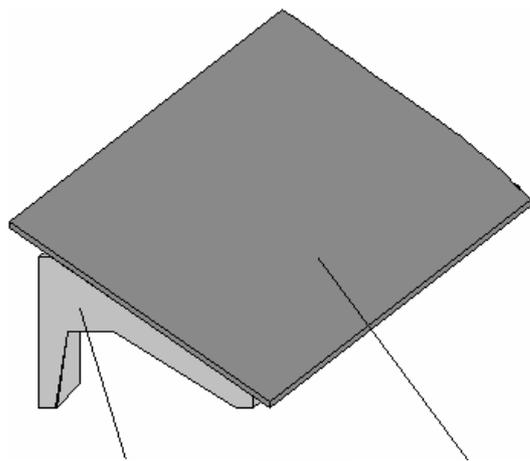
- + geschlossene Fläche → Design
- + gute Stabilität
- + für alle (Ziegel-) Schrägdächer geeignet
- + keine Beschädigung der Dachziegel
- Zugang zu Dachlatten von innen
- Feuchtigkeitsprobleme
- zusätzliches Gewicht auf Dachkonstruktion
- Wind- und Sogkräfte
- nur bei nachträglicher Installation auf langlebigen Dächern sinnvoll

oben links:
Schletter GmbH [SCH04];

oben rechts:
Donauer Solartechnik Vertriebs GmbH
[DON04];

unten:
Solarwatt [SOL04b];
Viessmann [VIE04].

Bild 45: Aufdach-Befestigungen für Schräg- und Kuppeldächer

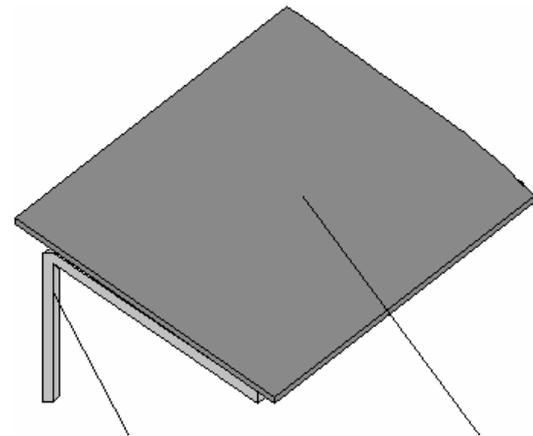


Gestell (Beton)

PV-Modul

- + einfachste Montage
- + PV-Module gut zugänglich → wartungsfreundlich
- + hohe Stabilität
- + Einstrahlungswinkel in Planungsphase optimierbar

- nur für stabile Flachdächer geeignet
- schweres, sperriges Gestell → hoher Transportaufwand
- ggf. Sicherung gegen Sturm

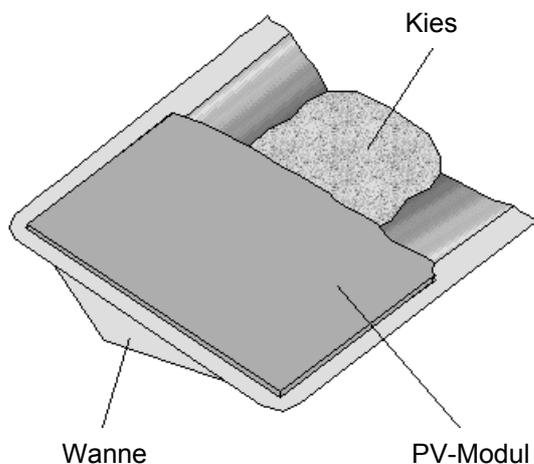


Gestell (Aluminium)

PV-Modul

- + einfache Montage
- + PV-Module gut zugänglich → wartungsfreundlich
- + gute Stabilität
- + geringes Gewicht
- + Einstrahlungswinkel in Planungsphase optimierbar

- nur für Flachdächer geeignet
- Verankerung auf dem Dach notwendig



Wanne

PV-Modul

- + einfache Montage
- + PV-Module gut zugänglich → wartungsfreundlich
- + hohe Stabilität
- + Einstrahlungswinkel in Planungsphase optimierbar

- nur für stabile Flachdächer geeignet
- sperrige Wanne → Transportaufwand
- ggf. Sicherung gegen Sturm

oben links:

Enecolo AG [HUL00];

oben rechts:

Athmosphäre GmbH [ATH04];

SolarWorld AG [SOL04a];

Schletter GmbH [SCH04];

unten:

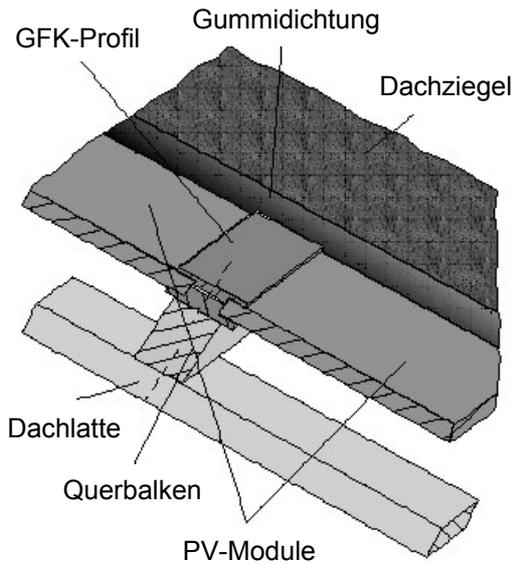
Solstis GmbH [SOL04c];

Econergy International GmbH;

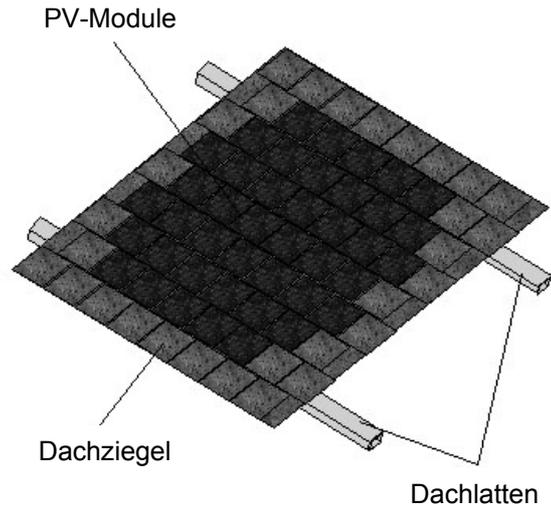
Swiss Institute of Technology

[SWI03, HUL00].

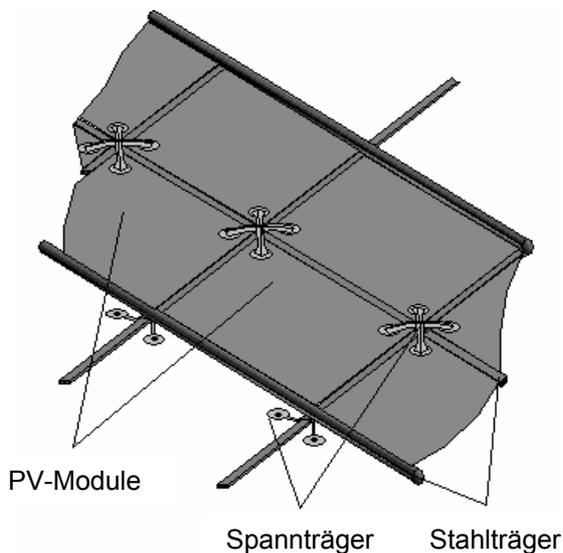
Bild 46: Aufdach-Befestigungen für Flachdächer



- + trittfest
- + geschlossene Fläche → Design
- sehr aufwendiges Abdichten gegen Feuchtigkeit
- nur bei Dacherneuerung oder Gebäudeneubau
- viele Einzelteile
- schwierige Wartung
- sehr aufwendiges Nachrüsten von Solarmodulen



- + Handhabung und Montage der PV-Module wie handelsübliche Dachziegel
- + trittfest
- + geschlossene Fläche → Design
- + individuelle Anpassung der Generatorleistung
- handelsunübliche Solarmodulabmessungen und -Solarmodulform
- hoher Verkabelungsaufwand
- aufwendiges Nachrüsten von Solarmodulen



- + gute Stabilität
- + geschlossene Fläche → Design
- + Sonnenschutzfunktion
- nur für Kuppeldächer
- nur bei Dacherneuerung oder Dachneubau
- schlecht zugänglich → schwierige Wartung
- ggf. Reinigung der PV-Module aufgrund der geringen Neigung

oben links:
 APS [HUL00];
 Schletter GmbH [SCH04]

oben rechts:
 Sunslates, Atlantis, Braas [HUL00];

unten:
 Eurosolare [HUL00].

Bild 47: Indach-Befestigungen für Schräg- und Kuppeldächer

Die Montageschritte bei Aufdach- und Indach-Befestigungssystemen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Aus der Gegenüberstellung lassen sich Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Montagereihenfolgen erkennen. Nominell gleiche Montageschritte können mit unterschiedlichem Zeitaufwand verbunden sein; so ist beispielsweise der erste Schritt bei der Indach-Montage aufwendiger als bei der Aufdach-Montage, da wesentlich mehr Dacheindeckung entfernt werden muss. Die Anteile der einzelnen Montageschritte an der Gesamtmontagezeit für ein PV-Standardsystem (2 kW_p) sind nach [BER03, SUN03, FUH00, WOY01] abgeschätzt.

Indach-Montage		Aufdach-Montage	
Montageschritt	Zeitanteil in %	Montageschritt	Zeitanteil in %
Dachpfannen abdecken	8	Dachpfannen abdecken	2
Dichtigkeit Unterdach herstellen	6		
Dichtung mit Abdeckblech oder Bleischürze oder Modulkassetten herstellen	3		
		Dachhaken anpassen	2
		Dachhaken festschrauben	4
Profilschienen ausrichten	5	Profilschienen ausrichten	6
Profilschienen verschrauben	2	Profilschienen verschrauben	3
		Dachpfannen anpassen	3
		Dachpfannen eindecken	2
PV-Module auflegen	9	PV-Module auflegen	10
Verkabelung durchführen	22	Verkabelung durchführen	25
Kabelführung sichern	9	Kabelführung sichern	10
PV-Module ausrichten	13	PV-Module ausrichten	15
Modulklemmen positionieren	11	Modulklemmen positionieren	12
Gummidichtungen anbringen	4		
Modulklemmen verschrauben	5	Modulklemmen verschrauben	6
Dachpfannen eindecken	3		
13 Montageschritte	∑ 100	13 Montageschritte	∑ 100

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Montageschritte und deren Montagezeitanteile bei Aufdach- und Indach-Befestigungssystemen

3 Handlungsbedarf

3.1 Beanspruchungen

Das Befestigungssystem eines PV-Generators ist über die Lebensdauer einer Reihe von Beanspruchungen ausgesetzt. Daraus lassen sich technologische Anforderungen ableiten, die durch den zu erfüllenden Zweck und die Einsatzumgebung gestellt werden und die sicher erfüllt werden müssen. Hierbei sind nicht nur die Beanspruchungen als solche, sondern auch deren Zusammenwirken und deren wechselndes Auftreten, z.B. in verschiedenen Jahreszeiten, zu berücksichtigen.

3.1.1 Mechanisch

Auf das Befestigungssystem wirken als mechanische Beanspruchungen:

- Windlasten, Auf- bzw. Abtrieb (Bild 48),
- Schneelast (Bild 49) sowie
- Eigengewicht der PV-Module.

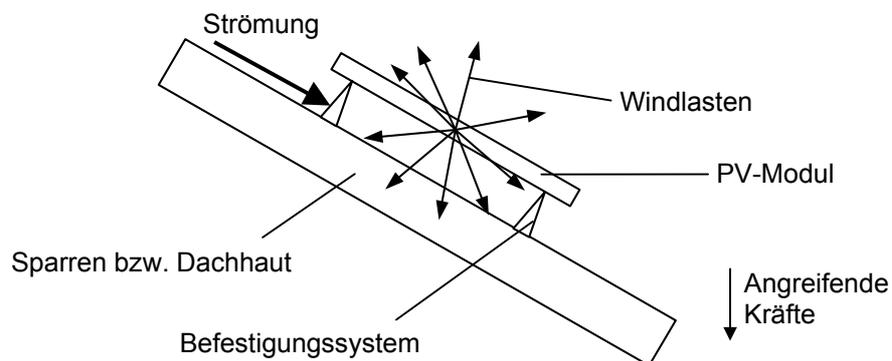


Bild 48: Dachströmung und Windlasten

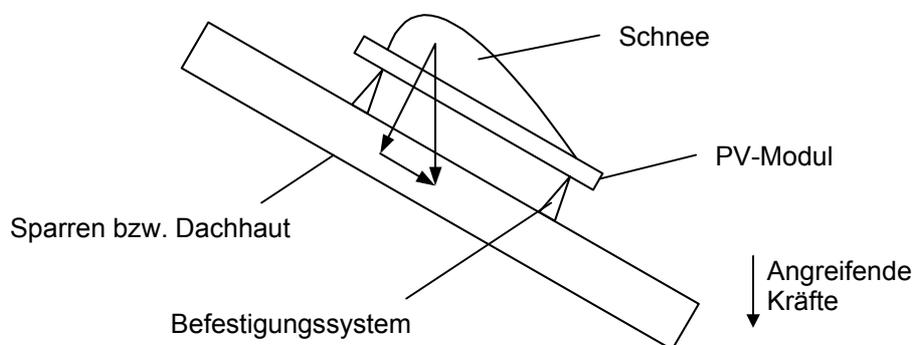


Bild 49: Schneelast

Das Befestigungssystem muss die auftretenden Lasten aufnehmen und an die tragende Dachkonstruktion, also an Dachlatten oder direkt an die Sparren (Bild 26) ableiten. Schneelasten und Eigengewicht wirken dabei als Massenkräfte in der Richtung der Erdanziehung, also als Drucklast auf den Dachstuhl. Windlasten können je nach Windrichtung, wenn die PV-Module stirnseitig angeströmt werden und sich eine Tragflächenwirkung einstellt, auch als Zuglast wirksam werden. Tritt der Wind in Form von Böen auf, kommt es zu einer periodischen Wirkung der Windlasten und damit zu einer dynamischen Beanspruchung des Befestigungssystems.

Die mechanischen Anforderungen an das Befestigungssystem sind:

- Aufnahme von Drucklasten,
- Aufnahme von Zuglasten sowie
- Dynamische Steifigkeit.

3.1.2 Thermisch

Thermische Beanspruchungen wirken durch:

- Hohe bzw. niedrige Temperaturen sowie
- große Temperaturunterschiede und -schwankungen.

PV-Systeme werden nur dort eingesetzt, wo mit einer längeren direkten Sonneneinstrahlung gerechnet werden kann. Daraus resultiert, dass das Befestigungssystem am Einsatzort im Sommer Temperaturen von bis zu $+80^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt ist. Im Winter führt die Sonneneinstrahlung nicht zu einer so starken Erwärmung, so dass der Einfluss der Umgebungstemperatur überwiegt. Man kann in gemäßigten Breiten mit Tiefsttemperaturen von -35°C am Einsatzort rechnen. Das Befestigungssystem muss also hinsichtlich der Wärmedehnung so ausgelegt werden, dass es seine Funktion innerhalb dieses Temperaturfensters erfüllt.

Die thermischen Anforderungen an das Befestigungssystem sind:

- Geringe Wärmedehnung im Temperaturbereich sowie
- Robustheit bei wechselnder Erwärmung und Abkühlung.

3.1.3 Tribologisch

Als tribologische Beanspruchungen wirken auf das Befestigungssystem:

- Reibung durch fließendes Wasser,
- Ansammlung von Verunreinigungen,
- Korrosion, Physi- bzw. Chemisorption,
- Reibungsverschleiß durch Relativbewegungen im System sowie
- UV-Strahlung durch Sonneneinstrahlung.

Durch das Befestigungssystem darf die Dichtigkeit des Daches nicht verschlechtert werden. In Abhängigkeit von der Dachneigung, der Regen- bzw. Schmelzintensität und der konstruktiven Gestaltung des Befestigungssystems stellt sich an den Schnittstellen zwischen Befestigungssystem und Dachhaut eine Strömung mit einer bestimmten Fließgeschwindigkeit ein (Bild 48). Das strömende Medium besteht hierbei in erster Linie aus Regen- bzw. Schmelzwasser, das Spuren von Verunreinigungen und Ablagerungen auf der Dachhaut und kleinere Ziegelbruchstücke enthalten kann. Bei punktförmiger Dachdurchdringung ist nicht mit einem durch diese Strömung hervorgerufenen Verschleiß zu rechnen. Zu berücksichtigen ist allerdings die Wirkung bei linienförmiger Dachdurchdringung (Bild 50). Wenn die Fügestelle zwischen Befestigungssystem und Dachhaut linienförmig in Längsrichtung verläuft und das Medium nicht seitlich abgeleitet wird, kommt es zu einer Strömung auf der gesamten Länge der Durchdringung, die zu Reibungsverschleiß und bei ungeeigneten Werkstoffen zur Zerstörung führt. Bei quer verlaufenden und punktförmigen Fügstellen ist darauf zu achten, dass das Wasser die Fügestelle möglichst ungehindert über- bzw. umströmen kann. Kommt es im Bereich der Fügestelle zu Aufstauungen, wird das Eindringen von Wasser in die Fügestelle, Reibungsverschleiß sowie Korrosion begünstigt.

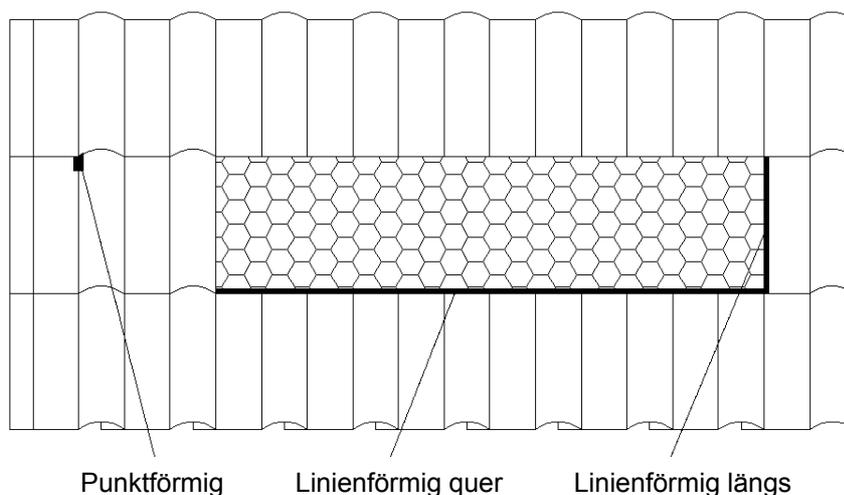


Bild 50: Dachdurchdringungen

Je nach konstruktiver Gestaltung des Befestigungssystems kann die Ansammlung von Verunreinigungen, wie z.B. Laub, Ästen und Teilen von Vogel- bzw. Insektennestern, begünstigt oder vermieden werden. Diese Verunreinigungen sammeln sich bevorzugt in schmalen Fugen mit geringer oder ohne Fließgeschwindigkeit, sowie vor Hindernissen wie beispielsweise dem Schaft eines Dachhakens an. Wasser wird durch eine Verunreinigung auf dem Dach gespeichert, dadurch wird zunächst das Eindringen von Wasser in die Dachhaut sowie Korrosion begünstigt. Ferner stellt die Verunreinigung mit ihrer Eigenschaft als nährstoffreicher Wasserspeicher eine Möglichkeit für verschiedene Pflanzen, z.B. Moose oder Gräser, dar, sich auf dieser Verunreinigung anzusiedeln. Da die Pflanze mit ihren Wurzeln aktiv durch die Fügestelle bzw. unter die Dachsteine wächst und dabei die Fügestelle ausweitet, hat dies verstärkten passiven Wassereintritt zur Folge. Aktiv wird Wasser durch die Kapillarwirkung der Wurzeln unter das Dach gefördert.

Eine weitere Form tribologischen Verschleißes kann die Reibung zwischen Befestigungssystem und Dachhaut bzw. PV-Modulen sowie zwischen einzelnen Komponenten des Befestigungssystems darstellen. Diese Reibung kann dann auftreten, wenn das Befestigungssystem keine vollkommen steife Verbindung zwischen Dachstuhl und PV-Modulen herstellt und infolgedessen Verlagerungen aufgrund der wechselnden mechanischen Lasten, insbesondere der Windlasten, auftreten. Abgesehen von der Temperaturerhöhung muss auch die Wirkung der UV-Strahlung auf die Konstruktionselemente, insbesondere deren mechanische Eigenschaften, berücksichtigt werden.

Die tribologischen Anforderungen an das Befestigungssystem sind:

- Beibehaltung der Dichtigkeit des Daches,
- behinderungsfreie Strömung im Bereich der Schnittstellen,
- Vermeidung der Ablagerung von Verunreinigungen,
- steife Konstruktion und/oder verschleißfeste Werkstoffe in der Verschleißzone,
- günstige Werkstoffpaarungen zur Vermeidung von Korrosion sowie
- physische und chemische Stabilität gegen Sorption (z.B. durch UV-Licht).

3.1.4 Elektrisch

Das Befestigungssystem muss während der Lebensdauer eine sichere elektrische Verbindung zwischen den PV-Modulen innerhalb des Generators gewährleisten. Die elektrische Verbindung muss gegen mechanische, thermische und tribologische Beanspruchungen geschützt sein [DIN0100, DIN0106, DIN50110, SCH01, DIN00].

3.2 Resultierende allgemeine Anforderungen

In Tabelle 8 sind die oben abgeleiteten allgemeinen Anforderungen zusammengefasst und mit einem Gewichtungsfaktor zwischen eins und sechs bewertet. Hierbei wird unterschieden, ob es sich bei der jeweiligen Anforderung um eine für die Funktionsfähigkeit des Befestigungssystems unabdingbare Forderung oder um einen Wunsch handelt, dessen Erfüllung die Güte der Funktion steigert.

Anforderung	Forderung/Wunsch	Gewichtung
Aufnahme von Drucklasten	F	6
Aufnahme von Zuglasten	F	6
Dynamische Steifigkeit	W	4
Geringe Wärmedehnung	W	1
Robustheit bei wechselnder Erwärmung und Abkühlung	W	3
Beibehaltung der Dichtigkeit des Daches	F	6
Behinderungsfreie Strömung im Bereich der Schnittstellen	W	4
Vermeidung der Ablagerung von Verunreinigungen	W	3
Steife Konstruktion / verschleißfeste Werkstoffe	W	2
Günstige Werkstoffpaarungen	W	2
Physische und chemische Stabilität	W	2
Sicherheit des elektrischen Anschlusses	F	6

Gewichtung: 1: hilfreich 2: wünschenswert 3: sehr wünschenswert
4: wichtig 5: sehr wichtig 6: erforderlich

Tabelle 8: Gewichtete allgemeine Anforderungen an ein montagegerechtes Befestigungssystem

3.3 Bestehende Defizite

Zur Identifikation bestehender Defizite wurde eine Unternehmensbefragung mit dem Titel „*Probleme bei der Installation von PV-Systemen*“ durchgeführt. Der dafür entwickelte Fragebogen ist unterteilt in drei Teile. Im ersten Teil werden Angaben zum Unternehmen, wie Geschäftsfelder, Mitarbeiteranzahl, Anzahl abgewickelte Aufträge, zu dessen Einordnung abgefragt. Der zweite Teil besteht aus sechs Fragen zu verwendeten PV-Modulen. Die hier erfragten Informationen dienen der Bewertung des dritten Teils. Dieser befasst sich mit den Befestigungssystemen. Erfragt werden die Hersteller der verwendeten Systeme, die Ausführungen der Systeme, aufgetretene Probleme und die Bewertung der verwendeten Systeme.

me. Auswahlkriterien, Befestigungsarten, Reparatur-, Wartungs- und Austauschhäufigkeit, Verkabelungsgestaltung, Gestaltung des elektrischen Anschlusses sowie die Einschätzung von Verbesserungspotentialen werden erfasst. Es wurden Installateure von PV-Systemen, Hersteller von PV-Modulen, Hersteller von Befestigungssystemen für PV-Generatoren, Elektroinstallateure, Architekten und Verbände ausgewählt. Der Fragebogen wurde im November 2002 an 92 Firmen aus diesen Bereichen verschickt. Bild 51 zeigt die Verteilung der Branchenzugehörigkeit.

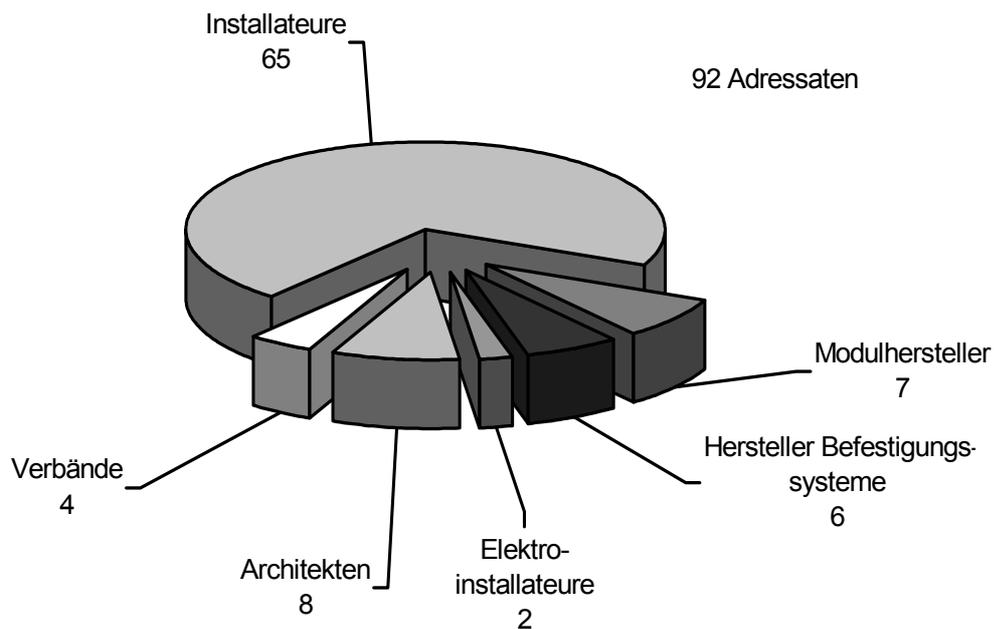


Bild 51: Anzahl der befragten Firmen nach Branchenzugehörigkeit

Bis zum Abschluss der Befragung im Januar 2003 wurden 16 Fragebögen beantwortet. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 17 %. Dabei antworteten 13 der angeschriebenen Installateure von PV-Systemen (20 %), ein Hersteller von PV-Modulen (14 %) sowie zwei Hersteller von Befestigungssystemen (33 %). Von den zwei Elektroinstallateuren, den acht Architekten und den vier Verbänden gab es keine qualifizierten Rückläufe. Die Rücklaufquote der 78 befragten Unternehmen aus den Sparten Installation, Modulherstellung und Herstellung von Befestigungssystemen beträgt somit 20,5 %. Von den Unternehmen gaben 84 % die Photovoltaik als Hauptgeschäft an. Bild 52 stellt die Einschätzung des Wachstumspotentials des PV-Markts durch die befragten Firmen dar.

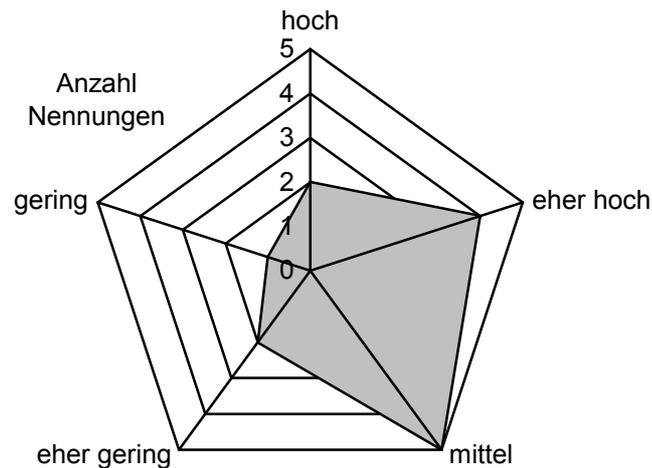


Bild 52: Einschätzung des Wachstumspotentials des PV-Marktes

Durchgeführt werden hauptsächlich Aufdach-Installationen auf dem Schrägdach gefolgt von denen auf dem Flachdach. Die Anzahl der Indach-Installationen beträgt nur etwa ein Fünftel der Summe der Aufdach-Installationen (Bild 53). Dies entspricht der Marktsituation und lässt darauf schließen, dass die Befragung den Markt gut widerspiegelt.

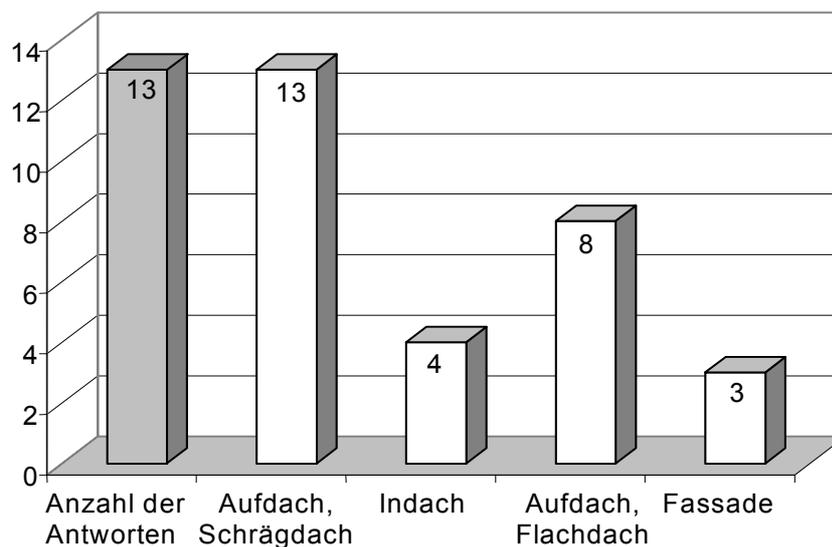


Bild 53: Installationsarten

Von den Unternehmen werden überwiegend gerahmte PV-Module verwendet (Bild 54). Entsprechend beziehen sich die angegebenen Probleme auf die klassischen PV-Module. Vor allem der elektrische Anschluss bereitete Probleme und wurde als

zu kompliziert beschrieben (Bild 55). Die Verbindung mittels loser Kabel und die schlechte Zugänglichkeit wurden hier als wichtigste Ursachen benannt.

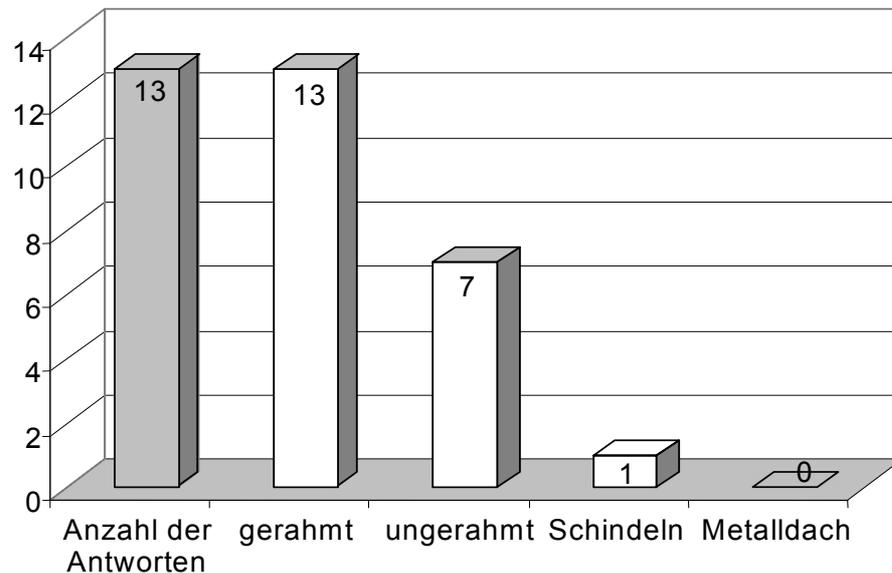


Bild 54: Verwendete PV-Modularten

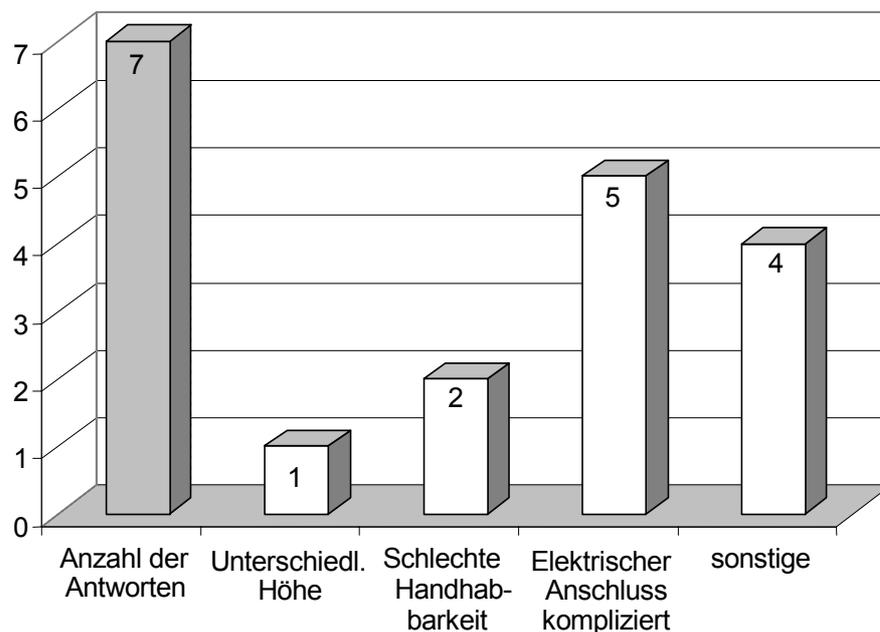


Bild 55: Probleme mit PV-Modulen

Im Vergleich der Märkte von PV-Modulen und Befestigungssystemen fällt auf, dass der Markt für Module ein bereits etablierter Markt ist und sich Marktführer schon ausgebildet haben. Dagegen sind bei der Frage nach den Herstellern der verwendeten Befestigungssysteme Mehrfachnennungen kaum aufgetreten. Der Markt für Befestigungssysteme wird noch von sehr vielen verschiedenen Herstel-

lern mit mindestens ebenso vielen Systemen bedient. 64,3 % der befragten Unternehmen sehen Verbesserungspotentiale bei den Befestigungssystemen. Probleme bei der Montage werden in den Bereichen Montagezeit, Schnittstelle Dach/Modul und durch fehlende Baukastenstruktur genannt. Gewünscht werden Befestigungssysteme, die einfacher bzw. weniger aufwendig und schneller zu installieren sind.

Folgende allgemeine Maßnahmen sollten folglich zu einer montagegerechteren Gestaltung von Befestigungssystemen von PV-Generatoren umgesetzt werden:

- Verringerung der Teileanzahl, z.B. durch ein Integralbauteil, um Arbeitsgänge zu vermeiden,
- Vermeidung biegeschlaffer Bauteile (z.B. Kabel),
- Reduzierung der erforderlichen Anzahl von Fügerichtungen,
- Standardisierung von Bauteilschnittstellen,
- Ergänzung von Positionier- und Justierhilfen sowie
- Begrenzung der Auswirkungen von Produktvarianten auf wenige Baugruppen.

In der Folge werden die Anforderungen an Befestigungssysteme spezifiziert und eine Bewertungsmethodik entwickelt und angewandt, um Defizite bestehender Systeme konkret zu identifizieren. Aus den Ergebnissen werden Gestaltungshinweise für ein montagegerechtes Befestigungssystem für PV-Generatoren abgeleitet, auf denen basierend im Anschluss ein solches System konzeptionell und konstruktiv gestaltet wird.

4 Bewertungsmethodik

4.1 Erstellung

Für die Bewertung der Anforderungsgerechtigkeit bestehender Befestigungssysteme ist eine vollständige Beschreibung aller Anforderungen erforderlich. Da die Erfüllung oder Nichterfüllung einer Anforderung sich in ihrer Auswirkung in mehreren Bereichen widerspiegeln kann, sind für eine eindeutige Bewertung diese Abhängigkeiten zu beachten. Aus diesem Grund werden zuerst Quellen für Anforderungen in Anlehnung an die Begriffe der Technikbewertung nach *VDI 3780* [VDI3780] klassifiziert und Bereiche, auf die diese wirken können, definiert. Anschließend werden diese kombiniert, die Abhängigkeiten identifiziert und daraus eine eineindeutige, gewichtete Prüfliste erstellt.

4.1.1 Anforderungsquellen

Anforderungen an das Befestigungssystem können von verschiedenen Quellen ausgehen. Die Anforderungen aus Anwendersicht werden hier als sog. Kernforderungen zusammengefasst: Das PV-System muss den Grundsätzen der Wirtschaftlichkeit folgen, da es der Erzielung von Erträgen aus der Stromerzeugung bzw. der Einsparung des Fremdbezugs von Elektrizität dient. Weiterhin muss das System die erforderliche Funktionsfähigkeit besitzen und den Anforderungen der Sicherheit genügen. Diese drei Quellen sind nicht überschneidungsfrei und können sich gegenseitig beeinflussen. Die Kernforderungen sind umgeben von äußeren Einflüssen. Diese setzen sich aus Normen, Gesetzen und der Umweltqualität zusammen. Aus diesen resultieren wiederum Anforderungen, die ebenfalls bei einem PV-System und seinem Befestigungssystem berücksichtigt werden müssen (Bild 56).

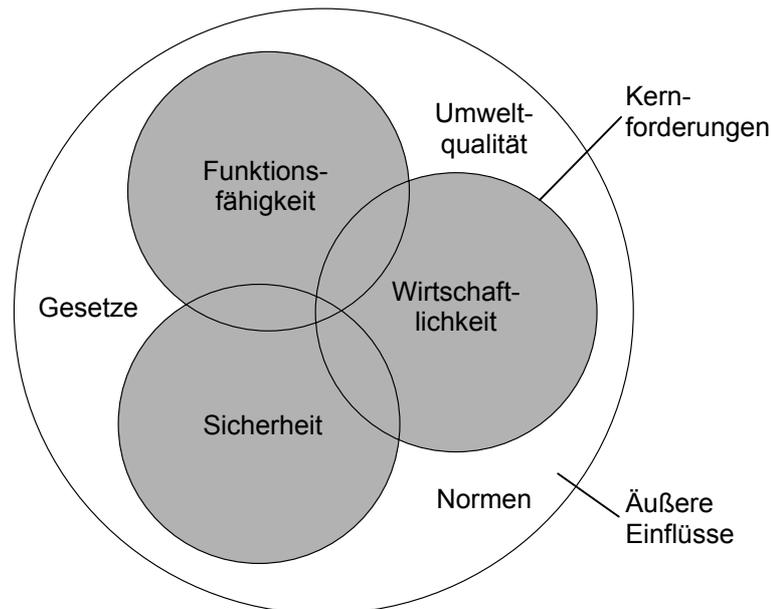


Bild 56: Anforderungsquellen

Bei der Klassifikation der Anforderungen wurden diese nach ihrer Bindungswirkung zusätzlich in *Kann-* oder *Muss-*Anforderungen unterschieden. So wird beispielsweise eine Anforderung als *Muss-*Anforderung bezeichnet, sofern die Nichterfüllung dieser Anforderung einer verbindlichen gesetzlichen Regelung widerspricht.

Kernforderung Sicherheit:

Jedes Stromerzeugungssystem in der elektrischen Größenordnung sowohl üblicher Netz gekoppelter PV-Systeme als auch der meisten Inselsysteme besitzt ein Gefährdungspotential [HMU00]. Viele Vorschriften, so u.a. von den Berufsgenossenschaften, beschäftigen sich daher mit Aspekten der Sicherheit und sind unbedingt zu befolgen. Die Sicherheit ist dabei sowohl *während der Montage* als auch *während des Betriebs* zu gewährleisten.

Kernforderung Funktionsfähigkeit:

Aus der Literatur lassen sich Funktionsfähigkeitsanforderungen bezüglich *Zuverlässigkeit und Haltbarkeit, Wartungszugänglichkeit, Übereinstimmung mit den Kundenwünschen* sowie *Schnittstellengestaltung* des Systems extrahieren.

Kernforderung Wirtschaftlichkeit:

Zum einen ergeben sich aus Zielen bezüglich der *Ertragssteigerung* Anforderungen an das PV-System. Zum anderen entspringen Anforderungen an die Montage, wie z.B. Arbeitszeitverringerung und Senkung der Materialkosten, dem Wunsch nach *Kostensenkung*.

Äußere Einflüsse:

Gesetze und gesetzesähnliche *Richtlinien und Vorschriften* mit Zwangscharakter können in verschiedenen Anforderungsbereichen wirken. Wichtig sind hier Regelungen zur Gewerketrennung, die insbesondere den Prozess der Montage betreffen. Ebenfalls gehen aus dieser Quelle Anforderungen aus den allgemeinen Geschäftsgrundlagen, wie z.B. Gewährleistung für verkaufte Produkte, hervor.

Nicht nur Bauteile, auch Prozesse können von Normungsorganisationen wie DIN oder ISO genormt werden. Obwohl diese *Normen* keine Verpflichtung sind, so stellen sie doch grundsätzlich ausgereifte Lösungen dar und werden häufig als bindende Vertragsgrundlage gewählt.

PV-Systeme werden im Außenbereich montiert und sind daher der natürlichen Umwelt ausgesetzt und treten somit in Wechselwirkung mit der *Umweltqualität*. Diese stellt durch ihre Ausprägungen, wie beispielsweise der Witterung, die Quelle von Anforderungen dar. Aufgrund der Lebenserwartungen der Systeme von über 25 Jahren müssen dabei auch langsam wirkende Einflüsse beachtet werden.

4.1.2 Anforderungsbereiche

Die Anforderungen aus den Quellen der Kernforderungen und der äußeren Einflüsse wirken sich auf unterschiedliche Bereiche der Systemgestaltung aus. So können Anforderungen durch konstruktive Maßnahmen erfüllt werden, die sich den nachstehend aufgeführten Bereichen zuordnen lassen. Alle Anforderungen in den jeweiligen Bereichen müssen durch ein neu- und/oder umkonstruiertes PV-System und sein Befestigungssystem erfüllt werden.

Geometrie:

Durch den geometrischen Aufbau eines Befestigungssystems wird die spätere Montagegerechtheit in der Einsatzumgebung entscheidend geprägt. Viele Anforderungen aus den Quellen wirken in diesem Bereich und müssen entsprechend beachtet werden.

Material:

Die Erfüllung der Anforderungen im Bereich der Materialauswahl beeinflussen insbesondere die Lebenserwartung und den Wartungsbedarf des Befestigungssystems. Beispielsweise können schnell korrodierende Komponenten, ein häufiges Ausbessern am System und kurze Wartungsintervalle hohe Kosten und/oder Risiken für die aktiven Komponenten des PV-Systems verursachen.

Flexibilität:

PV-Module werden gegenwärtig mit Leistungsgarantien für 25 Jahre und mehr

ausgeliefert. Häufig ist jedoch eine sichere Planung des Bedarfs und der Verfügbarkeit der Installationsfläche für einen so langen Zeitraum schwer möglich. Daraus ergeben sich Anforderungen an die flexible Einsatzfähigkeit der Systemkomponenten für verschiedene Montagearten, an die Erweiterbarkeit des Systems, aber auch an die Wiederverwendungsmöglichkeit der Komponenten.

Montageprozess:

Auf den Bereich der Montage des Systems in der Einsatzumgebung wirken Anforderungen sowohl aus allen Kernforderungen als auch aus den äußeren Einflüssen. So werden beispielsweise erhebliche Installationsmehrkosten durch ein nicht montagegerechtes Befestigungssystem verursacht.

Umgebungswirkung:

Ein PV-System steht mit seiner Umgebung in Wechselwirkung. U.a. durch zusätzliche Lasten, das Umherlaufen auf Dachflächen bei Wartungsarbeiten sowie eine zusätzliche Gefahr durch Blitzschlag ergeben sich weitere Anforderungen an das System.

4.1.3 Kombination

Um die Anforderungen aus den Quellen den verschiedenen Bereiche zuordnen zu können, werden die Anforderungsbereiche und Anforderungsquellen in einer Matrix kombiniert. Alle Anforderungen werden entsprechend ihrer Zugehörigkeit eindeutig nach Tabelle 9 bezeichnet und in der Matrix erfasst. Die Struktur der Matrix zeigt Tabelle 10. Die vollständige Matrix ist als Tabelle A1 im Anhang zu finden.

Anforderungen resultieren aus der Kernforderung Sicherheit	[Si-1..n]
Anforderungen resultieren aus der Kernforderung Funktionsfähigkeit	[Fu-1..n]
Anforderungen resultieren aus der Kernforderung Wirtschaftlichkeit	[Wi-1..n]
Anforderungen resultieren aus den äußeren Einflüssen	[Um-1..n]

Tabelle 9: Bezeichnungssystem für Anforderungen

Anforderungsquellen	Lit.-Quelle	Muss/Kann	Anforderungsbereiche					
			Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung	
Sicherheit								
während der Montage								
während des Betriebs								
Funktionsfähigkeit								
Zuverlässigkeit und Haltbarkeit								
Wartungszugänglichkeit								
Übereinstimmung mit den Kundenwünschen								
Schnittstellengestaltung								
Wirtschaftlichkeit								
Ertragssteigerung								
Kostensenkung								
Äußere Einflüsse								
Gesetze, Richtlinien und Vorschriften								
Normen								
Umweltqualität								
Umgebungstemperatur steigt auf Dächern im Sommer nicht selten auf 70°C, im Dachstuhl auf 55°C.	[HMU00], S.51	kann	[Um-11] Dehnungsfugen zwischen Bauelementen vorsehen.	[Um-12] Temperaturbeständigkeit gewährleisten im Bereich -40°C bis 70°C.				

Tabelle 10: Struktur der Anforderungsmatrix

4.1.4 Bewertungsliste

Um die Anforderungsgerechtigkeit einzelner Systeme bewerten zu können, wird aus der komplexen Matrix eine besser zu handhabende lineare Bewertungsliste erzeugt. In dieser werden alle Anforderungen in einer Spalte eingetragen. Die Bereichseinteilungen blieben dabei erhalten. Zusätzlich wird eine Bewertungsspalte und eine Bemerkungsspalte hinzugefügt. Bei der Linearisierung der Matrix werden Redundanzen sowie Anforderungen geringerer Relevanz identifiziert. Diese werden nicht in die Bewertungsliste aufgenommen. Die jeweiligen Begründungen dafür sind mit den Anforderungen in der Tabelle A2 im Anhang aufgeführt. Die in der Matrix als Muss-Anforderungen klassifizierten Einträge werden in einem gesonderten Bereich zusammengetragen (Tabelle 11). Mit diesem wird bei der Bewertung eines Systems begonnen. Die Nichterfüllung einer dieser Anforderungen ist ein Abbruchkriterium, eine weitere Betrachtung der Kann-Anforderungen entfällt in diesem Fall. Um eine eingehende, objektive Bewertung eines Systems sicherzustellen, ist als Eingangsbedingung die Anforderung der ausreichend verfügbaren technischen Informationen über das System eingefügt.

Muss-Anforderungen
Genügende technische Informationen verfügbar?
[Um-3] Nur CE-zertifizierte elektrische Elemente verwenden.
[Um-1] System ermöglicht Verwendung von anschlussfertigen Modulen, dann kann der Monteur die Verkabelung bis zum Anschlusskasten übernehmen.
[Um-5] Dichtigkeit des gesamten Systems bei Indach-Montage sicherstellen.
[Um-10] Haltepunkte stabil genug auslegen, um Wind- und Wetterfestigkeit zu gewährleisten (Dachhaken, Befestigungsziegel).

Tabelle 11: Muss-Anforderungen zur Systembewertung

Die Struktur der Bewertungsliste zeigt Tabelle 12. Die vollständige Liste ist in Tabelle A3 im Anhang aufgeführt. Die Bewertung der Anforderungserfüllung der Systeme erfolgt per ja/nein-Bewertung in den einzelnen Anforderungsbereichen. Zur automatisierten Auswertung wird 1 für ja sowie 0 für nein verwendet. Trifft eine Anforderung auf ein spezielles zu bewertendes System nicht zu, so wird diese Anforderung mit n/a gekennzeichnet und in der Auswertung nicht betrachtet. Je Anforderungsbereich werden 100 % auf die einzelnen Anforderungen verteilt. Aufgrund der Bereichswertungen können Systeme in den Bereichen verglichen werden. Die Gesamtbewertung der Systeme erfolgt bereichsübergreifend, jeder Bereich ist dabei gleich gewichtet.

Systemname: x	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
Muss-Anforderungen		
Genügende technische Informationen verfügbar?	1	Technische Beschreibung & Studie.
Wertung	100 %	
Geometrie		
[Wi-16] Kabelführung an Bauelementen vorsehen (Kanäle in Profilen etc.).	1	Kabelkanäle in Profilen vorgesehen.
Wertung Geometrie	100 %	
Material		
[[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für mindestens gleiche Lebensdauer wie Module	1	Alle Teile bestehen aus nicht-korrodierendem Material (Aluminium bzw. nicht rostender Stahl).
Wertung Material	100 %	
Flexibilität		
[Fu-2] System erlaubt Zugang zu und Austausch von einzelnen Modulen.	1	
Wertung Flexibilität	100 %	
Montageprozess		
[Fu-1] System erlaubt das Fixieren der Module ohne Verschraubung.	1	Module werden nur eingelegt und festgeklemt.
Wertung Montageprozess	100 %	
Umgebungswirkung		
[Fu-4] Aufständigung für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.	0	Flachdachelement wird nur in einer Höhe angeboten.
Wertung Umgebungswirkung	0 %	
Gesamtwertung System (alle Anforderungen gleich gewichtet)	80 %	

1: Anforderung erfüllt; 0: Anforderung nicht erfüllt; n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

Tabelle 12: Struktur der Bewertungsliste

4.2 Anwendung und Ergebnisse

Die erstellte Bewertungsliste wurde auf vier PV-Systeme mit ihren Befestigungssystemen angewendet. Es wurden Systeme mit einem besonders umfangreichen Systemangebot und/oder mit einem innovativen Ansatz mit besonderen Auswirkungen auf die Montage ausgewählt. Betrachtet wurden das

- AluTec-System der Firma Urs Bühler Energy Systems and Engineering, Cham, Schweiz [URS04],
- Schletter-System der Leichtmetallbau Schletter GmbH, Haag, Deutschland [SCH04],
- PVTec 2000 der Firma Soltech, Bielefeld, Deutschland [SOL04d] sowie
- Solrif-System der Enecolo AG, Mönchaltorf, Schweiz [ENE04].

Die Muss-Anforderungen wurden von jedem System erfüllt. Da alle Systeme das Verkabelungssystem Solarline der Multi-Contact AG, Allschwill, Schweiz [MUL04] verwenden, erfolgte eine separate Bewertung dieses Systems (Anhang, Tabelle A4). Die vollständigen Bewertungslisten der Systeme sind im Anhang als Tabelle A5, Tabelle A6, Tabelle A7 und Tabelle A8 aufgeführt. Insgesamt wurden die Systeme auf Erfüllung von 42 Anforderungen geprüft. Elf Anforderungen (26 %) werden von allen Systemen erfüllt, 14 Anforderungen (33 %) von drei Systemen, zehn der Anforderungen (24 %) von zwei und fünf Anforderungen (12 %) von nur einem System. Zwei Anforderungen (5 %) werden von keinem der untersuchten Systeme erfüllt. Tabelle A9 im Anhang stellt die Ergebnisse der Bewertung der Systeme in einer Übersicht dar. Der zusätzlichen Spalte *Filter* ist zu entnehmen, wie viele Systeme die jeweilige Anforderung erfüllt haben. Von allen Systemen werden insbesondere wirtschaftliche Anforderungen erfüllt (Tabelle 13). Dabei stehen Anforderungen im Vordergrund, die den direkten Montageprozess sowie den Ertrag und die langfristige Haltbarkeit der Anlage betreffen. Tabelle 14 zeigt alle Anforderungen, die jeweils von nur einem System erfüllt werden. Hier finden sich ausschließlich Anforderungen aus der Kernforderung Funktionsfähigkeit und aus den äußeren Einflüssen. Eine Anforderung aus der Kernforderung Funktionsfähigkeit und eine aus dem Kernforderung Wirtschaftlichkeit werden von keinem System erfüllt (Tabelle 15).

[Wi-4] Vermeidung von Verschattung einzelner Zellen, insbesondere durch hervorstehende Schrauben oder hohe/breite Rahmenprofile.
[Wi-12] Keine Veränderung der vorhandenen Dachkonstruktion zur Anbringung der Befestigungspunkte erforderlich.
[Wi-18] Stabile Auslegung der Elemente und spannungsfreie Herstellung der Module (bei gerahmten Modulen), um Beschädigungsrisiko zu verringern.
[Wi-5] Umrahmung der Module muss Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc) sicherstellen.
[Wi-6] Module mit haftarmer Oberfläche verwenden (Selbstreinigungseffekt).
[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für mindestens gleiche Lebensdauer wie Module.
[Wi-8] Spannungsabfall und Kosten durch möglichst kurze Gleichstromverkabelung minimieren.
[Wi-9] Verschaltung der Module nach Montage jedes einzelnen Moduls ermöglichen.
[Um-18] Die Einführung der Solarkabel in die Modulanschlussdosen hat von unten zu erfolgen, so dass ein Eindringen von Wasser über die Kabeleinführung ausgeschlossen werden kann (Abtropfschlaufe bilden).
[Wi-17] Verwendung von Schutzklasse II-konformen Modulen (keine Erdung per Norm erfordert).
[Um-19] Erdung der Generatorenhäuser über die Montagestruktur; evtl. Verbindung zur bestehenden Blitzschutzanlage am nächsten Punkt.

Tabelle 13: Von allen Systemen erfüllte Anforderungen

Systemname:	AluTec	Schletter	PVTec	Solrif
[Um-17] Verwendung von gleichen oder isolierten Materialien für Befestigung: Modulrahmen, Schrauben, Klammern usw., um Korrosionsprobleme durch elektrochemische Zersetzung zu vermeiden.	0	0	0	1
[Fu-20] Verwendung von speziellen Klemmen ohne die Anforderlichkeit der Durchdringung des Daches (Blechfalzdächer).	0	1	0	n/a
[Fu-11] Montage und Demontage möglichst zerstörungsfrei, sonst hohe Instandsetzungskosten.	0	0	0	1
[Fu-4] Aufständigung für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.	0	1	n/a	n/a
[Um-20] Ableitung von Kondenswasser ermöglichen.	0	n/a	0	1

1: Anforderung erfüllt; 0: Anforderung nicht erfüllt; n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

Tabelle 14: Von einem System erfüllte Anforderungen

[Fu-19] System kann in Dachisolation des Flachdaches integriert werden (vor allem bei Neubauten interessant).

[Wi-13] Verwendung von Dachelementen (z.B. Austauschziegeln) mit integrierten Befestigungspunkten und Minimierung der erforderlichen Punkte.

Tabelle 15: Von keinem System erfüllte Anforderungen

Bild 57 zeigt die Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse der untersuchten Systeme in der Zusammenfassung. Dargestellt sind das Gesamtergebnis sowie die Ergebnisse in den einzelnen Anforderungsbereichen.

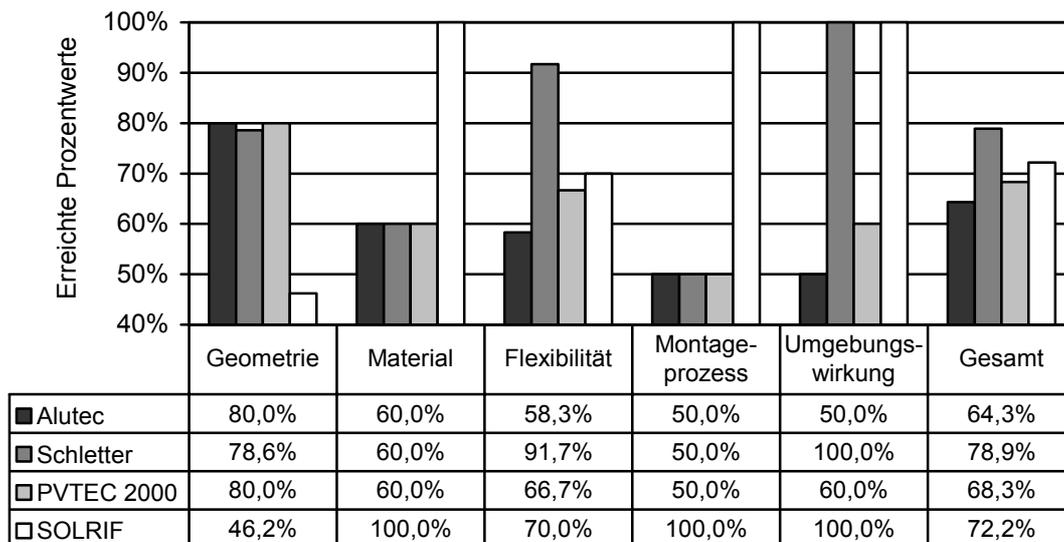


Bild 57: Erfüllungsgrad der Anforderungen bei den untersuchten Systemen

4.3 Ergänzende Montageversuche

Die Ergebnisse der Bewertung der Anforderungsgerechtigkeit werden im Bereich des Montageprozesses anhand von praktischen Untersuchungen an Befestigungssystemen vertieft. Dabei werden für die untersuchten Systeme die Anzahl der Montageschritte, die Art und Anzahl der benötigten Werkzeuge und die Komplexität der Montageaufgaben sowie die Demontageeignung analysiert. Berücksichtigt wird ferner über die Art der verwendeten Werkzeuge, ob zur Montage elektrische Energie auf dem Dach benötigt wird. Bevor ein PV-Generator auf einem Dach montiert werden kann, müssen alle Baugruppen, die benötigten Werkzeuge, Energie sowie evtl. benötigte Hilfsstoffe auf dem Dach bereitgestellt werden. Zur Bereitstellung kommen Leitern, Gerüste, Dachaufzüge, Seile oder günstig gelegene Dachfenster in Frage. Die Bereitstellung der PV-Module verursacht aufgrund ihrer Abmaße und ihres Gewichtes allgemein den größten Aufwand. Art und Aufwand der Bereitstellung werden folglich in erster Linie von den

Dimensionen der verwendeten Module und von gebäudespezifischen Parametern, wie z.B. Höhe, Dachneigung und Lage von Dachfenstern, beeinflusst. Diese können durch die Konstruktion des Befestigungssystems nicht beeinflusst werden, daher wird auf eine nähere Darstellung verzichtet.

4.3.1 Aufdach

Für Aufdach-Systeme werden alle Montageoperationen betrachtet, die unabhängig von der spezifischen Befestigung zu dem Dachstuhl bei der Verwendung des Trägerprofilsystems durchgeführt werden müssen. Einen Überblick über die Montage der Trägerprofile gibt Tabelle 16.

Benötigte Werkzeuge	<ul style="list-style-type: none"> - mechanisches Schraubwerkzeug - evtl. Wasserwaage und Schnur
Arbeitsschritte	<ul style="list-style-type: none"> - Positionierung und Orientierung zur Vormontage - Einführen der Hammerkopfschrauben in die Schlitznut - Schraubenschäfte durch Bohrungen im Verbindungselement zum Dachstuhl führen - Sechskantmuttern aufdrehen und leicht anziehen - Profilschiene vollständig positionieren und orientieren - Schraubverbindung fest anziehen - Module positionieren und orientieren - Module evtl. durch zweite Arbeitskraft zwischensichern - Niederhalter positionieren - Niederhalter anschrauben
Komplexität	Mittel
Demontageeignung	Gut. In Abhängigkeit von der Korrosion variiert die Demontageeignung des Systems. Lassen sich die Schraubverbindungen noch durch Schraubwerkzeuge lösen, lässt sich ein Trägerprofilsystem gut demontieren. Versagen die Schraubwerkzeuge, muss trennend demontiert werden. Dann entscheidet die Zugänglichkeit der Verbindungsstellen für das Trennwerkzeug über die Demontageeignung.

Tabelle 16: Aufdach-Montage der Trägerprofile des Befestigungssystems mit PV-Modulen

Bei den am Markt etablierten Systemen müssen die PV-Module zur Montage auf die Trägerprofile aufgelegt und positioniert werden, bevor sie mit den Niederhaltern montiert werden. In Abhängigkeit von der Dachneigung und der Reibung zwischen Modul und Trägerprofil besteht dabei die Gefahr, dass Module während der Montage der Niederhalter abrutschen. Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Positionierung von PV-Modulen und Niederhaltern. Zur Montage müssen immer mehrere Niederhalter zu mehreren Modulen die richtige Position haben. Durch bestehende Trägerprofilsysteme wird dem Monteur bei dieser Aufgabe keine Hilfestellung gegeben. Alle Bauteile lassen sich beliebig auf und/oder in der Profil-

schiene positionieren, Modul und Niederhalter besitzen keine Zwangslage zueinander. Beispielsweise wird bei der Montage von drei PV-Modulen zu einem PV-Generator zunächst ein Modul auf die Profilschiene aufgelegt und einseitig mit Niederhaltern montiert. Anschließend wird das zweite Modul daneben gelegt. Nun werden die Niederhalter, zwischen den beiden ersten Modulen montiert. Dann wird das dritte Modul aufgelegt, die Niederhalter zwischen dem zweiten und dem dritten Modul und dann die am Rand des dritten Moduls montiert. Das Fehlerpotential besteht darin, dass, auch wenn das zweite Modul zunächst in die richtige Position zum ersten gebracht wurde, eine Positionsänderung während der Montage des dritten Moduls, z.B. durch einen Stoß, erfolgen kann. Wenn diese Positionsänderung nicht detektiert und behoben wird, folgt daraus eine nicht ideale Position der mittleren Niederhalter zu den Modulen. Diese Verbindung weist in der Folge nicht die optimale Tragfähigkeit und Befestigungswirkung auf (Bild 58). Die Fehlerwahrscheinlichkeit steigt mit der Anzahl der nebeneinander und übereinander angeordneten Module. Zusätzlich lässt sich ein solcher Fehler in der Mitte einer Modulreihe nur dadurch korrigieren, dass die Reihe zu einer Seite hin vollständig auflöst wird, was mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden ist. Nicht detektierte Montagefehler können zu einem Abrutschen einzelner oder mehrerer PV-Module führen.

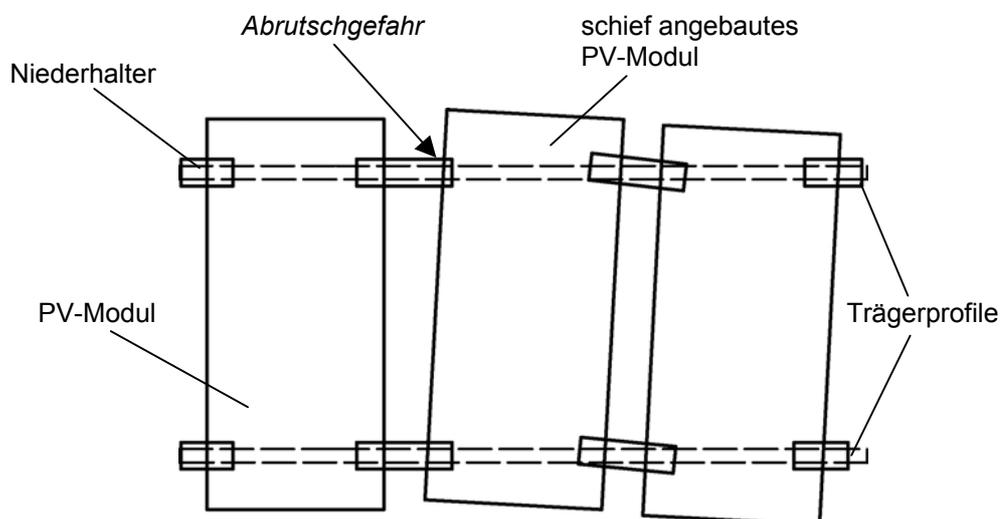


Bild 58: Montagefehler durch fehlende Zwangslagezuordnung

4.3.2 Indach

Einen Überblick über die Montage eines Indach-Systems mit gedichteten Fugen gibt Tabelle 17. Das System erfordert eine sehr hohe Lagegenauigkeit aller Bauteile zueinander, da die Dichtheit des Systems nur innerhalb sehr enger Lagetole-

ranzen gewährleistet ist. Die Profilschienen, die direkt an den Dachlatten montiert werden, müssen von vornherein an der richtigen Position montiert werden und bei der Montage bereits die richtige Länge haben. Das Fehlerpotential durch die fehlende Zwangslagezuordnung bei der Montage der Module auf den Trägerprofilen besteht ebenfalls.

Benötigte Werkzeuge	<ul style="list-style-type: none"> - Spaxer - Latthammer, Säge u.ä. - Trennwerkzeug - Messzeuge
Arbeitsschritte	<ul style="list-style-type: none"> - Exaktes Zuschneiden der Profilschienen, Auflage- und Dichtungsgummi gemäß der technischen Planung - Demontage der Ziegel im Zielbereich - Ausmessen und Markieren des Zielbereichs - Positionierung Hilfslatten auf den Sparren, evtl. Kürzen - Montage der Hilfslatten - Montage der Profilschienen - Positionieren der PV-Module - Montage der Dichtungen
Komplexität	Sehr hoch
Demontageeignung	Gering. Es müssen eine Vielzahl Schrauben sowie die Hilfslatten demontiert werden. Danach müssen in einem relativ großen Bereich neue Ziegel eingedeckt werden.

Tabelle 17: Indach-Montage des Befestigungssystems mit gedichteten Fugen

4.3.3 Elektrische Verschaltung

Bei der elektrischen Verschaltung von PV-Modulen zu einem PV-Generator gibt es einige Problemfelder. Ein PV-Generator steht unter Spannung, sobald er dem Sonnenlicht ausgesetzt wird. Kommt man bei der Montage mit spannungsführenden Teilen in Berührung, können gefährliche Verletzungen durch Stromschlag oder dadurch bedingten Sturz vom Dach die Folge sein. Ferner besteht die Möglichkeit, dass Module falsch verschaltet werden, so dass es zu Kurzschlüssen und Schäden am Generator kommen kann. Bei den herkömmlichen PV-Modulen erfolgt die elektrische Verschaltung durch Stecken von Steckern in die richtigen Dosen. Dadurch besteht kein ausreichender Schutz gegen die oben genannten Gefahrenpotentiale, so dass der elektrische Anschluss nur von einem Elektriker durchgeführt werden darf.

Bei herkömmlichen Befestigungssystemen sind die Montage der PV-Module und der elektrische Anschluss der Module zwei voneinander getrennte Vorgänge. Alle am Markt verfügbaren Systeme müssen zunächst auf dem Dach montiert werden, bevor der elektrische Anschluss erfolgen kann. Diese Vorgehensweise ist unter

montagetechnischen Gesichtspunkten sehr ungünstig, da sich die elektrischen Anschlussdosen der PV-Module auf der Unterseite der Module befinden (Bild 59). Die Zugänglichkeit zu den Anschlüssen ist daher erheblich erschwert, wenn die Module bereits auf dem Dach montiert sind. Dies widerspricht der Forderung nach Ergonomie bei der Montage und steigert die Fehlerwahrscheinlichkeit.

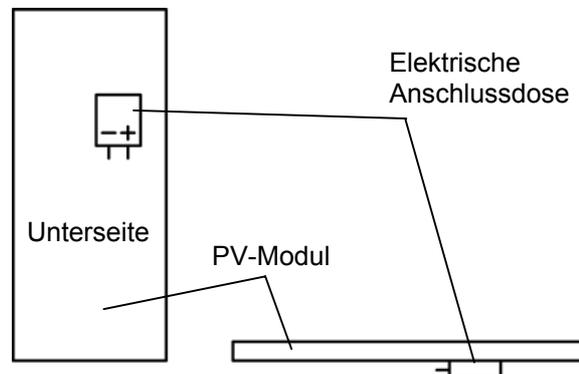


Bild 59: Elektrische Anschlussdose

Für die fehlerfreie Verschaltung der PV-Module untereinander ist eine übersichtliche Anordnung der elektrischen Verbindungselemente von herausragender Bedeutung. Bei den herkömmlichen Systemen bestehen hingegen die Verbindungselemente aus Kabeln, die unter den Modulen von Anschlussdose zu Anschlussdose in der richtigen Reihenfolge laufen müssen (Bild 60). Gerade bei der Verschaltung mehrerer Module ist die Übersichtlichkeit bei dieser Technik stark vermindert. Im Zusammenwirken mit der schlechten Ergonomie und dem Gefahrenpotential bei der elektrischen Verschaltung ergibt sich hier eine zeitraubende Tätigkeit, bei der die Fehlerwahrscheinlichkeit ausgesprochen hoch ist.

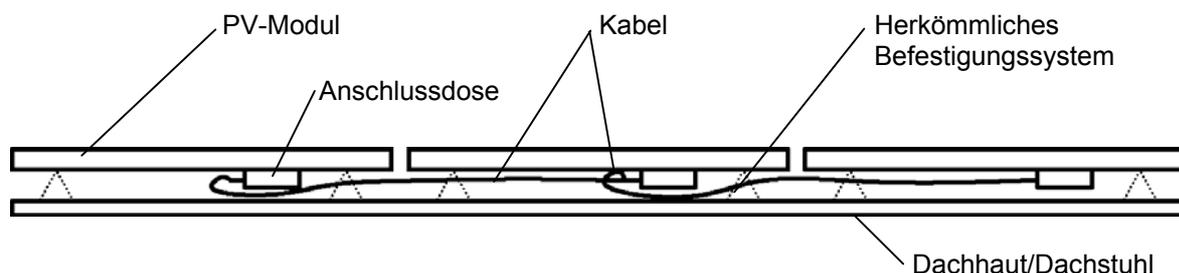


Bild 60: Herkömmliche elektrische Verschaltung

4.4 Abgeleitete Gestaltungshinweise

Sowohl aus der Bewertung der Anforderungsgerechtigkeit wie auch aus den durchgeführten Montageversuchen konnten folgende Nachteile bestehender Befestigungssysteme für PV-Generatoren identifiziert werden.

Nachteile in den **Montageeigenschaften** herkömmlicher Befestigungssysteme:

- Keine systembedingte Lagezuordnung zwischen Trägerprofilssystem, PV-Modulen und Niederhaltern.
- Keine ausreichende Zwischensicherung der PV-Module auf dem Trägerprofilssystem vor der Endmontage.
- Große Vielfalt an Bauteilen und Montageoperationen.
- Spannungsführende Teile sind bei der elektrischen Verschaltung nicht ausreichend abgeschirmt.
- Befestigung und elektrische Verschaltung müssen nacheinander durchgeführt werden.
- Die elektrische Verschaltung erfolgt unter erschwelter Zugänglichkeit mit schlechter Ergonomie.

Diese Nachteile führen bei der Montage des Befestigungssystems zu einem hohen Zeitaufwand, einer schlechten Ergonomie, einer hohen Fehlerwahrscheinlichkeit sowie einem hohen Gefahrenpotential.

Nachteile im **Anwendungsspektrum** der am Markt etablierten Befestigungssysteme ergeben sich aufgrund einer

- Beschränkung auf eine bestimmte PV-Modulart (gerahmt/ungerahmt, Abmessungen) sowie
- Spezialisierung auf die Aufdach- oder Indach-Montage.

Bezüglich des **elektrischen Anschlusses** sind bei den am Markt etablierten Systemen nachteilig, dass

- der Anschluss unübersichtlich und willkürlich durch Verkabelung erfolgt,
- die Sicherung der elektrischen Anschlussteile (Kabel/Stecker/Dosen) aufwendig oder nicht vorhanden ist und
- dadurch der Zusammenschluss der PV-Module zu einem PV-Generator aufgrund des hohen Gefahrenpotentials von einer Fachkraft durchgeführt werden muss.

Über die Bewertung der Anforderungserfüllung hinaus wurden bei der Untersuchung auch die Gründe für die Nicht-Erfüllung einzelner Anforderungen identifiziert. Aus diesen wurden Verbesserungsvorschläge in den Bereichen Verbindungselemente, Befestigungspunkte, Module, Elektrik sowie Sonstiges abgeleitet. Die Anzahl der Verbesserungsvorschläge in den einzelnen Bereichen stellt Bild 61 dar. Aus den systembezogenen Verbesserungsvorschlägen und den bei den Montageversuchen identifizierten Nachteilen lassen sich für ein montagegerechtes Befestigungssystem folgende allgemeingültige Gestaltungshinweise aufstellen.

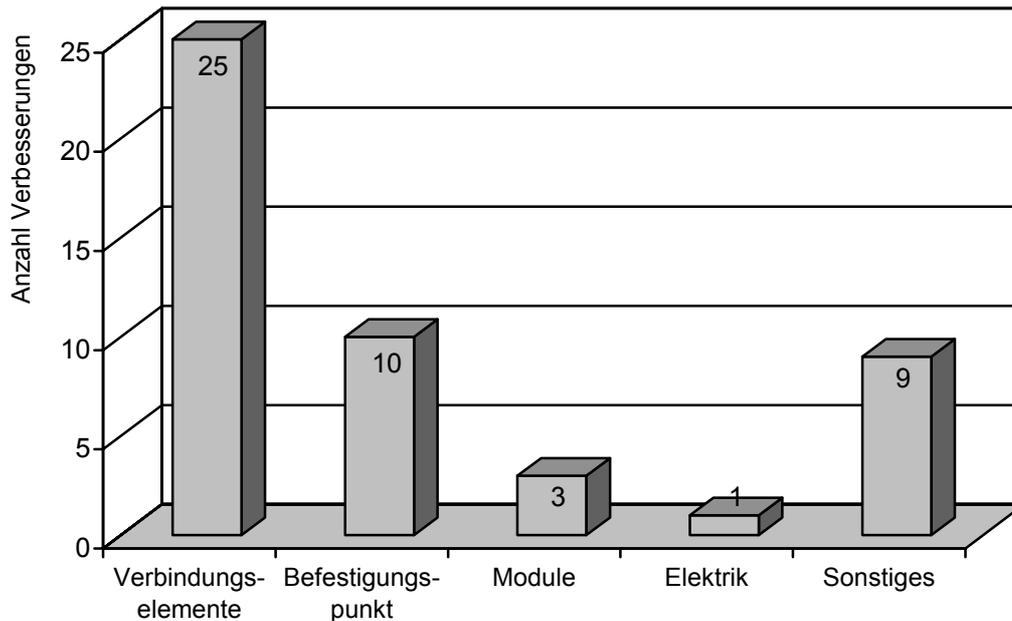


Bild 61: Verbesserungsbedarf bei den untersuchten Systemen

Das montagegerechte Befestigungssystem für PV-Generatoren muss bezüglich der **Montageeigenschaften**

- eine Zwangslage zwischen PV-Modulen, Niederhaltern und Trägersystem realisieren, eine Selbstzentrierung ist anzustreben,
- die PV-Module, auch bevor sie vollständig montiert sind, gegen Abrutschen sichern,
- ermöglichen, dass die Montage der PV-Module und der elektrische Verschaltung in einem Arbeitsschritt erfolgt,
- aus einer möglichst geringen Anzahl von Bauteilen bestehen,
- Montageoperationen unter guter Zugänglichkeit der Bauteile und hoher Ergonomie ermöglichen und
- während der Montage einen Kontakt mit spannungsführenden Teilen ausschließen.

Im **Anwendungsspektrum** muss das montagegerechte Befestigungssystem für möglichst viele Einsatzumgebungen geeignet sein. Eine Anpassbarkeit des Systems nach dem Baukastenprinzip ist anzustreben [SCH03b, SEL97]. Das System muss

- die Aufnahme aller gängigen PV-Module ermöglichen,
- auf allen Dacharten montiert werden können und
- sowohl eine Aufdach-, als auch eine Indach-Montage ermöglichen.

Bezüglich des **elektrischen Anschlusses** muss das montagegerechte Befestigungssystem

- alle Arten der elektrischen Verschaltung der PV-Module zu einem PV-Generator in beliebiger Reihenfolge ermöglichen und
- über ein einfaches Anschlusskonzept verfügen, so dass der Anschluss auch vom Laien gefahrlos durchzuführen ist.

Die Gestaltungshinweise sind in Tabelle 18 zu einer Liste der über die allgemeinen Anforderungen (Tabelle 8) hinausgehenden speziellen Anforderungen an ein montagegerechtes Befestigungssystem zusammengefasst und mit Gewichtungsfaktoren bewertet. Diese Gewichtung dient dazu, das zu konzipierende und konstruierende montagegerechte Befestigungssystem für PV-Generatoren nach dem Konstruktionsprozess am Erfüllungsgrad der gestellten Anforderungen zu messen.

Anforderung	Forderung/Wunsch	Gewichtung
Zwangslage	W	5
Zwischensicherung	W	2
Integrierte elektrische Verschaltung	F	6
Geringe Bauteilanzahl	W	5
Ergonomie	W	1
Schutzart	F	6
Universalität PV-Module	W	4
Universalität Dächer	W	4
Auf-/Indach Flexibilität	W	4
Baukastenfähigkeit	W	3
Universalität elektrischer Anschluss	W	3
Einfachheit elektrischer Anschluss	W	5

Gewichtung: 1: hilfreich 2: wünschenswert 3: sehr wünschenswert
 4: wichtig 5: sehr wichtig 6: erforderlich

Tabelle 18: Gewichtete spezielle Anforderungen an ein montagegerechtes Befestigungssystem

5 Konzeptionelle Gestaltung

In der Produktentstehungsphase Konzipieren wird die prinzipielle Lösung durch das Anwenden einer systematischen Vorgehensweise festgelegt [VDI2221, DUB01, PAH97]. Dazu wird die Funktionsstruktur eines PV-Generators gegliedert nach Gesamtfunktion und Teilfunktionen aufgestellt. Für das in der Folge zu konstruierende montagegerechte Befestigungssystem werden die maßgeblichen Teilfunktionen identifiziert und in Detailfunktionen aufgeschlüsselt. Zu diesen Detailfunktionen werden Wirkprinzipien gesucht und ausgewählt. Die geeigneten Wirkprinzipien werden zu prinzipiellen Lösungen kombiniert und integriert. Das Ergebnis ist eine konzeptionelle Lösung, die die geforderten Teilfunktionen erfüllt. Diese Lösung dient in der nachfolgenden konstruktiven Gestaltung des Befestigungssystems als Basis für die geometrische Festlegung der Konstruktion.

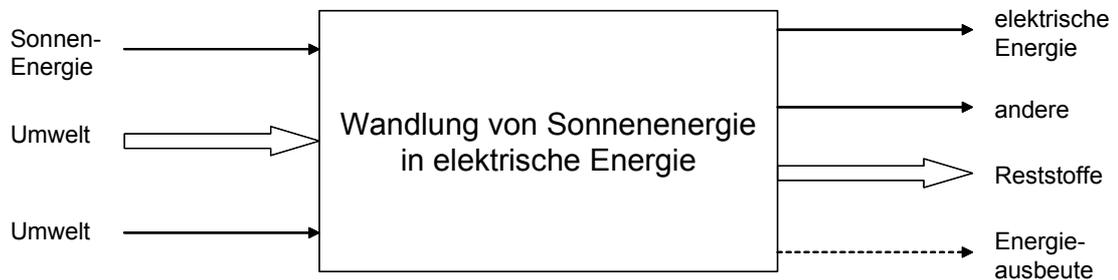
5.1 Funktionsstruktur

Mit Hilfe von Funktionsstrukturen wird der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen lösungsneutral in Blockdarstellung visualisiert. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen werden in Energie-, Stoff- und Signalfluss unterschieden. Im ersten Schritt wird die Gesamtfunktion aufgestellt. Die Gesamtfunktion beschreibt die wesentlichen Aufgaben eines PV-Generators unter Berücksichtigung aller Eingangs- und Ausgangsgrößen, die erfüllt werden müssen. Im zweiten Schritt wird die Gesamtfunktion in verschiedene Haupt- und Teilfunktionen aufgebrochen. Dabei müssen alle Eingangs- und Ausgangsgrößen übernommen werden.

5.1.1 Gesamtfunktion

Die Gesamtfunktion eines PV-Generators ist die Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie. Die Höhe der Einstrahlungsintensität beeinflusst maßgeblich die Energieausbeute bzw. die elektrische Leistung des Generators. Dabei ist der Generator zu jeder Tages- und Jahreszeit unterschiedlichen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Diese Einflüsse wirken auf das System in einer bestimmten Art und Weise. So muss beispielsweise dafür gesorgt werden, dass Stoffe aus dem System entfernt werden, die den Zustand der PV-Moduloberfläche negativ beeinflussen. Auf das System wirken als Eingangsgrößen die Sonnenenergie, verschiedene Stoffe aus der Umwelt, z.B. Schnee, Regen und Wind, sowie verschiedene Energieformen aus der Umwelt, beispielsweise elektrische Energie durch Blitzschlag sowie die Windkraft. Herausgeführt werden aus dem System müssen die elektrische Energie, andere Energieformen, wie z.B. Wärme, verschiedene Rest-

stoffe, beispielsweise Tauwasser und Schmutz, sowie Signale von der elektrischen Leistung des PV-Generators. Bild 62 zeigt die Gesamtfunktionsstruktur eines PV-Generators.



—————> Energiefluss

—————> Stofffluss

-----> Signalfluss

Bild 62: Gesamtfunktionsstruktur eines PV-Generators

5.1.2 Teilfunktionen

Aus der Gesamtfunktionsstruktur lassen sich fünf Teilfunktionen ableiten. Bei den Teilfunktionen wird in Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden. Die Hauptfunktion wird von der Gesamtfunktion abgeleitet und die Nebenfunktionen sind der Hauptfunktion untergeordnet. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen, die auf das System wirken, besitzen einen höheren Detaillierungsgrad als bei der Gesamtfunktionsstruktur (Bild 63).

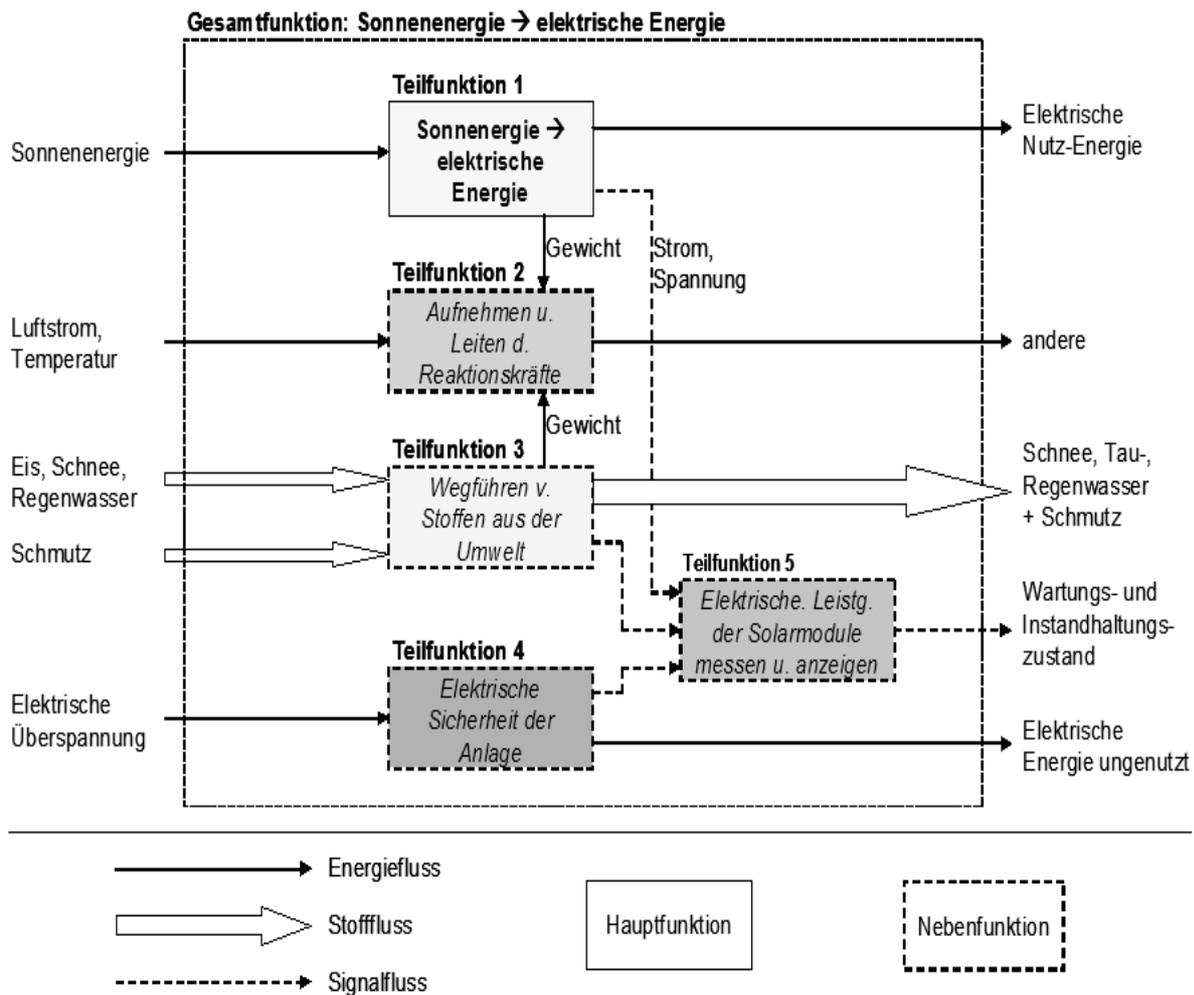


Bild 63: Teilfunktionsstruktur eines PV-Generators

(1) Sonnenenergie → elektrische Energie:

Mit Hilfe der PV-Module wird die einfallende Sonnenenergie in elektrische Energie umgewandelt.

(2) Aufnehmen und Leiten der Reaktionskräfte:

Reaktionskräfte entstehen aus verschiedenen orientierten Kräften, die aus Windenergie, Wärmedehnungen sowie aus Gewichtskräften der PV-Module oder Schnee resultieren. Die Reaktionskräfte werden über das Befestigungssystem an die Systemgrenze übertragen. Die Systemgrenze ist hier das Dach eines Gebäudes.

(3) Wegführen von Stoffen aus der Umwelt:

PV-Module reagieren sehr empfindlich auf Stoffe aus der Umwelt, die die Einstrahlungsintensität durch Verschattungen mindern. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die PV-Moduloberfläche von diesen Stoffen zu befreien. Darüber hinaus beinhaltet Teilfunktion 3 den Schutz des PV-Moduls vor Korrosion.

(4) Elektrische Sicherheit der Anlage:

Das PV-System muss vor elektrischer Überspannung geschützt werden. Elektrische Überspannungen können durch Blitzschläge, Verschattungen oder Masseschlüsse entstehen. Entsprechende Maßnahmen gegen Kurzschlüsse sind ebenfalls zu treffen.

(5) Elektrische Leistung des PV-Generators messen und anzeigen:

Mit Hilfe der elektrischen Leistung kann der Wartungszustand des PV-Systems ermittelt werden. Verschattungen, Verschmutzungen oder defekte Solarzellen reduzieren die elektrische Leistung von PV-Modulen. Durch Überwachen und Vergleichen einzelner Messwerte können defekte oder verschmutzte Module identifiziert werden.

5.1.3 Detailfunktionen

Die Teilfunktion 2 im Bild 63 ist die bestimmende für das Befestigungssystem eines PV-Generators. Laut den in den vorherigen Kapiteln identifizierten Anforderungen sollen auch Aufgaben der Teilfunktionen 1, 3 und 4 von dem Befestigungssystem erfüllt werden. Die entsprechende Detailfunktionsstruktur des Befestigungssystems zeigt Bild 64. Die Struktur ist nicht gerichtet und gibt daher keine Reihenfolge an, in der die einzelnen Detailfunktionen erfüllt werden müssen.

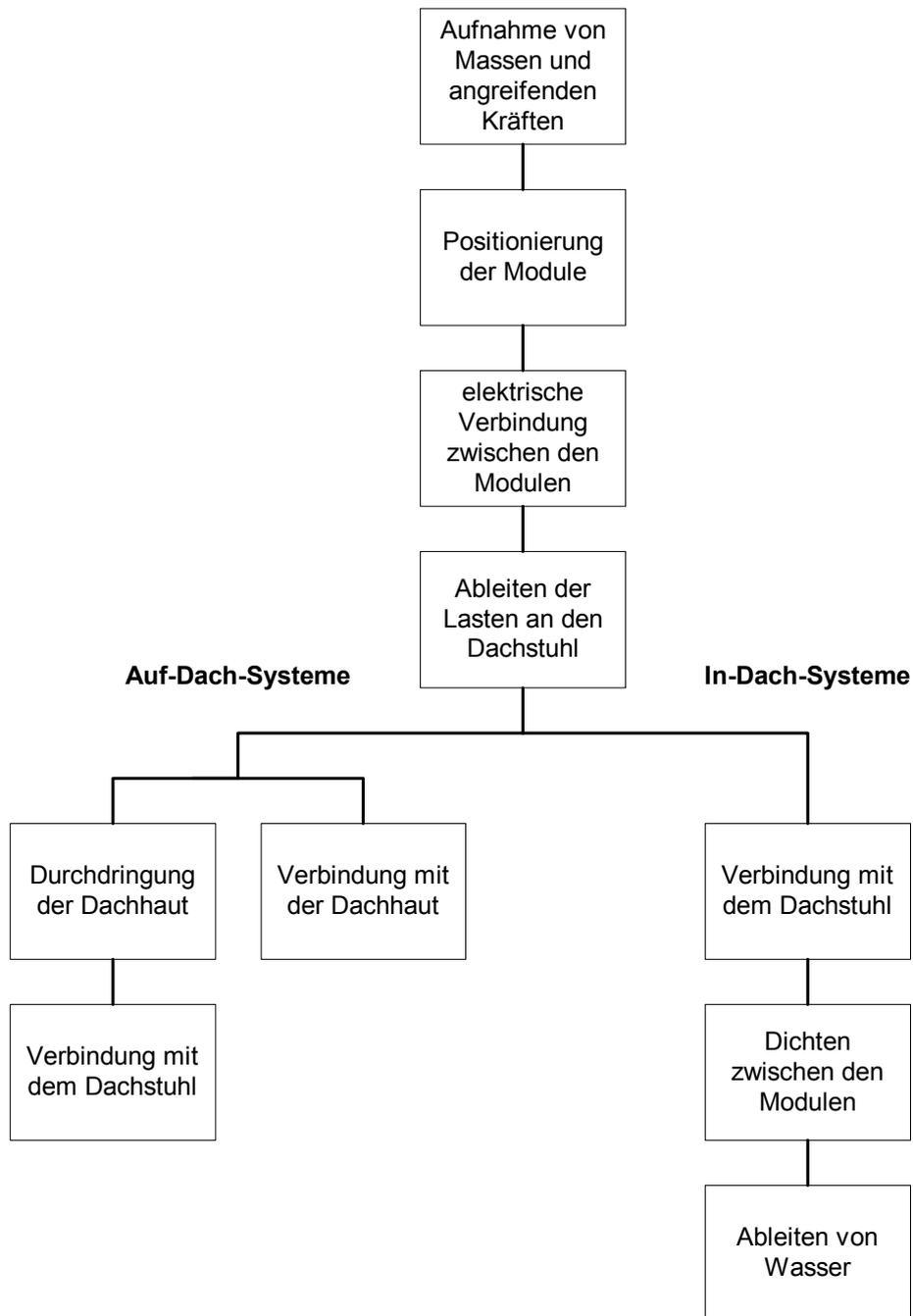


Bild 64: Detailfunktionsstruktur des Befestigungssystems

Die Struktur zeigt im oberen Teil Detailfunktionen, die unabhängig vom Einsatzort vom System erfüllt werden müssen. Im unteren Bereich der Struktur sind Detailfunktionen dargestellt, die spezifisch für den Einsatzort Aufdach oder Indach sind. Im Aufdach-Teil der Struktur erfolgt weiterhin eine Unterteilung in Detailfunktionen für eine Anbindung mit Durchdringung der Dachhaut an Ziegel- bzw. Welldächer (links) und ohne Durchdringung der Dachhaut an Blechfalzdächer (rechts).

5.2 Wirkprinzipien und Lösungsansätze

Die Struktur aus Bild 64 zeigt die von einem Befestigungssystem für PV-Generatoren zu erfüllenden Detailfunktionen lösungsneutral. Darauf basierend werden alle zur Lösung der einzelnen Detailfunktionen einsetzbaren Wirkprinzipien ebenfalls lösungsneutral zusammengestellt (Tabelle 19, Tabelle 20). In der Folge werden konzeptionelle Lösungsansätze für die Detailfunktionen durch ein Wirkprinzip oder eine Kombination von Wirkprinzipien identifiziert.

Funktion	Bemerkung	Wirkprinzip	Spezifikation
Aufnahme von Massen und angreifenden Kräften	Herstellung einer festen Verbindung zwischen PV-Modulen und Befestigungssystem	Formschluss	Hinterschneidung
			Bolzen/Bohrung
			Profil
		Kraftschluss	elektr./magnet.
			mechanisch
			hydraulisch
		Stoffschluss	pneumatisch
			Löten
			Kleben
Positionierung der Module	Herstellung einer geometrischen Beziehung zwischen PV-Modulen und Befestigungssystem	Formschluss	Hinterschneidung
			Bolzen/Bohrung
			Profil
		Kraftschluss	elektr./magnet.
			mechanisch
			hydraulisch
		Stoffschluss	pneumatisch
			Löten
			Kleben
Elektrische Verbindung zwischen den Modulen		Elektrischer Leiter	
Ableiten der Lasten an den Dachstuhl	Herstellung einer festen Beziehung zwischen Befestigungssystem und Dachstuhl	Baelement aus festem Stoff	

Tabelle 19: Wirkprinzipien für die einsatzortunabhängigen Detailfunktionen

Funktion	Bemerkung	Wirkprinzip	Spezifikation		
Durchdringung der Dachhaut		Bauelement aus festem Stoff			
Verbindung mit dem Dachstuhl	Herstellen einer festen Verbindung zwischen Befestigungssystem und Dachstuhl	Formschluss	Hinterschneidung		
			Bolzen/Bohrung		
			Profil		
		Kraftschluss	elektr./magnet.		
			mechanisch		
			hydraulisch		
		Stoffschluss	pneumatisch		
			Löten		
			Kleben		
Verbindung mit der Dachhaut	Herstellen einer festen Verbindung zwischen Befestigungssystem und Dachhaut	Formschluss	Falz		
			Bolzen/Bohrung		
			Profil		
		Kraftschluss	elektr./magnet.		
			mechanisch		
			hydraulisch		
		Stoffschluss	pneumatisch		
			Löten		
			Kleben		
Dichten zwischen den Modulen		Formschluss	Labyrinth		
			Kraftschluss	elektr./magnet.	
				mechanisch	
		hydraulisch			
		Stoffschluss	pneumatisch		
			Löten		
			Kleben		
		Ableiten von Wasser		Strömung durch Eigengewicht	
				Abpumpen	
Abblasen					
Verdampfen					

Tabelle 20: Wirkprinzipien für die einsatzortabhängigen Detailfunktionen

5.2.1 Aufnahme von Massen und angreifenden Kräften

Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, greifen an den PV-Modulen unterschiedliche äußere Kräfte an bzw. bringen die PV-Modulen durch ihr Eigengewicht selber welche auf.

Diese Lasten müssen vom Befestigungssystem aufgenommen werden. Prinzipiell lassen sich die in Tabelle 19 dargestellten Wirkprinzipien zur Übertragung von Kräften zwischen festen Körpern nutzen. Bei bestehenden Systemen werden, wie in Kapitel 2.2.1.3 dargestellt, verschiedene Niederhaltersysteme eingesetzt, um diese Lasten aufzunehmen. Die Niederhalter kombinieren die Wirkprinzipien Kraft- und Formschluss bei der Aufnahme der Lasten, wobei es sich um mechanisch aufgebrauchte Schlusskräfte handelt, die in der elastischen Verformung von z.B. Schraubenschäften gespeichert werden und Formschluss durch Hinterschneidung realisiert wird (vgl. Bild 39). Die Strategie Kraft- und Formschluss zu kombinieren, ist für die gestellte Problematik ein bewährter Lösungsansatz und soll weiterverfolgt werden. Das mechanische Aufbringen der Schlusskraft mit der anschließenden Speicherung in Verformungsbauteilen ist für die Problemstellung am besten geeignet, da die Schlusskraft nur einmal aufgebracht wird und anschließend über die Lebensdauer des Systems gespeichert wird.

5.2.2 Positionierung der Module

Die Detailfunktion *Positionierung der Module* (Bild 64) leitet sich aus der Forderung nach einer Zwangslagezuordnung zwischen PV-Modulen und Befestigungssystem ab, wie sie in Kapitel 4.4 aus den identifizierten Nachteilen herkömmlicher Befestigungssysteme aufgestellt wurde. Unter Zwangslagezuordnung versteht man, dass zwei oder mehrere Bauteile in nur einem Zustand der Positionierung und Orientierungfügbar sind. Dadurch werden Montagefehler (Bild 58) vermieden und der Montageprozess erleichtert. Für das Befestigungssystem für PV-Generatoren beinhaltet die Forderung einer Zwangslagezuordnung, einen festen Verbund zwischen den PV-Modulen zu schaffen und die Position der Module zueinander fest vorzugeben. Ferner soll das Befestigungssystem, gemäß den Anforderungen aus Kapitel 4.4, die Montage unterschiedlich großer PV-Module mit einem System ermöglichen.

Um die Position der PV-Module zueinander fest vorzugeben, müssen Positionierbaugruppen an definierten Positionen bezüglich der Modulränder und/oder -ecken an den PV-Modulen angreifen. Dabei muss eine ortsfeste Fügestelle entstehen, die einen festen Verbund sicherstellt. Um Module unterschiedlicher Größe aufnehmen zu können, muss dann die Lage der Positionierbaugruppen in Bezug auf das absolute Dachstuhlkoordinatensystem (Bild 65) in der XY-Richtung frei wählbar sein.

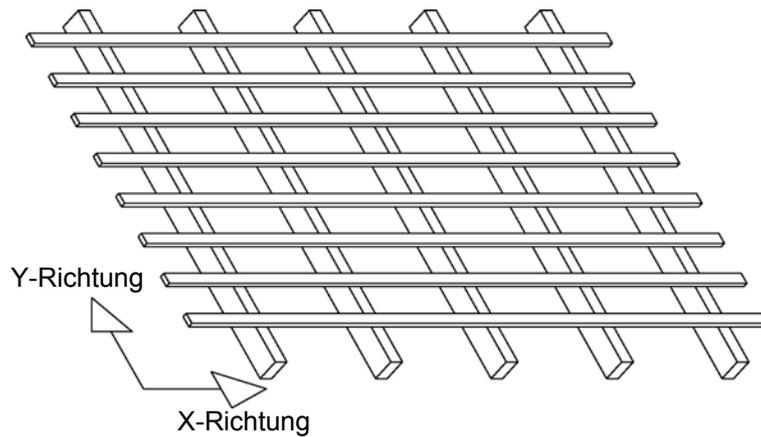


Bild 65: Dachstuhlkoordinatensystem

Bei einer in einer Profilschiene geführten Hammerkopfschraube (Bild 37) sind alle Freiheitsgrade der Verbindung bis auf die in der Schienenachse eingeschränkt. Werden zur Aufnahme der Positionierbaugruppen Trägerprofile als Querträger (Bild 25) eingesetzt, so besitzen die Positionierbaugruppen einen Freiheitsgrad in X-Richtung entlang der Schienenachse. Die Forderung nach Flexibilität des Befestigungssystems bezüglich der Modulgröße ist erfüllt, wenn zusätzlich bei der Montage der Trägerprofile die Y-Richtung am nächsten Bauelement frei wählbar ist. Dies ist bei der Verwendung beispielsweise eines Dachhakens (Bild 38) gegeben.

Die Positionierbaugruppen können wie gefordert an allen Ecken jedes PV-Moduls in einem PV-Generator angreifen, wenn die Trägerprofile an dem oberen und unteren Abschluss des Modulfelds und jeweils zwischen zwei Modulreihen angeordnet sind (Bild 66). Die Positionierbaugruppen müssen dabei so gestaltet werden, dass sie wahlweise auf eine, auf zwei oder auf vier Modulecken einwirken können. Auf benachbarte Ecken verschiedener PV-Module wirkt somit immer dieselbe Positionierbaugruppe ein. Wirken die Positionierbaugruppen auf die Module nach dem Prinzip einer formschlüssigen Verbindung nach Tabelle 19, so werden durch die Positionierbaugruppen alle Freiheitsgrade der PV-Module in Bezug auf die Positionierbaugruppen eingeschränkt. Die Lage der Module zueinander wird damit fest vorgegeben.

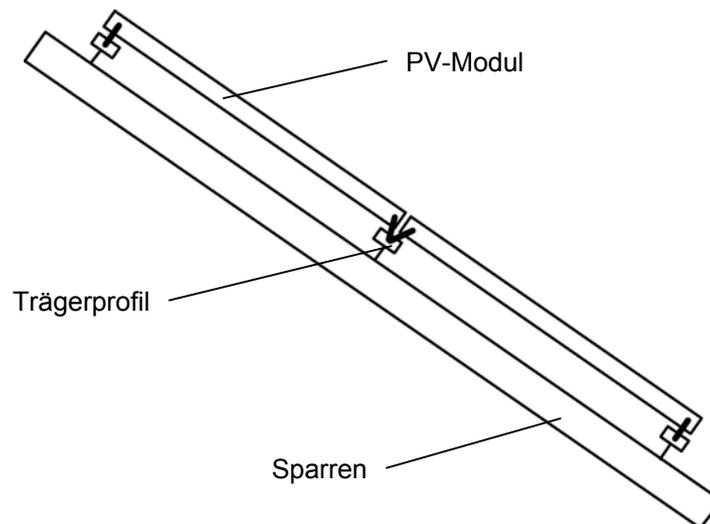


Bild 66: Lage der Trägerprofile

5.2.3 Elektrische Verbindung

Die Detailfunktion *elektrische Verbindung zwischen den Modulen* (Bild 64) kann nur mittels des Wirkprinzips eines elektrischen Leiters erfüllt werden. (Tabelle 19). Nach den in Kapitel 4.4 abgeleiteten Gestaltungshinweisen soll die elektrische Verbindung zwischen den PV-Modulen in dem Befestigungssystem integriert sein. Bei bestehenden PV-Generatoren erfolgt die Verschaltung wie in den Kapiteln 2.2.1.4 und 4.3.3 sowie im Bild 60 dargestellt. Um die elektrische Verbindung in das Befestigungssystem integrieren zu können, sind Verschaltungen auf dem kürzesten Weg zwischen den PV-Modulen anzustreben. Dazu sind die elektrischen Anschlüsse an den Grenzflächen zu den benachbarten Modulen, idealerweise an den Ecken der Module, zu positionieren.

Es ist leicht, PV-Module zu produzieren, die in den zwei sich diagonal gegenüber liegenden Ecken jeweils die gleiche Polung besitzen und somit in den zwei nebeneinander liegenden Ecken unterschiedliche Polungen aufweisen. Eine geringfügige Änderung der Lage der Leiterbahnen in einem PV-Modul reicht dafür aus (Bild 67, links). In Kapitel 4.4 wird weiterhin für ein montagegerechtes Befestigungssystem gefordert, dass dieses nicht nur für speziell produzierte, sondern für alle handelsüblichen PV-Module geeignet sein soll. In Bild 67, rechts, ist dargestellt, wie Module mit einer zweipoligen Anschlussdose auf der Rückseite auf einfache Art und Weise so umgerüstet werden können, dass ihre Anschlüsse an den Ecken liegen.

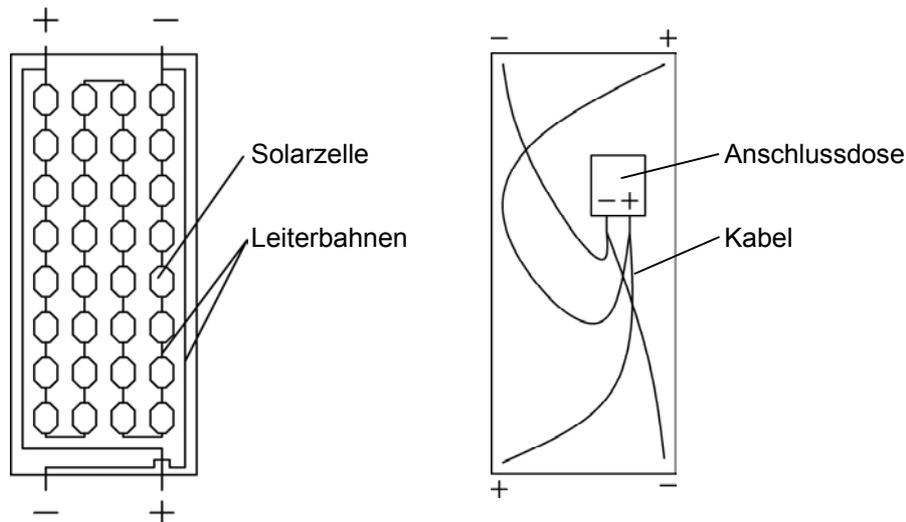


Bild 67: Anforderungsgerechte Anschlusslage durch interne Verschaltung eines PV-Moduls (links) oder durch Umrüstung eines handelsüblichen PV-Moduls (rechts)

Wenn die PV-Module über elektrische Anschlüsse an den Ecken verfügen, ist eine Verschaltung innerhalb eines mehrreihigen PV-Generators immer über zwei Ecken eines Moduls zu einem benachbarten bzw. zum Wechselrichter möglich. Die Verschaltungsmöglichkeiten für ein zweireihiges Modulfeld zeigen [Bild 68](#) und [Bild 69](#). Sollen drei Modulreihen verschaltet werden, kann die Verschaltung, wie in [Bild 70](#) gezeigt, erfolgen.

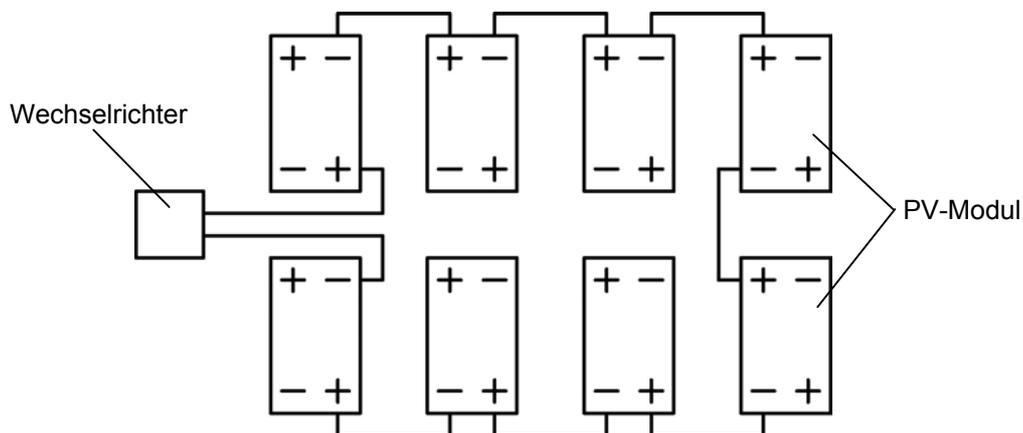


Bild 68: Elektrische Verbindungsmöglichkeit eines zweireihigen PV-Modulfelds (Alternative A)

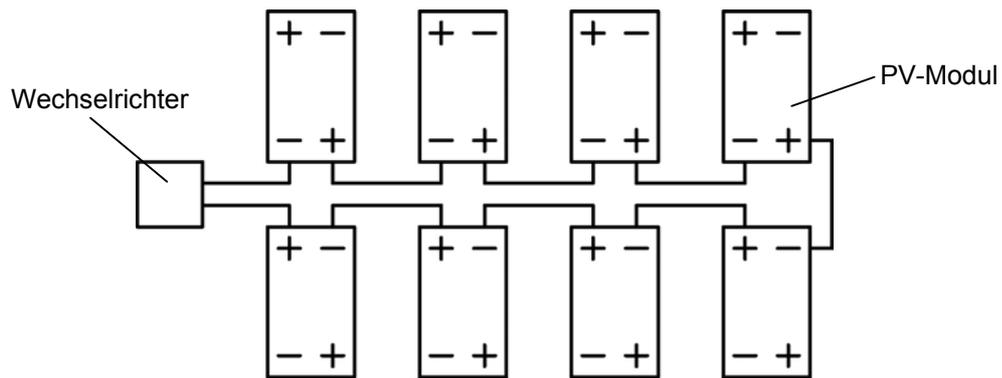


Bild 69: Elektrische Verbindungsmöglichkeit eines zweireihigen PV-Modulfelds (Alternative B)

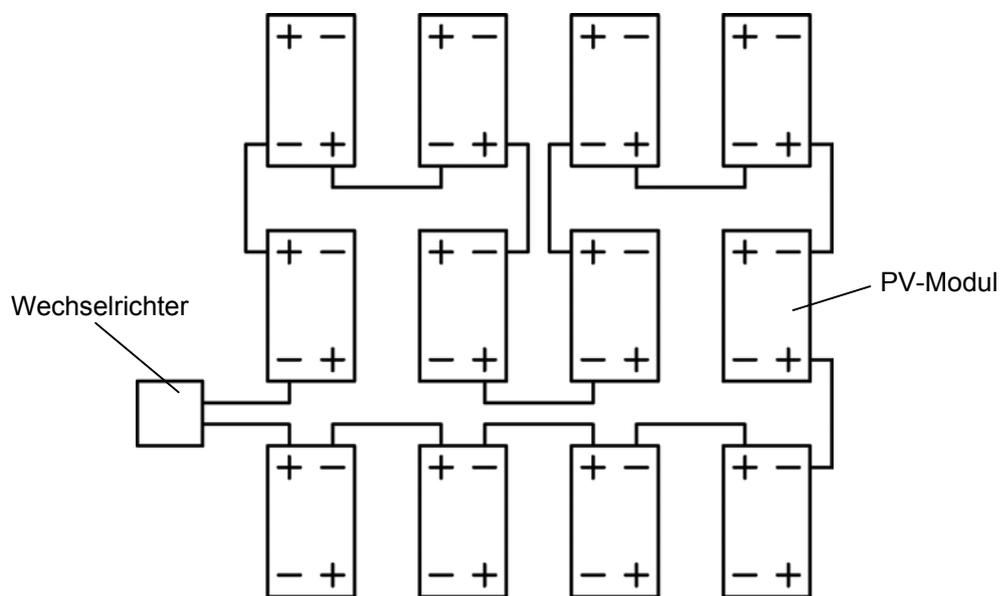


Bild 70: Elektrische Verbindungsmöglichkeit eines dreireihigen PV-Modulfelds

An den elektrischen Anschluss werden in Kapitel 4.4 ferner die Anforderungen nach hoher Schutzart und Einfachheit gestellt. Wobei die hohe Schutzart die Vermeidung des Kontakts mit spannungsführenden Teilen während des Anschlusses bzw. der Montage und die Einfachheit die Zwangsläufigkeit der Anschluss-, bzw. Montageoperation beschreibt. Beide Forderungen lassen sich durch eine Steckverbindung, wie sie in [Bild 71](#) prinzipiell dargestellt ist, erfüllen. Eine solche Steckverbindung erfüllt gleichzeitig die in Kapitel 4.4 gestellten Anforderungen an die Beständigkeit der elektrischen Leitfähigkeit, da Wasser bzw. Kondenswasser nicht eindringen kann und eventuelle mechanische Lasten durch die äußeren Steckerkontakflächen und nicht durch die elektrischen Kontakflächen aufgenommen werden.

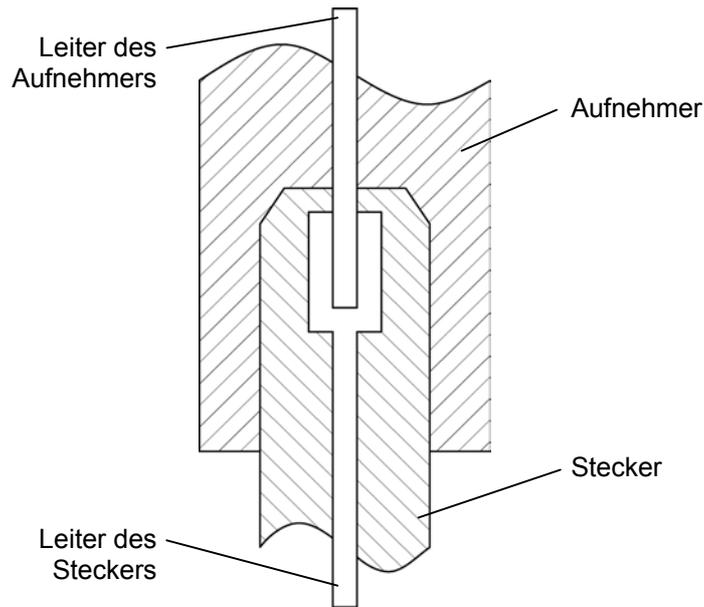


Bild 71: Steckverbindung

5.2.4 Verbindung mit dem Dach

Im Kapitel 2.2.1.1 wurde beschrieben, welche Verbindungselemente für die Detailfunktion *Ableiten der Lasten an den Dachstuhl* (Bild 64) bei herkömmlichen Befestigungssystemen eingesetzt werden, wenn die Lasten auf Trägerprofilen vorliegen. Die Verbindungselemente zum Dachstuhl für Aufdach-Systeme haben sich in der Praxis vielfach bewährt und genügen in der bewährten Form den in Kapitel 4.4 gestellten Anforderungen. Für Indach-Systeme soll eine Gesamtlösung angestrebt werden, bei der keine zusätzlichen Baugruppen benötigt werden. Dies ist durch die Montage der Trägerprofile direkt auf die Sparren möglich.

5.2.5 Dichten zwischen den Modulen

Als Lösungsansatz für die Detailfunktion *Dichten zwischen den Modulen* (Bild 64) bieten sich Gummidichtungen an, die in die Trennfugen eingebracht werden. Gummidichtungen sind als Meterware verfügbar und können einfach auf die gewünschte Länge zugeschnitten werden. Wie in Kapitel 5.2.1 erarbeitet, sollen bei dem montagegerechten Befestigungssystem Trägerprofile eingesetzt werden, die als Querträger an den Modulrändern verlaufen. Unter den Längsfugen werden bei diesem System keine Profile benötigt. Somit muss ermöglicht werden, die Dichtung so in die Trennfuge einzubringen, dass zum Erreichen der gewünschten Dichtwirkung auf eine spezielle Unterkonstruktion unter den Trennfugen verzichtet werden kann, wie sie bei dem in Kapitel 2.2.2 beschriebenen herkömmlichen Indach-System (Bild 41) üblich ist.

Damit Dichtungen ihre Funktion erfüllen können, müssen sie an den Dichtflächen mit einer Dichtkraft beaufschlagt werden. Je nach Form der Dichtung können die Dichtflächen unterschiedliche Lage zur Trennfuge haben. Für eine Dichtung der Trennfuge ohne Unterkonstruktion kommen als Lösungsansätze zwei Dichtungsformen in Frage. Zum einen eine einfache Flachdichtung, die mit einer seitlichen Dichtkraft quer zur Trennfugenebene beaufschlagt werden muss (Bild 72). Zum anderen eine T-förmige Profildichtung, bei der die Dichtkraft in der Trennfugenebene wirken muss (Bild 73).

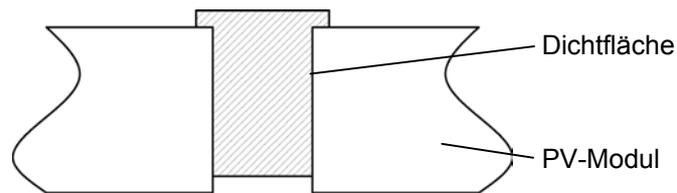


Bild 72: Flachdichtung

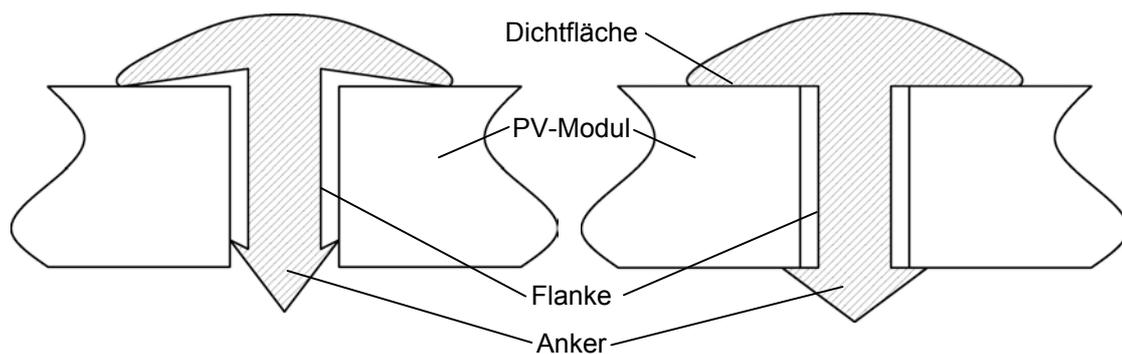


Bild 73: T-förmige Profildichtung beim Einbau (links) und eingebaut (rechts)

Zum Aufbringen der Dichtkräfte für die verschiedenen Dichtungen werden unterschiedliche Wirkprinzipien eingesetzt. Die Flachdichtung muss von außen mit der Dichtkraft beaufschlagt werden, d.h. die PV-Module müssen an der zu dichtenden Fuge aneinander gepresst werden. Bei der T-förmigen Profildichtung wird die Dichtkraft hingegen in dem Bauteil selber aufgebracht. Bei einer Form des Profils nach Bild 73 wird die Dichtung beim Einbringen in die Trennfuge im Bereich der Flanken und des Ankers elastisch so verformt, dass der Anker durch die Trennfuge rutscht. Außerhalb der Trennfuge entspannt sich der Anker wieder und kann nicht mehr in die Trennfuge zurückrutschen. Die elastische Verformung in den Flanken bleibt dadurch bestehen und bewirkt eine Rückstellkraft, welche als Dichtkraft an den Dichtflächen wirksam wird.

5.2.6 Ableiten von Wasser

Die Detailfunktion *Ableiten von Wasser* (Bild 64) kann durch ein Dichten der Schnittstellen mit der Dachhaut erfüllt werden. Regen- oder Schmelzwasser auf der PV-Generatorfläche muss definiert derart abgeführt werden, dass es am unteren Ende des Modulfelds wieder auf die Dachhaut und nicht in den Dachstuhl hinein fließt. Ebenso muss Wasser an den Schnittstellen zwischen den Rändern des Modulfelds und der Dachhaut abgeführt werden (vgl. Kapitel 3.1.3).

Als bester Lösungsansatz bietet sich hierfür das Wirkprinzip der Strömung durch Eigengewicht auf Anschlussblechen mit Dichtung an. Für den Anschluss dieser Bleche sollen aufgrund der in Kapitel 4.4 für das Befestigungssystem geforderten geringen Bauteileanzahl ebenfalls die in Kapitel 5.2.2 konzipierten Positionierbaugruppen verwendet werden. Zwischen den Anschlussblechen und den äußeren Rändern des Modulfelds soll dabei eine gleichartige Trennfuge vorhanden sein, wie zwischen einzelnen PV-Modulen innerhalb des Modulfelds. Dadurch kann hier ebenfalls die in Kapitel 5.2.5 konzipierte Dichtung eingesetzt werden. Wasser von der Modulfläche fließt somit auf die um die Fläche herum angeordneten Anschlussbleche. Von dort muss das Wasser auf die Dachhaut fließen. Dazu ist es erforderlich, dass in dem Anschlussblechbereich keine Lücken an den Stößen der Bleche vorhanden sind. Damit eine Dichtigkeit der Schnittstellen mit der Dachhaut gegeben ist, muss durch die Anschlussbleche eine gewisse Höhendifferenz überbrückt werden. Dies bedingt, dass sich im Bereich der Ecken des Modulfelds vertikal und horizontal stehende Blechkanten der Anschlussbleche senkrecht treffen. Ohne den Einsatz aufwendiger Fügeverfahren, wie beispielsweise Falzen und/oder Löten oder die Verwendung zusätzlicher Bauteile, entsteht an diesen Stößen ein nichtabgedeckter Bereich (Bild 74, links). Unter dem Gesichtspunkt der Montagegerechtheit sollen diese Fügeverfahren vermieden werden, da sie zeitaufwendig sind, eine Mindestgenauigkeit und hohes handwerkliches Geschick erfordern. Der Lösungsansatz besteht für die Detailfunktion *Ableiten von Wasser* folglich aus einem zusätzlichen Bauteil, welches mit den Anschlussblechen überlappt. Damit die Anzahl der Bauteile nicht unnötig hoch und die Montage in der Folge kompliziert und fehlerträchtig wird, soll eine Bauteilgestalt für alle Ecken des Modulfelds verwendbar sein [SCH88]. Konzeptionell ist ein solches Eckbauteil in Bild 74, rechts, gezeigt. Durch eine leicht herzustellende Klebeverbindung zwischen Eckbauteil und Anschlussblechen wird verhindert, dass Wasser unter eines der Anschlusselemente fließt.

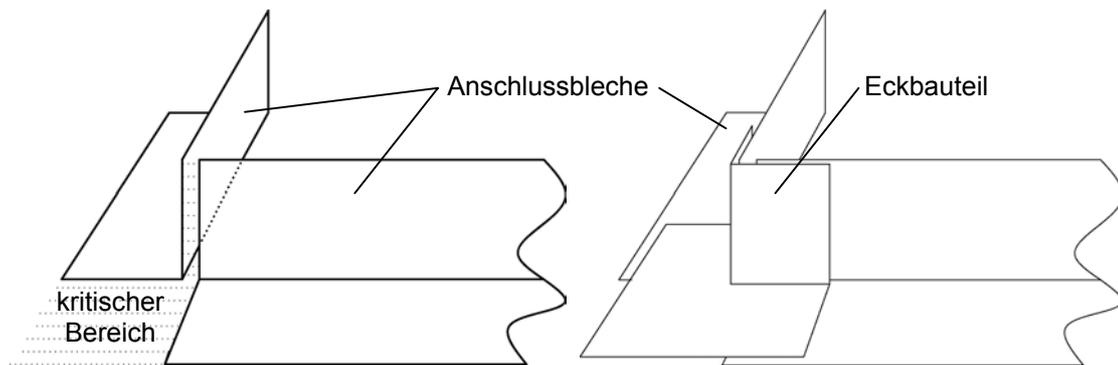


Bild 74: Eckbereich der Anschlussbleche, kritischer Bereich (links), Eckbauteil (rechts)

Entsprechend der Forderungen aus Kapitel 4.4 bezüglich der Aufnahme aller gängigen PV-Module und der möglichen Montage auf allen Dacharten und damit auch der Flexibilität bezüglich verschiedener Ziegelabmessungen, können in Abhängigkeit von der PV-Modulgröße viele unterschiedliche Längen und Breiten des Modulfelds entstehen. Sichergestellt werden muss in allen Fällen, dass an den seitlichen Schnittstellen die Anschlussbleche bis unter den ersten Ziegelbogen reichen (**Bild 75**). Dort muss eine Kante am Anschlussblech so ausgestaltet sein, dass Wasser nicht seitlich vom Blech herunter und in den Dachstuhl hinein fließen kann. Der Abstand zwischen dem Rand des Modulfelds und der Blechkante muss in Abhängigkeit der Parameter Modulbreite und Ziegelgröße variabel sein. Der Lösungsansatz hierzu besteht aus einer biegsamen Schürze, die an dem steifen Anschlussblech wasserdicht angebracht wird (**Bild 76**). Die zur Detailfunktionserfüllung benötigte Kante entsteht, indem diese Schürze im gewünschten Abstand vom Modulfeldrand plastisch entsprechend manuell verformt wird.

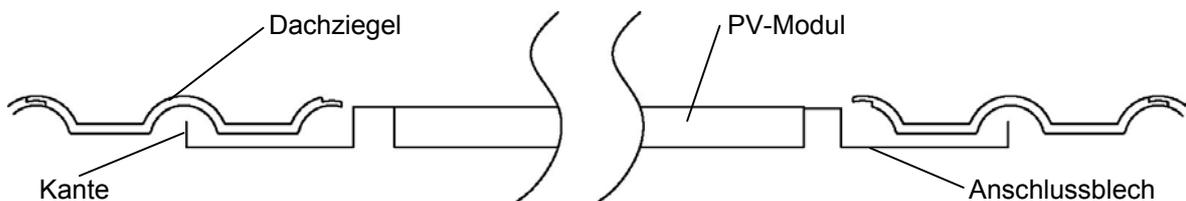


Bild 75: Seitliche Schnittstellen der Anschlussbleche

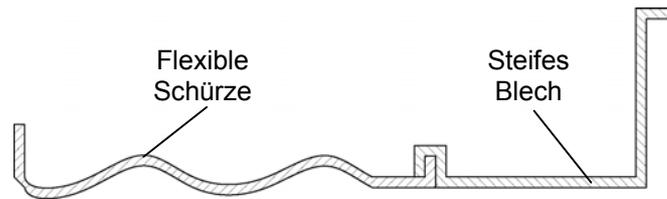


Bild 76: Anschlussblech mit Schürze

An der oberen Schnittstelle des Modulfelds mit der umgebenden Dacheindeckung leitet dieses Anschlussblech mit Schürze Wasser, das von oben auf das Blech läuft, zu den seitlichen Blechen ab. Ferner verhindert es, dass die geringen Wassermengen, die bei ungünstigen Windverhältnissen über die Modulfläche das Dach hinauffließen, in das Dach eindringen (**Bild 77**).

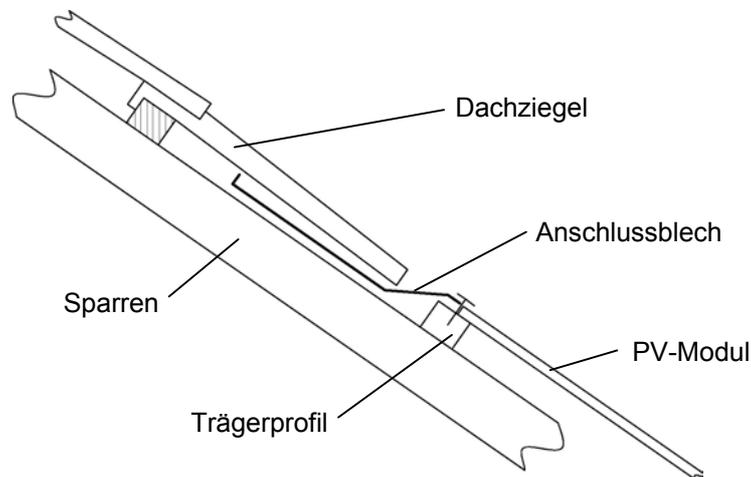


Bild 77: Obere Schnittstelle des Anschlussbleches

An der unteren Schnittstelle des Modulfelds muss das Wasser, das vom Modulfeld und den seitlichen Anschlussblechen anströmt, auf die unten angrenzende Dacheindeckung geleitet werden. Der Lösungsansatz sieht hierzu vor, dass die biegsame Schürze des Anschlussbleches auf die erste angrenzende Ziegelreihe aufgelegt wird (**Bild 78**). Zusätzlich wird durch eine manuelle plastische Verformung entsprechend der Ziegelkontur verhindert, dass Insekten, Vögel, Wind und mit diesem mitgeführtes Material sowie dachaufwärts gedrücktes Wasser eindringen können.

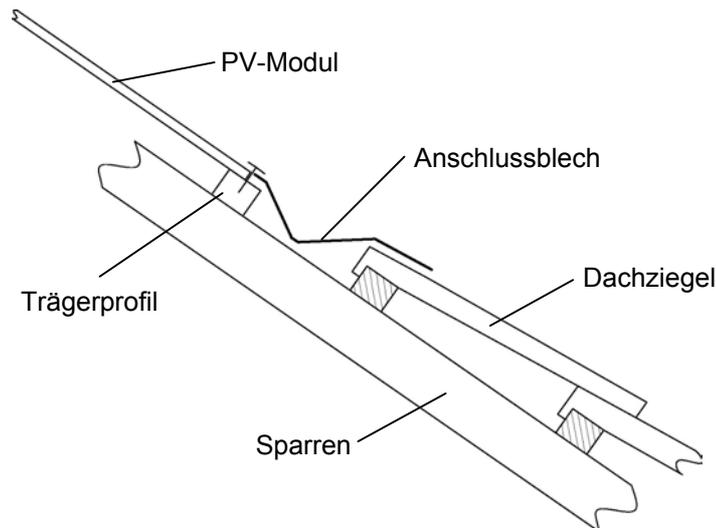


Bild 78: Untere Schnittstelle des Anschlussbleches

5.3 Lösungskombination

Im Sinne der in Kapitel 4.4 aufgestellten Gestaltungshinweise und der allgemeinen Grundsätze für eine montagegerechte Konstruktion, ist die Zusammenlegung von Detailfunktionen anzustreben [DUB01, PAH97, SCH88]. Dazu werden die einsatzortunabhängigen Detailfunktionen (Bild 64) *Aufnahme von Massen und angreifenden Kräften*, *Positionierung der Module* sowie *elektrische Verbindung zwischen den Modulen* über die in Kapitel 5.2 dargestellten Lösungsansätze hinaus in einem Lösungskonzept kombiniert und integriert.

Das Positionieren der PV-Module und Aufnehmen der an Ihnen angreifenden Lasten und Kräfte kann unter Nutzung der Wirkprinzipien Kraft- und Formschluss von einem Bauelement realisiert werden. Im **Bild 79** ist dargestellt, wie sich zusätzlich die elektrische Verbindung zwischen den PV-Modulen beim Auflegen auf die Positionierbaugruppen realisieren lässt. Dazu ist in dem Modulverbinder ein elektrischer Leiter integriert, der beim Auflegen der Module den Kontakt mit deren Anschlüssen herstellt. Die Verbindung zwischen Leiter und Kontakt erfolgt dabei nach dem in Bild 71 dargestellten Prinzip. Die Verschaltung zwischen mehreren PV-Modulen erfolgt wie in Kapitel 5.2.3 dargestellt. Dazu muss der Modulverbinder so gestaltet werden, dass er Module wahlweise leitend oder isolierend verbinden kann. Bei der Verbindungsstelle zwischen vier PV-Modulen muss ferner frei wählbar sein, welche Module leitend miteinander verbunden werden.

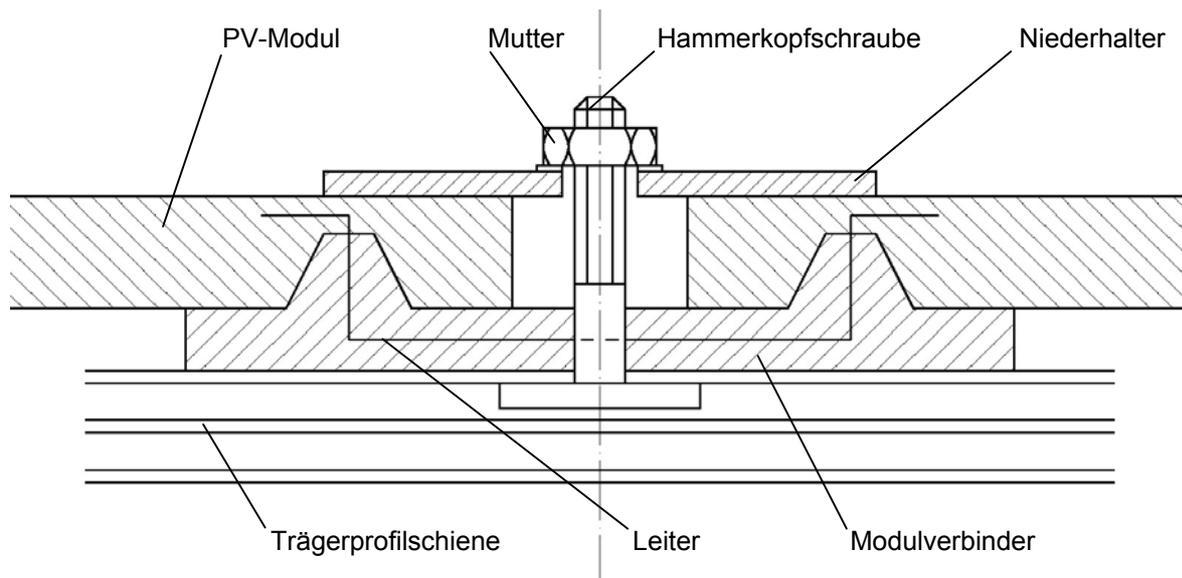


Bild 79: Lösungskombination Modulverbinder

Der Modulverbinder nimmt den Schaft einer Hammerkopfschraube auf, die in der Schlitznut einer Trägerprofilschiene läuft. Der Modulverbinder verfügt über Dorne, die in die PV-Module eingreifen und formschlüssig eine Lagezuordnung zwischen den Modulen herstellen. Durch eine entsprechende Gestaltung des Modulverbinders lassen sich bei ungespannter Hammerkopfschraube alle Freiheitsgrade des Modulverbinders in Bezug auf das Trägerprofil bis auf den translatorischen Freiheitsgrad entlang der Schlitznut einschränken. Die PV-Module werden durch einen Niederhalter beim Spannen der Hammerkopfschraube mit der Sechskantmutter kraftschlüssig in einen festen Verbund mit dem Modulverbinder und dem Trägerprofil gebracht.

Bei der Montage werden im ersten Schritt die Modulverbinder auf den Trägerprofilschienen verteilt, die ihrerseits noch einen Freiheitsgrad in der Y-Richtung besitzen (Bild 80). Nachdem die PV-Module aufgelegt sind und damit der Abstand zwischen jeweils zwei Profilschienen festgelegt ist, werden die Trägerprofilschienen fertigmontiert und die Module mit den Niederhaltern endmontiert (Bild 81). Dabei muss bei der Montage mittels Modulverbindern keine bestimmte Reihenfolge beim Auflegen und Spannen der Elemente eingehalten werden. Dies schließt Montagefehler aus.

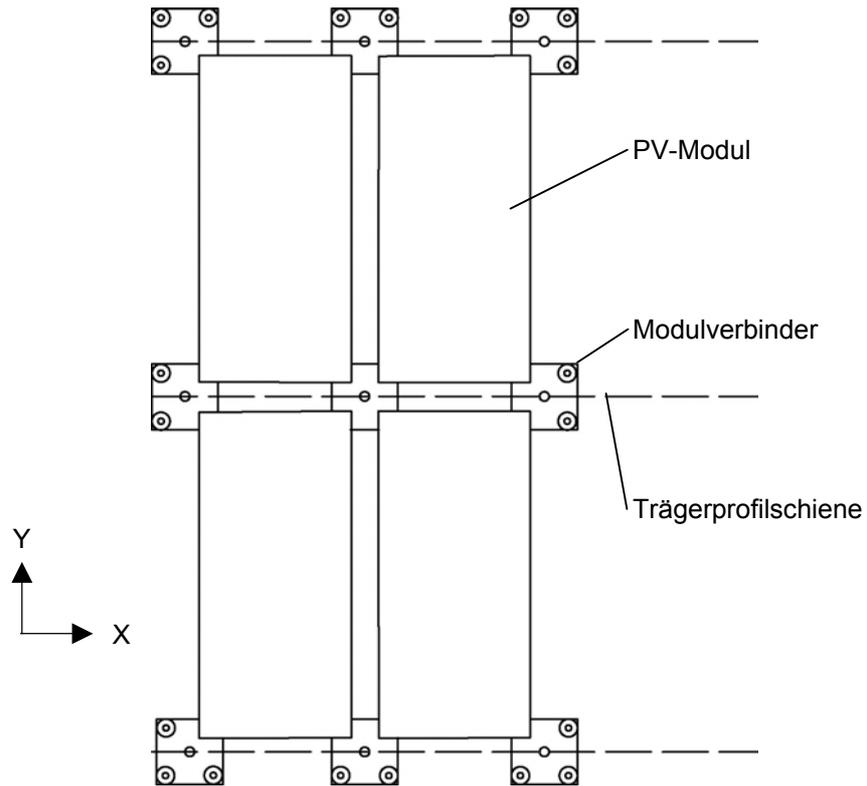


Bild 80: Montageabfolge Modulverbinder (I)

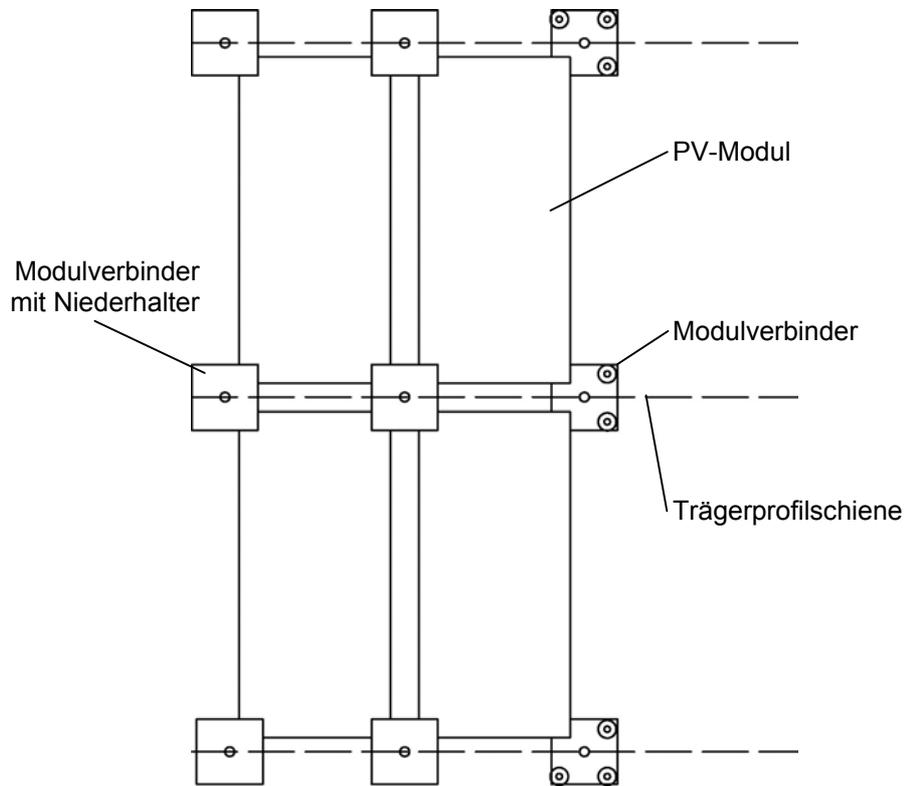


Bild 81: Montageabfolge Modulverbinder (II)

In der Tabelle 21 sind die Eigenschaften der Lösungskombination des Modulverbinders zusammengefasst. In der Folge werden die konzeptionellen Lösungen in eine konstruktive Gestaltung des montagegerechten Befestigungssystems für PV-Generatoren überführt.

Eigenschaften des Modulverbinders
• Sichere Positionierung der PV-Module
• Gute Aufnahme von Massen und angreifenden Kräften
• Integrierte elektrische Verbindung zwischen den PV-Modulen
• Einfaches Auflegen der PV-Module
• Zwischensicherung der PV-Module enthalten
• Einfache Montageabfolge
• Wenige Bauteile

Tabelle 21: Eigenschaften der Lösungskombination des Modulverbinders

6 Konstruktive Gestaltung

Nachdem in Kapitel 5 Lösungsansätze und eine Lösungskombination konzipiert wurden, wird in diesem Kapitel in Anlehnung an die *VDI 2221* [VDI2221] das montagegerechte Befestigungssystem für PV-Generatoren konstruktiv gestaltet. Das System lässt sich den Gestaltungshinweisen aus Kapitel 4.4 entsprechend sowohl als Aufdach- als auch als Indach-Variante aufbauen. Die Varianten des Befestigungssystems unterscheiden sich lediglich in der Befestigungsart der Trägerprofil-schienen am Dach und durch die zusätzlichen Bauteile, die die Indach-Variante zum Dichten und zum Ableiten von Wasser benötigt. Bild 82 stellt die Indach-Variante des montagegerechten Befestigungssystems mit seinen Bestandteilen dar. Die konstruktive Gestaltung der Systembestandteile wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

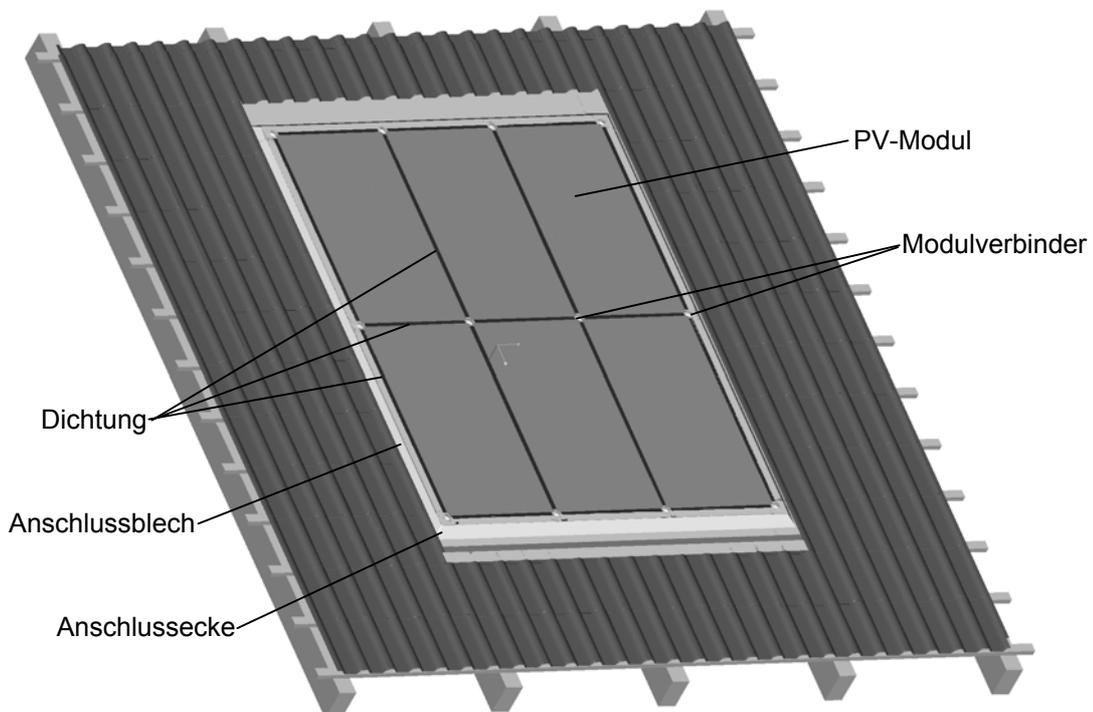


Bild 82: Montagegerechtes Befestigungssystem, Indach-Variante

6.1 Dachbefestigung

Als Trägersystem kommen bei dem montagegerechten Befestigungssystem Aluminiumprofil-schienen zum Einsatz (Bild 83). Bei der Aufdach-Variante des Systems werden die Trägerprofil-schienen laut entsprechendem Lösungsansatz (Kapitel 5.2.4) mit den herkömmlichen Verbindungselementen, wie in Kapitel 2.2.1.1 dargestellt, am Dachstuhl befestigt. Bei der Indach-Variante werden, nachdem die

Dacheindeckung auf der benötigten Fläche abgedeckt worden ist, die Profilschienen direkt an den Dachsparren mittels Holzschrauben befestigt (Bild 84). Der Abstand der Bohrungen in der Profilschiene beträgt 50 mm, sodass bei einer gängigen Sparrenbreite von 200 mm immer mindestens drei Schrauben in jeden Sparren geschraubt werden können. Da die benötigten Abstände zwischen den Trägerprofilschienen von den verwendeten PV-Modulen abhängig sind, kann es bei einem großen PV-Generator mit vielen Modulen erforderlich werden, eine Profilschiene im Bereich einer Dachlatte zu installieren. In diesem Fall muss die Dachlatte auf der Länge der Trägerprofilschiene ausgesägt werden. Die Stabilität des Daches wird dadurch nicht beeinträchtigt, da die Funktion der Dachlatte in diesem Bereich von der Profilschiene übernommen wird.

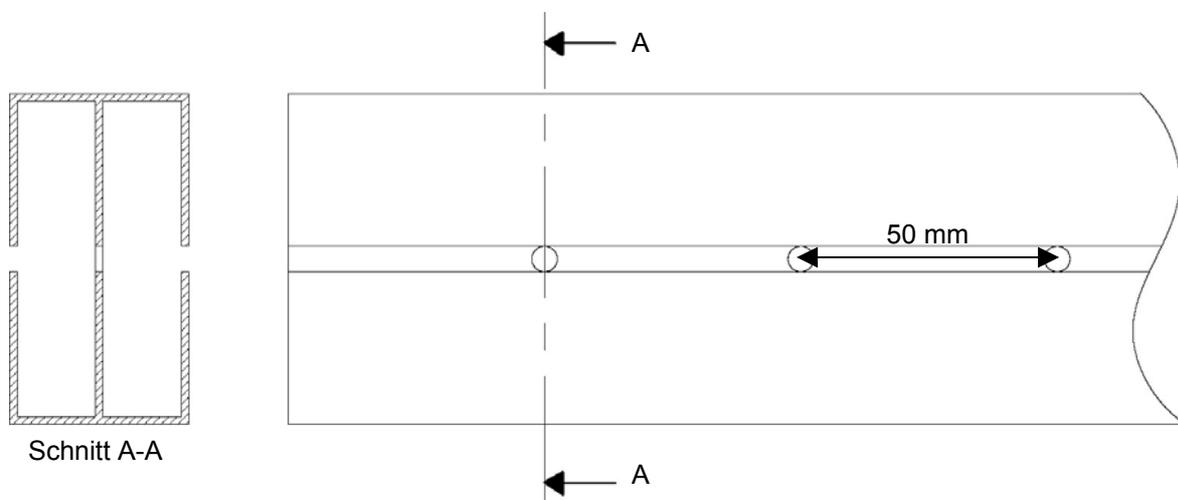


Bild 83: Trägerprofilschiene

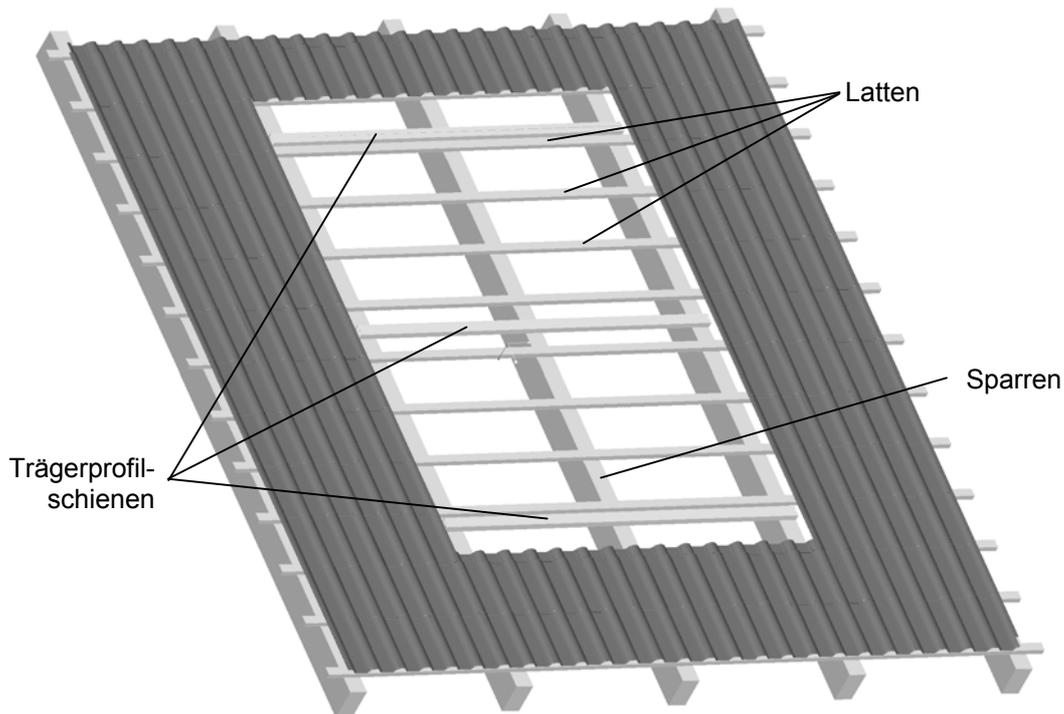


Bild 84: Abgedecktes Dach mit Trägerprofilschienen, Indach-Variante

6.2 Verbindung der PV-Module mit den Trägerprofilschienen

Die Verbindung zwischen den PV-Modulen und den Trägerprofilschienen ist bei Aufdach- und Indach-Variante des montagegerechten Befestigungssystems gleich. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, soll diese Baugruppe die PV-Module positionieren, die Massen und angreifenden Kräfte aufnehmen und die elektrische Verbindung zwischen den Modulen herstellen. Außerdem muss diese Baugruppe gerahmte und ungerahmte PV-Module in verschiedenen Längen, Breiten und Höhen aufnehmen können.

Bild 85 und Bild 86 zeigen diese Baugruppe im eingebauten Zustand mit ungerahmten PV-Modulen. Die Baugruppe besteht aus einer Hammerkopfschraube, Modulverbindern, einem Niederhalter mit Mutter und Deckel und den an den Modulen befestigten Aufnehmern. Die Aufnehmer sind mit den Modulverbindern durch eine Steckverbindung verbunden. Der Niederhalter wird durch die Mutter auf die in der Schlitznut der Trägerprofilschiene laufende Hammerkopfschraube geschraubt und hält so die Steckverbindung zusammen. Die Baugruppe fixiert die Ecken der Module auf den Trägerprofilschienen, so dass die Montage unabhängig von deren Länge und Breite geschehen kann. Die Flexibilität hinsichtlich der Höhe rahmenloser PV-Module und der Größe möglicher Rahmen sowie der elektrischen

Verbindung der Module wird in den folgenden Beschreibungen der einzelnen Bauteile erläutert.

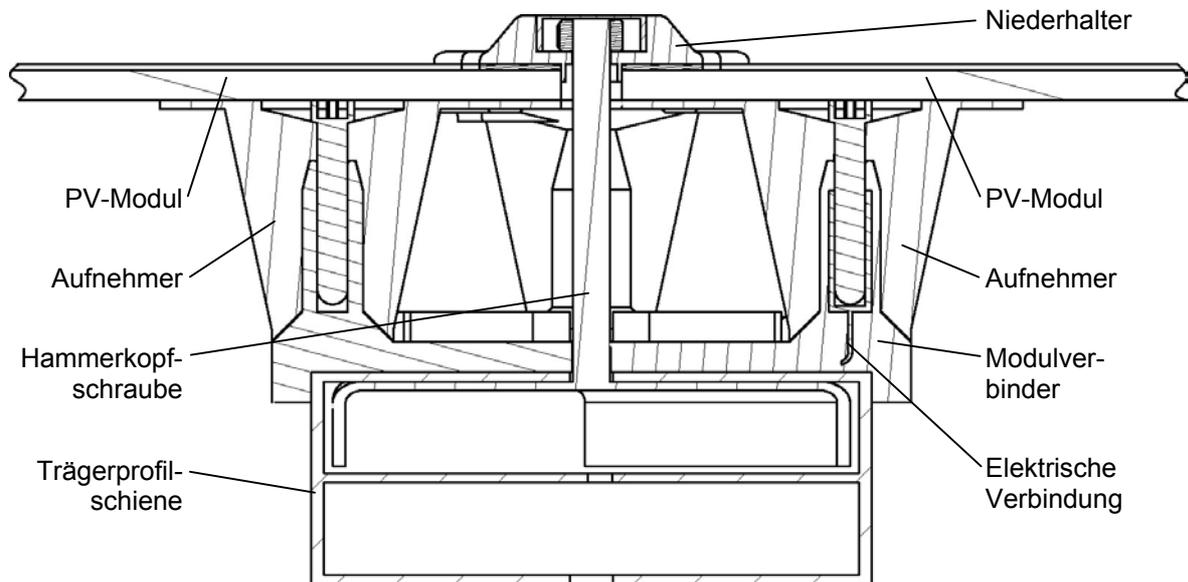


Bild 85: Diagonaler Querschnitt durch die Baugruppe zur Fixierung der PV-Module auf den Trägerprofilschienen

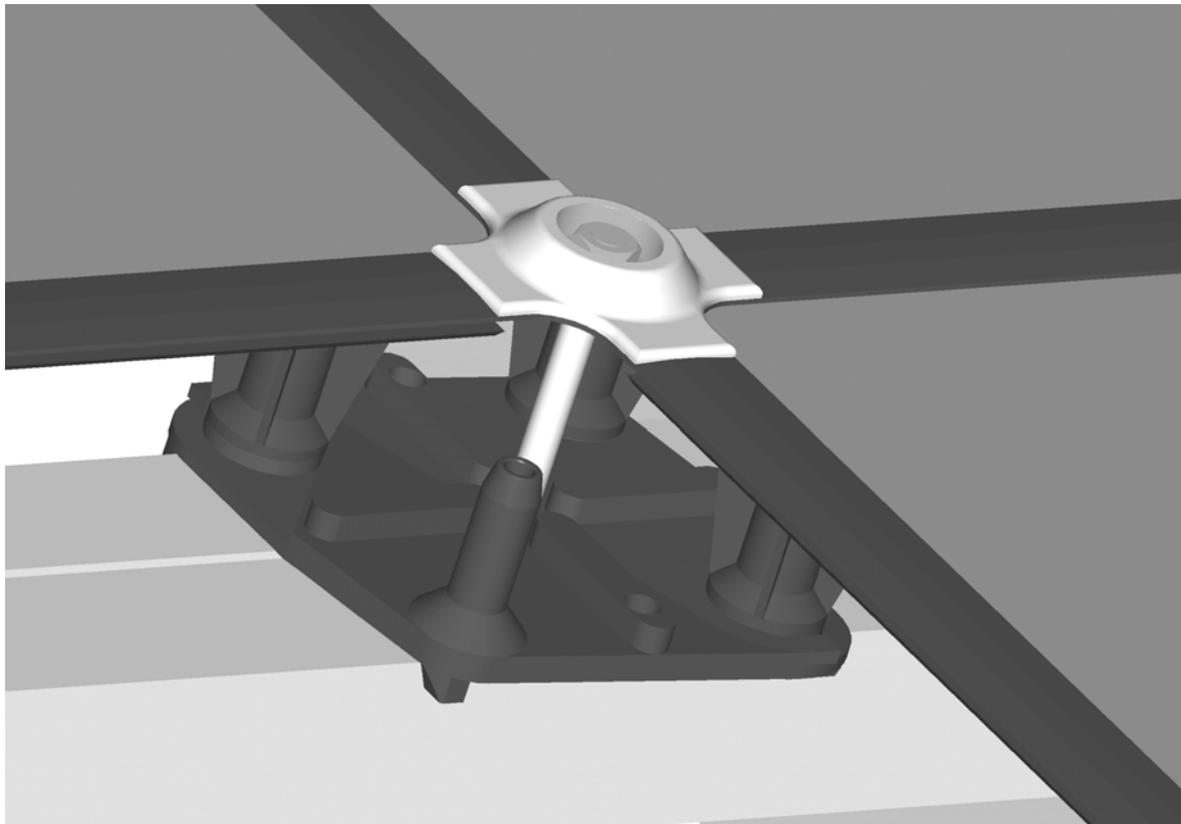


Bild 86: Eingebaute Baugruppe zur Fixierung der PV-Module auf den Trägerprofilschienen, Indach-Variante

6.2.1 Aufnehmer

Der Aufnehmer stellt die Schnittstelle zwischen den PV-Modulen und dem montagegerechten Befestigungssystem dar. Aufnehmer werden auf der Rückseite der PV-Module in allen vier Ecken befestigt. In Kapitel 5.2.3 wurde der Lösungsansatz der elektrischen Verbindung innerhalb des Modulfelds über die Ecken der PV-Module konzipiert. Dieser bedingt, dass die PV-Module in jeder Ecke einen elektrischen Kontakt haben müssen, von denen die jeweils diagonal gegenüberliegenden gleiche Polungen vorweisen müssen (Bild 67). Nicht für dieses System hergestellte Module können entsprechend nachgerüstet werden. Der Aufnehmer ist als Kunststoffspritzgussteil konstruiert (Bild 87). Die Stückkosten werden bei einer Serienproduktion bei ca. EUR 0,03 liegen. Der Aufnehmer besteht aus einer Grundplatte, die als Klebefläche zur Verbindung mit der Rückseite des PV-Moduls dient und einem Zylinder, in den der Stecker des Modulverbinders gesteckt wird. Der Zylinder hat am Ende eine Anschlagfläche und besitzt vier symmetrisch angeordnete Versteifungsrippen.

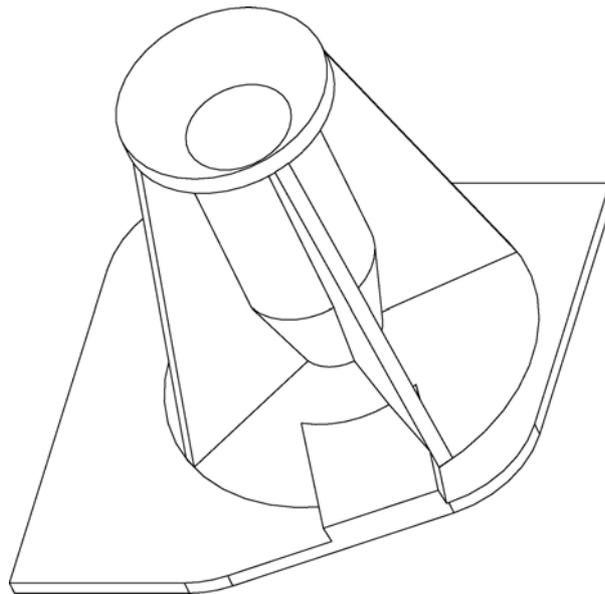


Bild 87: Aufnehmer

Die Steckachse des Aufnehmers muss bei jedem PV-Modul immer denselben Abstand zu den beiden Rändern der Modulecke haben, damit das Modul richtig mit dem montagegerechten Befestigungssystem eingebaut werden kann. Um das Einhalten des korrekten Abstands beim Befestigen des Aufnehmers auf der Modulrückseite sicherzustellen, bietet die Form der Klebefläche des Aufnehmers eine Justier- und Montagehilfe. Dazu ist die Klebefläche derart gestaltet, dass die Steckachse den richtigen Abstand zu den Modulrändern hat, wenn die Klebefläche bündig an einer Ecke des PV-Moduls angelegt wird (Bild 88). Bei einem gerahm-

ten PV-Modul kann der Aufnehmer aufgrund des Rahmens nicht bis in die Ecke des Laminats geschoben werden. Aus diesem Grund ist die Klebefläche des Aufnehmers asymmetrisch gestaltet und bietet ebenfalls eine Justier- und Montagehilfe bezüglich des korrekten Abstands der Innenseite der Ecke eines Modulrahmens zur Steckachse (Bild 89).

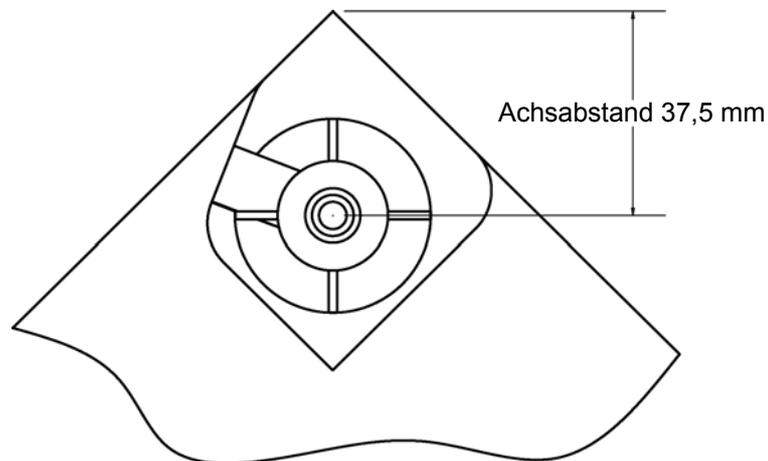


Bild 88: Aufnehmer an einem rahmenlosen PV-Modul

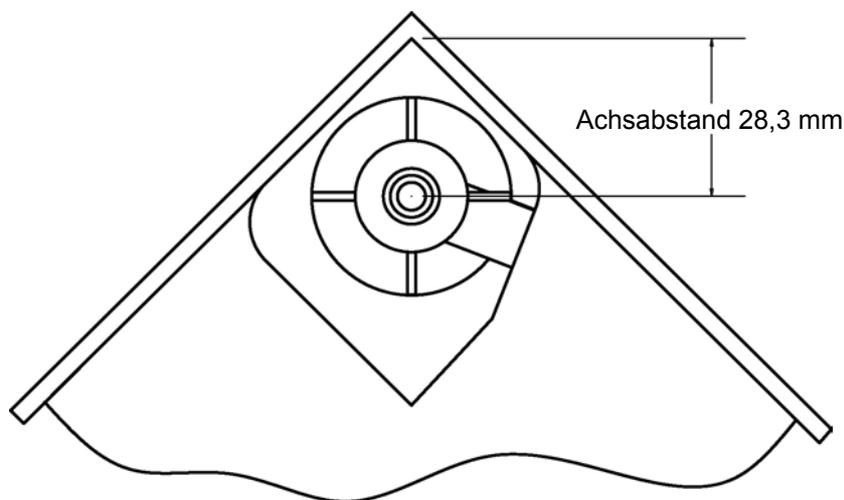


Bild 89: Aufnehmer an einem gerahmten PV-Modul

Zur Herstellung der elektrischen Verbindung mit dem Modulverbinder besitzt der Aufnehmer im Inneren des Zylinders einen Kontaktstift (Bild 90). Dieser besitzt vier FüÙe, die auf der Fläche stehen, an die der Aufnehmer angeklebt wird. Nachdem der Kontaktstift in die dafür vorgesehene Bohrung des Aufnehmers eingeführt wurde, liegt er sowohl an der Kante der Bohrung als auch an der PV-Modulfläche an und ist ohne zusätzliche Klebeverbindung gesichert. Der Kontaktstift ist kürzer als der Aufnehmer und endet 7 mm vor der Öffnung. Da die Öffnung nur einen

Durchmesser von 10 mm besitzt, ist bei der Montage ein sicherer Schutz vor Berührung gegeben.

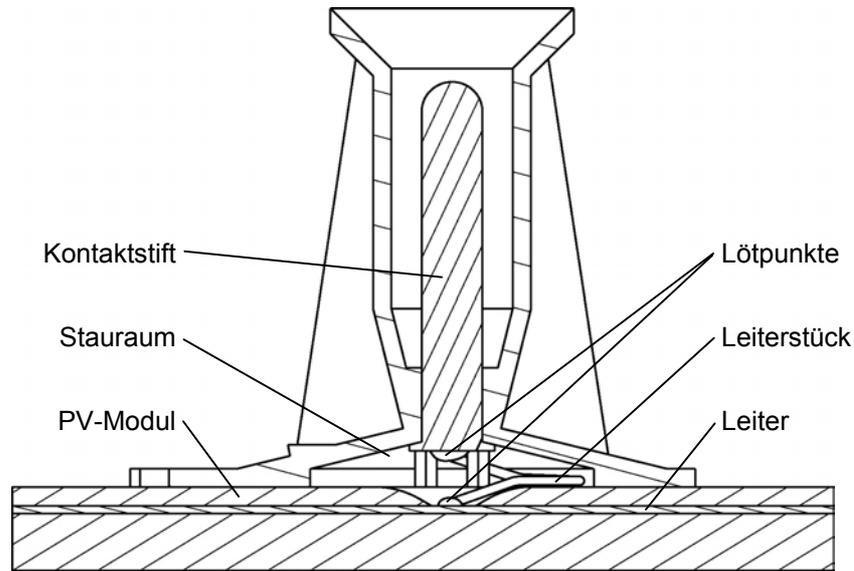


Bild 90: Schnitt durch den Aufnehmer bei einem System-Modul

Bei den System-Modulen (Bild 67, links) verlaufen Leiterbahnen unter den Punkten, an denen die Aufnehmer montiert werden. Nachdem das Laminat direkt unter der Steckachse des Aufnehmers geöffnet wurde, wird der Kontaktstift an der Fläche zwischen seinen Füßen mit der Leiterbahn verlötet. Da man den Aufnehmer zum Löten abheben muss, wird die Verbindung mittels eines kurzen Leiterstücks realisiert. Beim Schließen des Laminats durch Ankleben des Aufnehmers verbleibt das kurze Leiterstück in dem kreisförmigen Stauraum unter dem Kontaktstift. Bei der Nachrüstung von beliebigen herkömmlichen PV-Modulen werden die vier Aufnehmer mit den am Modul vorhandenen Anschlüssen verkabelt (Bild 67, rechts). Hierzu benötigt der Aufnehmer einen Eingang für das Kabel von der Anschlussdose des PV-Moduls. Der Aufnehmer besitzt am Fuß einen Steg, in welchen zu diesem Zweck durch einen Wechselkern bei dem Spritzgusswerkzeug ein Kabelkanal geformt wird. Dieser Kabelkanal hat einen kleineren Querschnitt als das Kabel. Die beim Einbau entstehende Flächenpressung dichtet den Kabeleingang zusammen mit dem Klebstoff zwischen der Unterseite des PV-Moduls und dem Aufnehmer ab (Bild 91).

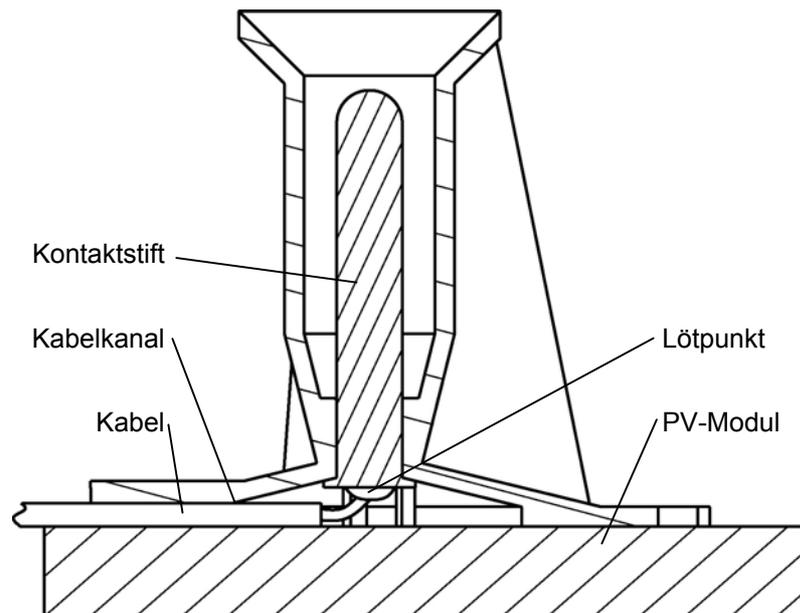


Bild 91: Schnitt durch den Aufnehmer bei einem herkömmlichen PV-Modul

Das Kabel muss beim Nachrüsten gerahmter und ungerahmter PV-Module nach außen geführt werden können, unabhängig davon, welche der beiden Ecken der Klebefläche des Aufnehmers bündig in der Ecke der Modulfläche endet. Damit das Kabel nicht zwischen Rahmen und Aufnehmer eingeklemmt wird, endet der Steg mit dem Kabelkanal an einer asymmetrisch angeordneten Stirnfläche des Aufnehmers. **Bild 92** zeigt die Einbaufälle des Aufnehmers und den jeweiligen Weg des Kabels nach dem Austritt aus dem Kabelkanal.

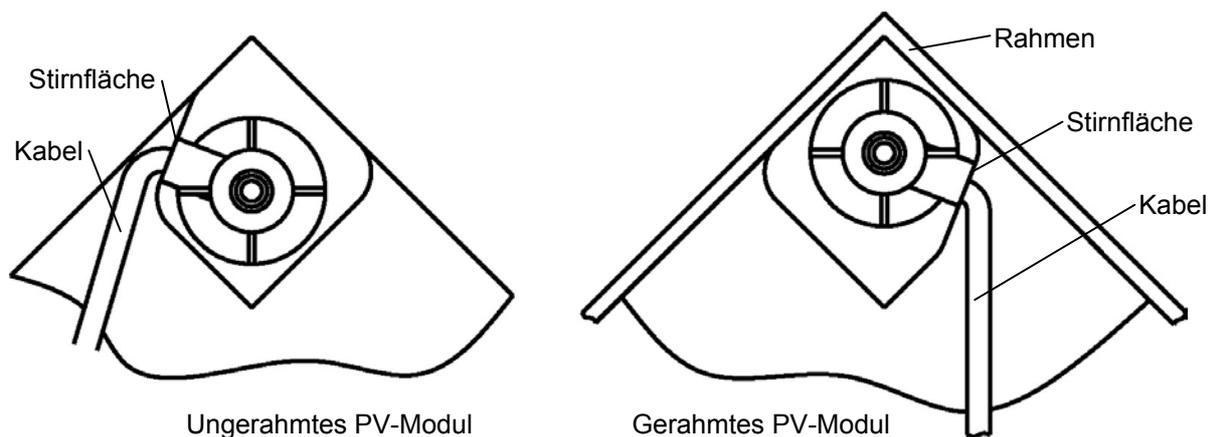


Bild 92: Einbaufälle des Aufnehmers bei herkömmlichen PV-Modulen

6.2.2 Modulverbinder

Der Modulverbinder ist das Kernstück des montagegerechten Befestigungssystems für PV-Generatoren. Er verbindet die Aufnehmer und damit auch die

PV-Module mit den Trägerprofilschienen, positioniert bei der Montage die Module zueinander und beinhaltet die elektrische Verbindung. Wie der Aufnehmer ist auch der Modulverbinder als Kunststoffspritzgussteil gestaltet. Er kann in der Mitte eines Modulfelds vier Modulecken, an den Seiten zwei und an den Ecken des Modulfelds nur eine Modulecke aufnehmen (vgl. Bild 80). Gleichzeitig verbindet er die PV-Module gemäß des Lösungsansatzes in Kapitel 5.2.3 an einem Punkt, an dem vier Module aufeinandertreffen, jeweils paarweise horizontal oder vertikal elektrisch leitend. An einem Punkt, an dem zwei Ecken aneinander liegen, kann der Modulverbinder diese wahlweise leitend oder nichtleitend verbinden. Und an einem Eckpunkt des Modulfelds kann er die Modulecke nichtleitend aufnehmen. Der Modulverbinder ist dazu konstruktiv als ein Zweierstecker gestaltet, der sich mit einem zweiten Modulverbinder zu einem Viererstecker zusammenschließen lässt (Bild 93). An der geraden Seite der Grundplatte hat der Modulverbinder hierzu einen Haken, welcher bei der Montage um einen Stecker des jeweils anderen Modulverbinders greift. Es gibt den Modulverbinder mit und ohne elektrische Verbindung zwischen den beiden Steckern. Somit lassen sich alle in Kapitel 5.2.3 beschriebenen möglichen Verschaltungen durch die Kombination eines leitenden Modulverbinders und eines nichtleitenden Modulverbinders oder zweier leitender Modulverbinder realisieren. Leitende und nicht leitende Modulverbinder haben verschiedene Farben, um ein Vertauschen bei der Montage auszuschließen. Der nicht leitende Modulverbinder ist schwarz, während der leitende rot ist. Die Modulverbinder lassen sich als Zweier und Vierer horizontal und vertikal an der Trägerprofilschiene montieren (Bild 94).

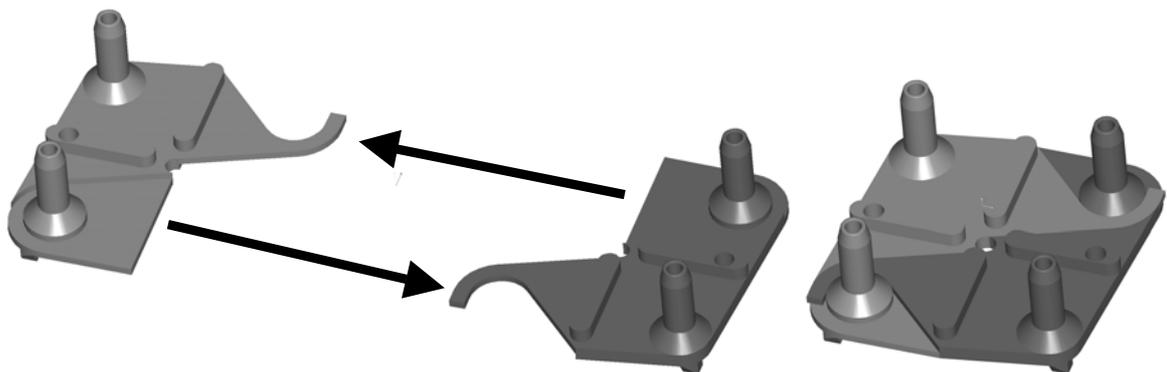


Bild 93: Modulverbinder, einzelne Zweierstecker (links) und montiert zum Viererstecker (rechts)

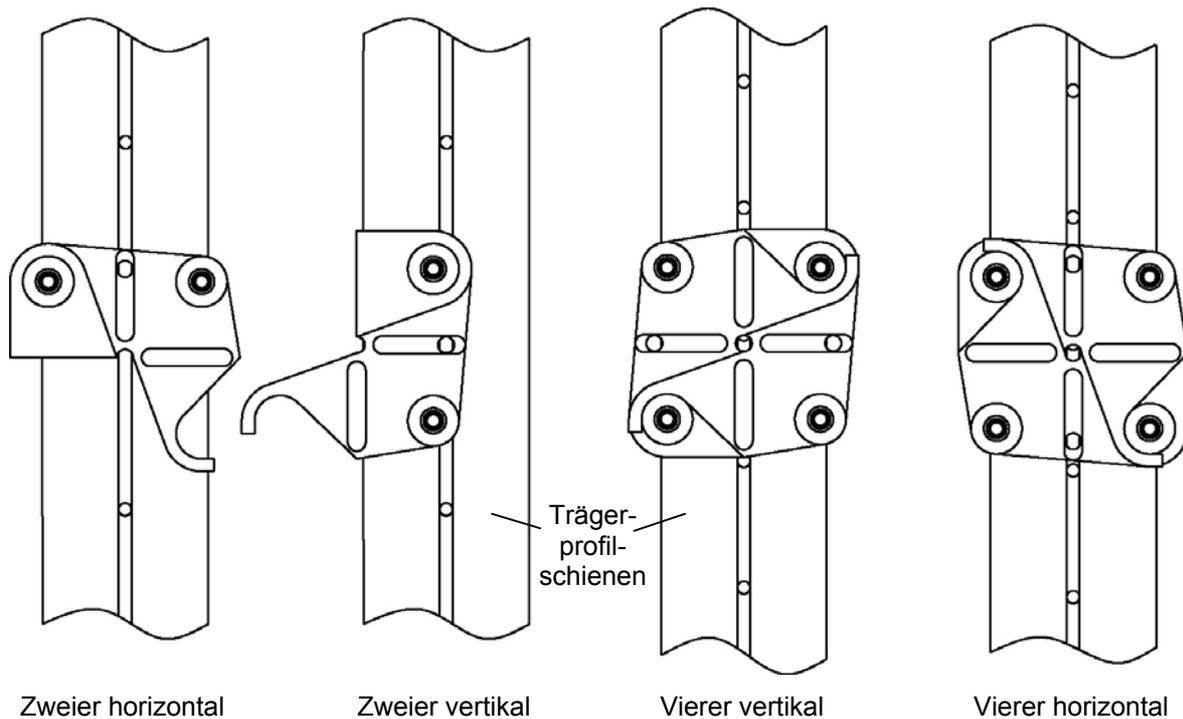


Bild 94: Montagemöglichkeiten eines oder zweier Modulverbinder

An der Unterseite der Grundplatte des Modulverbinders befinden sich Führungskeile. Diese stellen bei der Montage sicher, dass der Modulverbinder sich nicht um die Achse der Hammerkopfschraube drehen kann. Bei der Montage eines Modulverbinders laufen die Keile in der Schlitznut oder an den Außenkanten der Trägerprofil-schiene (Bild 95). Bei zwei kombinierten Modulverbindern besitzen die Führungskeile in beiden Richtungen der Ebene der Grundplatte einen der Profilschienenbreite entsprechenden Abstand. So liegen die Keile bei der Montage eines Vierersteckers immer an den Außenflächen der Trägerprofil-schienen an (Bild 96).

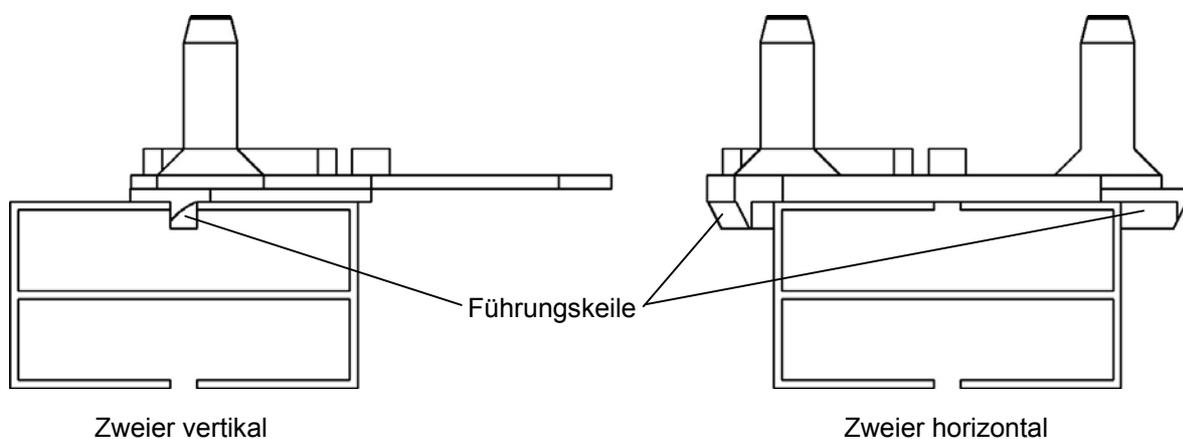


Bild 95: Modulverbinder als Zweierstecker auf Trägerprofil-schienen

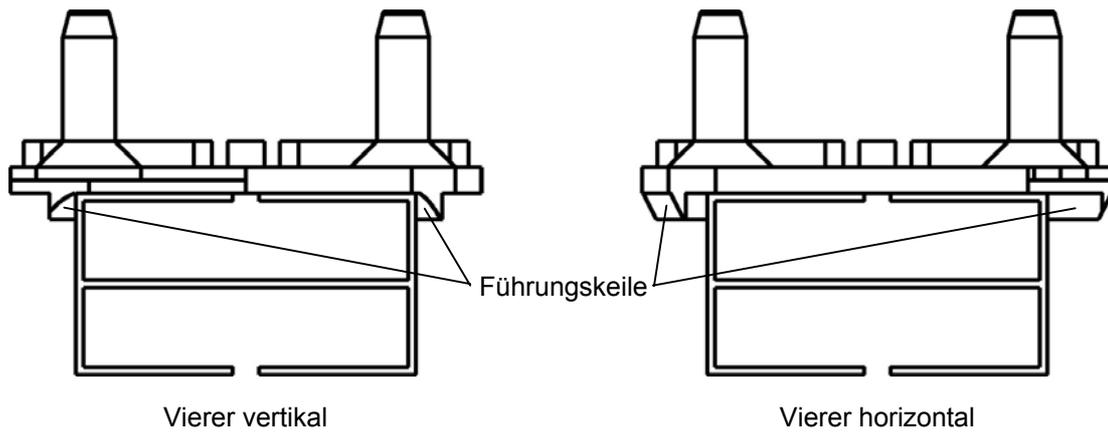


Bild 96: Modulverbinder als Viererstecker auf Trägerprofilschienen

Auf der Oberseite der Grundplatte des Modulverbinders befinden sich ebenfalls zwei Führungskeile. An Ihnen liegen die Modulrahmen an, wenn gerahmte PV-Module montiert werden (Bild 97). Bei ungerahmten PV-Modulen haben sie keine Funktion. Wenn der Modulverbinder als Zweierstecker montiert wird, wird die Hammerkopfschraube zur Befestigung an der Trägerprofilschiene durch eine Bohrung in einem der beiden Keile auf der Grundplatte des Modulverbinders geführt (Bild 98, links). Bei der Montage einer Kombination zweier Modulverbinder als Viererstecker wird die Hammerkopfschraube durch das Loch geführt, das aus den beiden halben Bohrungen an den Seiten der Modulverbinder entsteht (Bild 98, rechts).

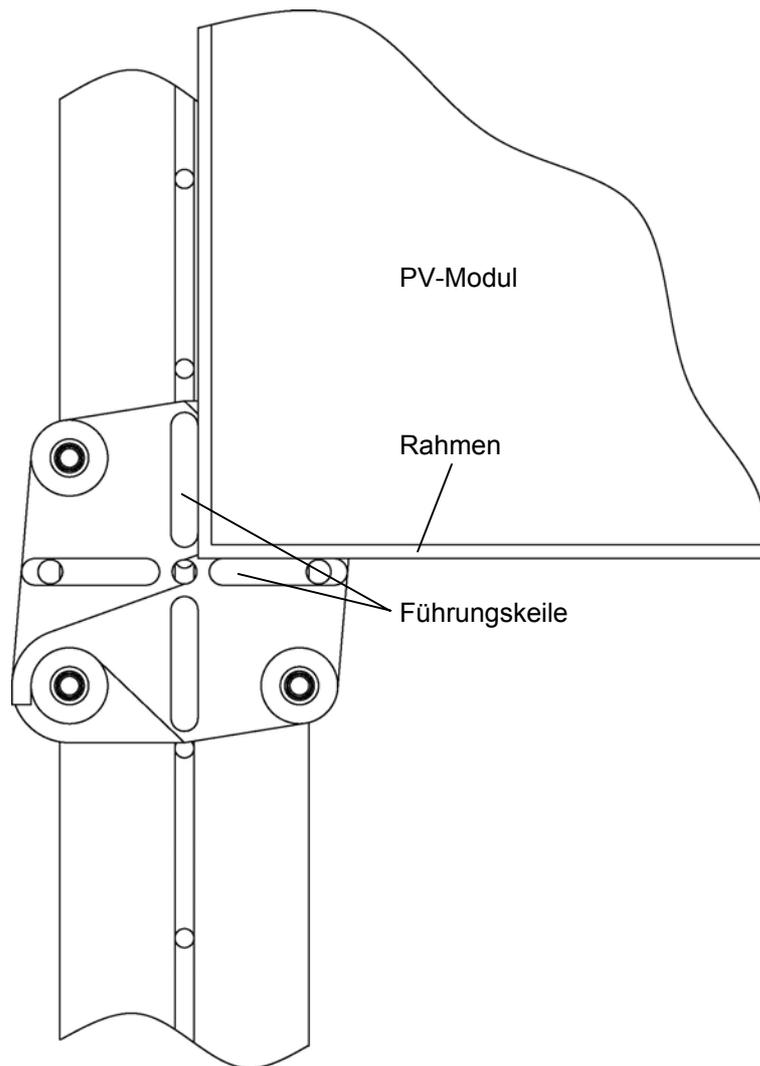


Bild 97: Modulverbinder als Viererstecker mit einem gerahmten PV-Modul

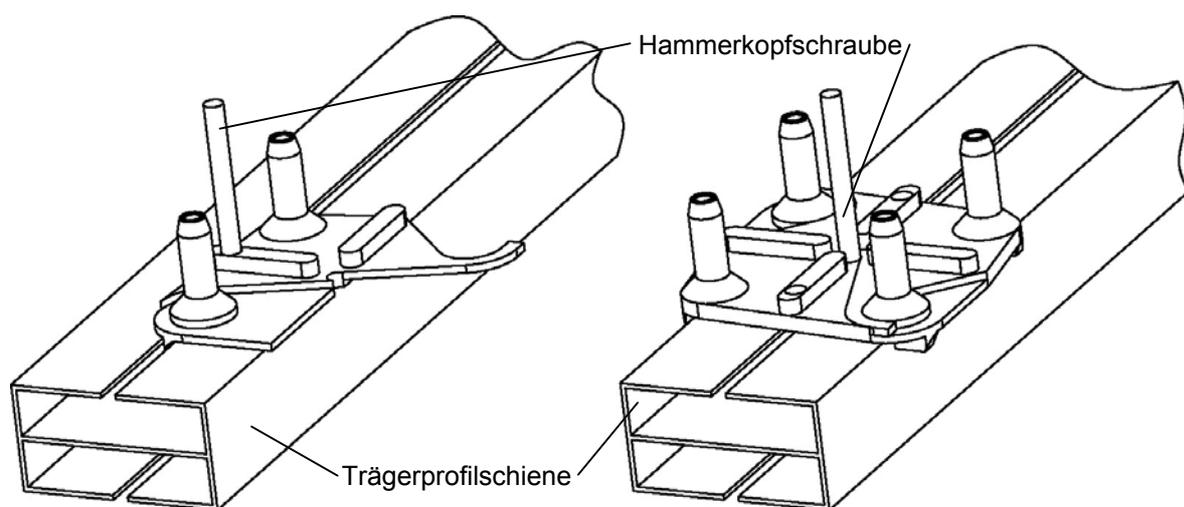


Bild 98: Zweierstecker (links) und Viererstecker (rechts) auf Trägerprofilschiene montiert

6.2.2.1 Nichtleitend

Die Stecker auf der Grundplatte des Modulverbinders passen genau in die Aufnehmer an den PV-Modulen. Der konische Teil des Steckers und die Aufweitung an der Öffnung des Aufnehmers dienen als Einführschrägen und erleichtern die Montage der Module. Durch die Steckverbindung ist der Abstand zwischen PV-Modulfläche und Grundplatte des Modulverbinders gegeben, die Führungslänge der Steckverbindung beträgt 30 mm. Ist bei der Montage von gerahmten PV-Modulen die Rahmenhöhe größer als der Abstand zwischen Modulfläche und Grundplatte des Modulverbinders, so wird der Stecker nicht bis zum Anschlag in den Aufnehmer geschoben. Durch die konstruktiv entsprechend groß gestaltete Führungslänge der Steckverbindung führt diese Abweichung von wenigen Millimetern zu keiner Beeinträchtigung der Stabilität der Verbindung. Bild 99 zeigt einen nichtleitenden Modulverbinder zusammen mit zwei Aufnehmern im Schnitt. Die Stückkosten eines nichtleitenden Modulverbinders werden als Kunststoffspritzgussteil bei einer Serienproduktion bei ca. EUR 0,01 liegen.

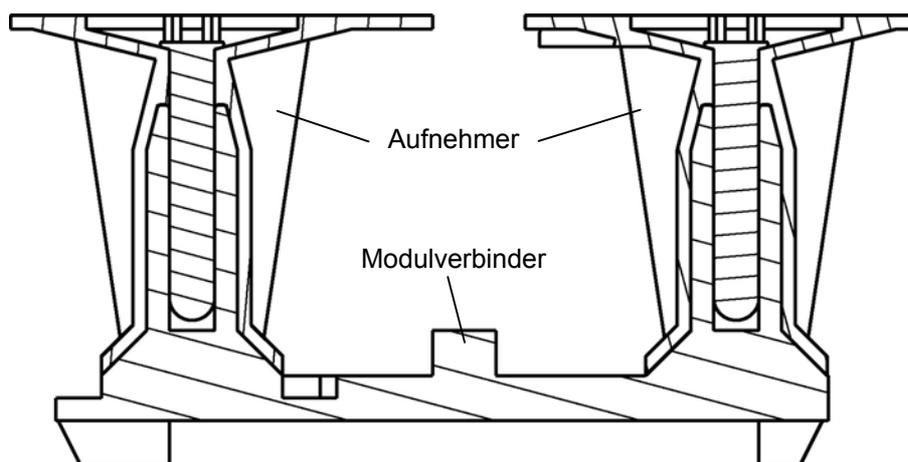


Bild 99: Schnitt durch einen nichtleitenden Modulverbinder mit Aufnehmern

6.2.2.2 Leitend

Der leitende Modulverbinder hat dieselbe äußere Form wie der nichtleitende, enthält aber zusätzlich im Innern eine elektrische Verbindung zwischen den beiden Steckern. Dieser Leiter wird bei der gewählten Fertigungsmethode bei der Herstellung mit eingespritzt. Der Leiter besteht aus zwei Kupferhülsen, die mit einem breiten Kupferdraht verbunden sind. Der Querschnitt des Kupferdrahts ist mit 2 mm^2 so gewählt, dass beim Betrieb des PV-Generators mit keiner beeinträchtigenden Wärmeentwicklung durch den fließenden Gleichstrom gerechnet werden muss. Zusätzlich steigert ein großer Querschnitt die Biegesteifigkeit des Leiterteils und erleichtert somit seine Handhabung und Montage im Spritzgussprozess. Bei einer

Serienproduktion werden die Stückkosten eines leitenden Modulverbinders bei ca. EUR 0,03 liegen. Bild 100 zeigt einen Schnitt durch einen leitenden Modulverbinder.

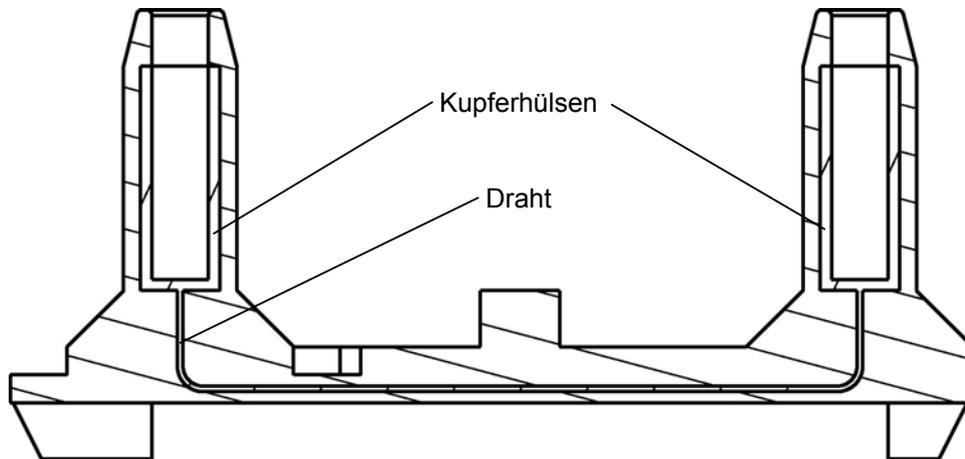


Bild 100: Schnitt durch einen leitenden Modulverbinder

In Bild 101 ist der Schnitt durch einen leitenden Modulverbinder mit aufgesteckten Aufnehmern abgebildet. Die Kontaktstifte der Aufnehmer stecken in den Kupferhülsen des Modulverbinders und stellen den elektrischen Kontakt her. Bei rahmenlosen PV-Modulen beträgt die Kontaktlänge 20 mm. Bei gerahmten PV-Modulen kann sie kürzer sein. Da die Unterschiede bei den Modulrahmenhöhen aber sehr gering sind, führt diese Abweichung zu keiner Beeinträchtigung der elektrischen Verbindung oder der Stabilität. Bei der Montage des Befestigungssystems besteht durch einen nur 5 mm messenden Durchmesser der Öffnung am Ende der Stecker des Modulverbinders keine Gefahr des Kontakts mit stromführenden Teilen. Die stromführenden Teile müssen weiterhin vor Feuchtigkeit geschützt sein. Eine montageerleichternde konische Gestaltung der Kontaktfläche würde eine dichte Verbindung nur garantieren, wenn sie durch die Schraubverbindung mit Druck beaufschlagt werden würde. Das wäre bei rahmenlosen PV-Modulen oder PV-Modulen mit durchschnittlichen Rahmenhöhen der Fall. Bei PV-Modulen mit überdurchschnittlich hohen Rahmen ergäbe sich ein millimetergroßer Spalt und die Dichtheit der Verbindung wäre nicht mehr sichergestellt. Zur Sicherstellung des Schutzes stromführender Teile vor Feuchtigkeit ist deshalb der überwiegende Teil der Kontaktfläche zwischen Stecker und Aufnehmer zylindrisch gestaltet.

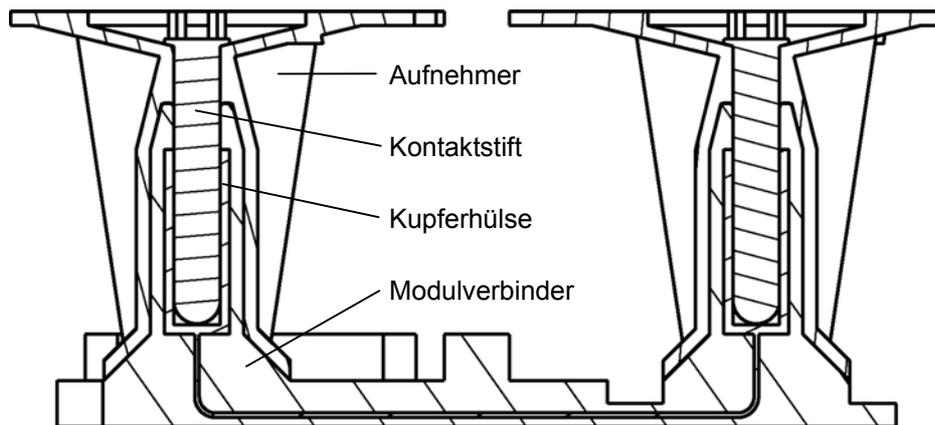


Bild 101: Schnitt durch einen leitenden Modulverbinder mit Aufnehmern

6.2.2.3 Endstück

Wie in Kapitel 5.2.3 erläutert wurde, werden die PV-Module auf dem Dach elektrisch zu einer Reihe verbunden, die in einem Modulverbinder beginnt und endet. An dieser Stelle müssen der positive und der negative Pol des PV-Generators getrennt durch das Dach zum Wechselrichter geleitet werden. Dies wird mittels einer Variante des Modulverbinders realisiert. Von dieser Modulverbindervariante wird in dem montagegerechten Befestigungssystem nur ein Stück benötigt. Aus wirtschaftlichen Gründen wird dieses nicht in einer eigenen Spritzgussform, sondern in der Produktion durch Nachbearbeitung eines nichtleitenden Modulverbinders hergestellt. Diese Variante des Modulverbinders ist blau, um sie von den roten leitenden und den schwarzen nichtleitenden zu unterscheiden. In einen nichtleitenden Modulverbinder (vgl. Bild 99) werden von unten in die Grundplatte, entlang der beiden Steckachsen, zwei Bohrungen gesetzt. Die Bohrungen enden 5 mm vor der Spitze des Steckers und haben einen Durchmesser von 7 mm. Außerdem werden von jeder Bohrung an den naheliegenden Rand ein Kabelkanal in die Unterseite der Grundplatte gefräst. In jede Bohrung wird eine Kupferhülse mit angelötetem Kabel so weit eingeschoben, dass sie an die durch die Bohrung entstandene Kante stößt. Die Bohrungen werden dann mit Heißkunststoff aufgefüllt. Durch die Füllung mit Heißkunststoff sind die stromführenden Teile abgedichtet und die Verbindung kann die Kräfte aufnehmen, die der Kontaktstift des Aufnehmers auf die Kupferhülse des Steckers bei der Montage ausübt. Bei der Montage der Endstück-Variante des Modulverbinders an einer Trägerprofilschiene werden die Kabel durch den jeweiligen Kabelkanal nach außen geführt. Bild 102 zeigt die Endstück-Variante des Modulverbinders mit allen relevanten Schnitten. Die Stückkosten dieses Endstücks werden aufgrund der erforderlichen Nacharbeiten nach dem Spritzgussprozess bei ca. EUR 0,62 liegen.

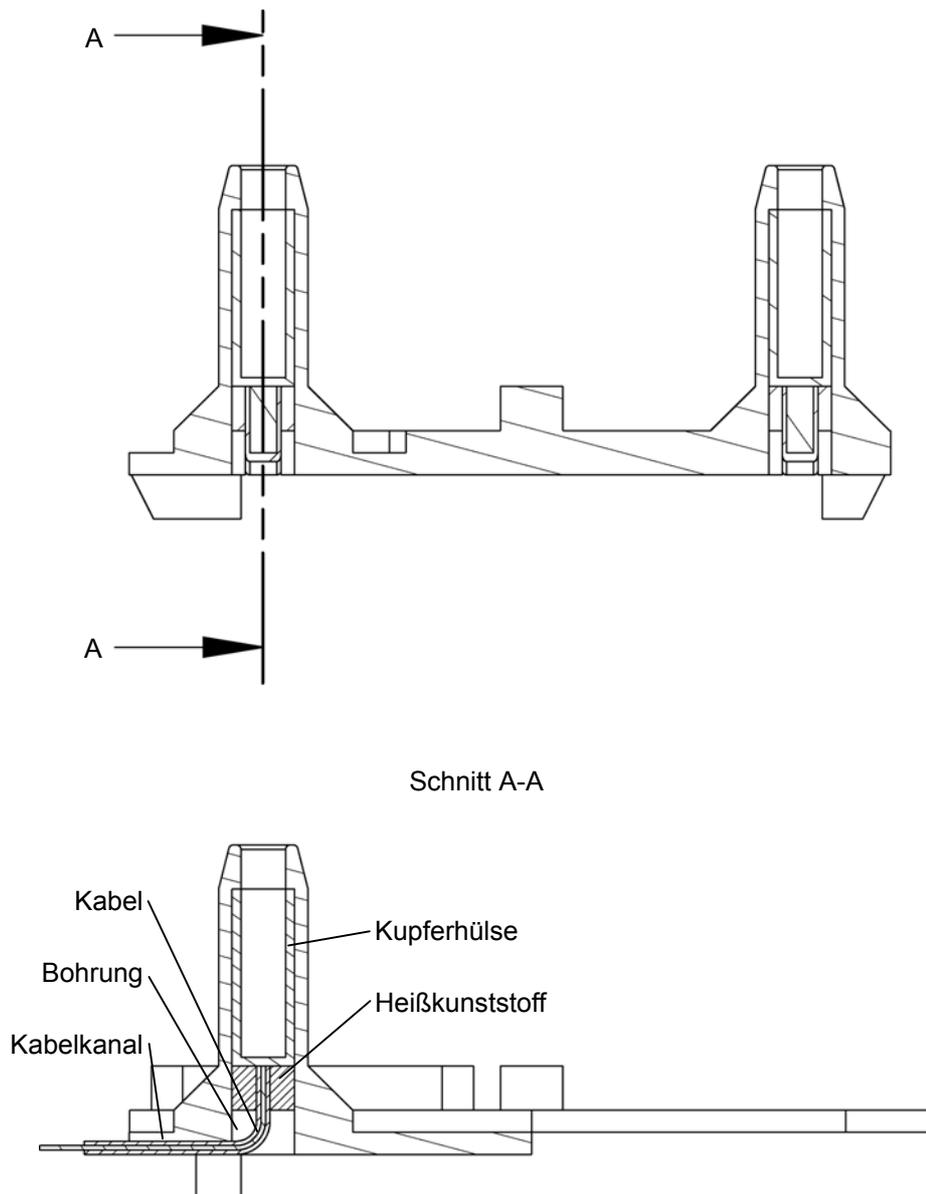


Bild 102: Endstück-Variante des Modulverbinders

6.2.3 Niederhalter und Hammerkopfschraube

Die Verbindung zwischen den Aufnehmern der PV-Module, dem Modulverbinder und der Trägerprofilschiene wird mit Hammerkopfschraube und Niederhalter mit Mutter und Deckel gesichert (Bild 103). Damit bei der Montage des Befestigungssystems die Hammerkopfschraube leicht in der Schlitznut der Trägerprofilschiene (vgl. Bild 83) verschoben und positioniert werden kann, ist der Fuß der Hammerkopfschraube etwa 2 mm schmaler und 1 mm flacher als die Abmaße der Schlitznut. Aus Gewichts- und Kostengründen ist die Konstruktion des Fußes der Hammerkopfschraube nicht massiv, sondern aus gebogenem Blech gestaltet.

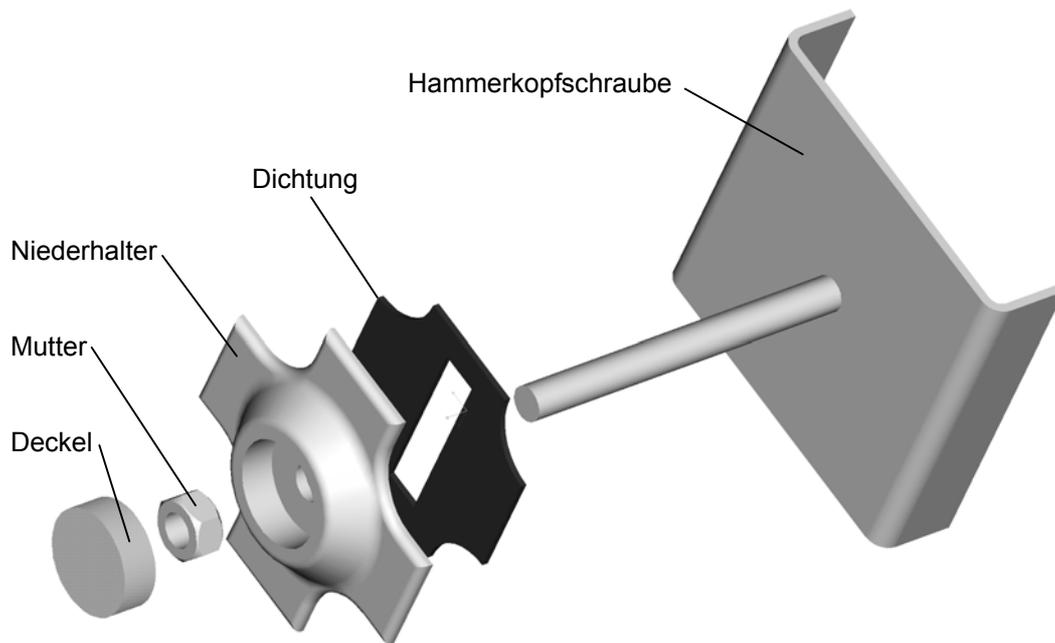


Bild 103: Hammerkopfschraubenverbindung

Der Niederhalter besteht aus einer kreuzförmigen Platte mit einem Durchgangsloch in der Mitte. Die kreuzförmige Konstruktion wurde gewählt, um die auf den PV-Modulen durch den Niederhalter verdeckte Fläche zu minimieren (Bild 104). Die Enden des Kreuzes sind so gestaltet, dass der Niederhalter im Falle der Montage eines Zweier-Modulverbinders nicht über den Rand des Modulfelds hinausragt (Bild 105).

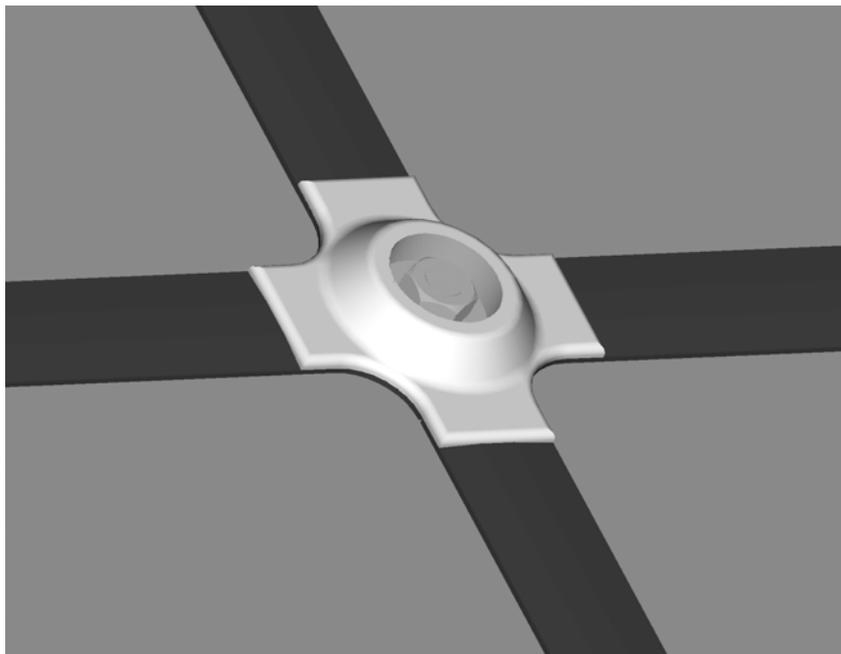


Bild 104: Eingebauter Niederhalter, Indach-Variante

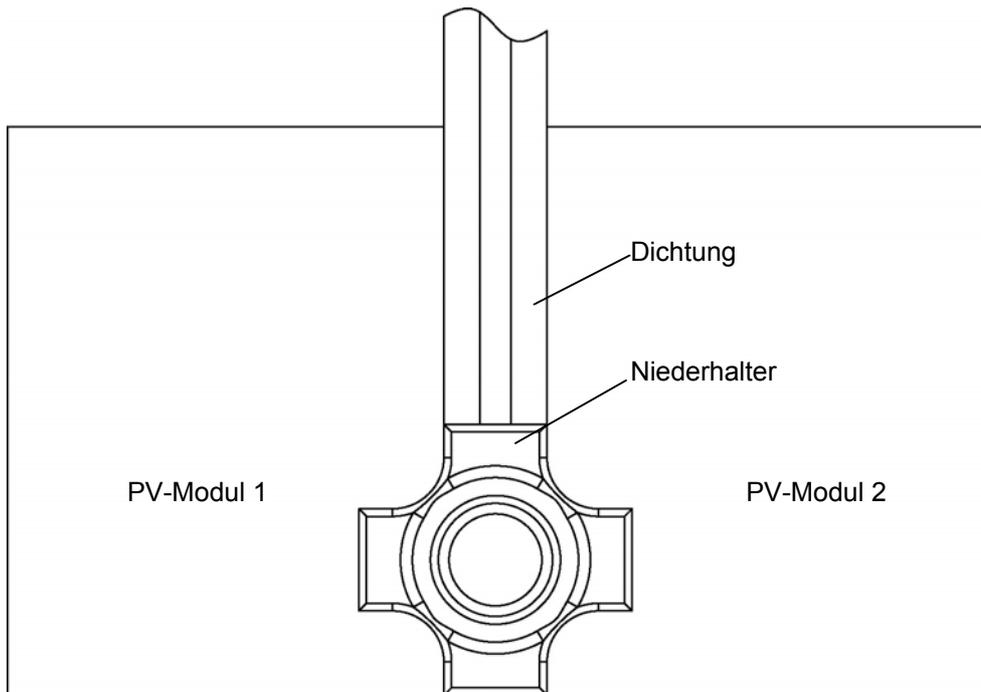


Bild 105: Niederhalter eines Zweier-Modulverbinders am Modulflächenrand, Indach-Variante

An der Unterseite besitzt der Niederhalter schmale Führungskeile (**Bild 106**). Diese passen in den durch die Position der Aufnehmer an den PV-Modulen und dem Modulverbinder festgelegten Spalt zwischen den PV-Modulen. Dadurch wird bei der Montage verhindert, dass sich der Niederhalter beim Festziehen der Mutter mitdreht. Die kraterförmige Gestaltung der Oberseite des Niederhalters dient dazu, die Mutter aufzunehmen und die Schraubenverbindung zu schützen. Um eine leichte Demontage des Systems auch nach langer Verweildauer in der Einsatzumgebung sicherzustellen, wird der Krater mit einem Kunststoffdeckel abgedeckt und gedichtet und somit ein Festrostern der Mutter auf dem Gewinde der Hammerkopfschraube verhindert (**Bild 107**).

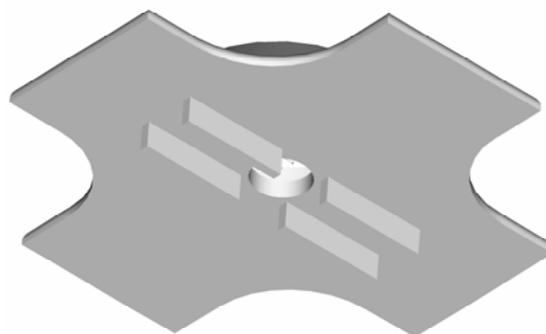


Bild 106: Niederhalter, Ansicht der Unterseite

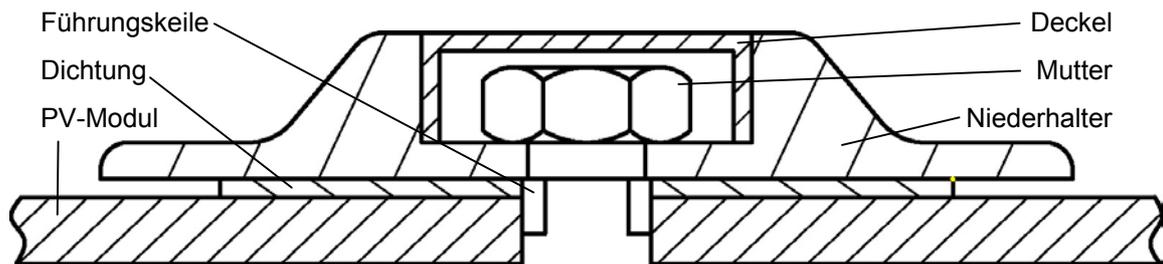


Bild 107: Schnitt durch einen eingebauten Niederhalter

Um der Flächenpressung der Mutter und der Witterung standhalten zu können, ist der Niederhalter als Aluminiumdruckgussteil konstruiert. Die im Vergleich zu einem Kunststoffteil höheren Herstellkosten, speziell durch die aufwendige Form der Oberseite, muss gegen die große optische Wirkung abgewogen werden. Der Niederhalter ist das einzige von außen sichtbare Teil des montagegerechten Befestigungssystems und dient als Unterscheidungsmerkmal zu anderen Systemen. Ein stabiler, qualitativ hochwertiger und fortschrittlicher Eindruck wird eher durch ein Aluminiumteil als durch ein Kunststoffteil vermittelt. Aus diesem Grund besteht auch der Deckel des Niederhalters aus teiltransparentem, blau getöntem Kunststoff und nicht aus undurchsichtigem schwarzen Gummi. Hier können auch verschiedene Farben angeboten werden und dadurch das montagegerechte Befestigungssystem in seiner optischen Wirkung kundenindividuell gestaltet werden. Die Stückkosten dieses Niederhalterelementes werden aufgrund der gewählten Materialien und der entsprechend erforderlichen Bearbeitung bei einer Serienproduktion bei ca. EUR 0,80 liegen.

6.3 Dichtung der Modulfläche

Bei der Indach-Variante des montagegerechten Befestigungssystems müssen die Fugen zwischen den PV-Modulen entsprechend dem Lösungsansatz in Kapitel 5.2.5 gedichtet werden. Aufgrund der geforderten Eignung des Systems für verschiedene Abmaße von PV-Modulen, werden entsprechend verschieden lange Dichtungen benötigt. Damit diese Anforderung nicht zu einer großen Anzahl von Dichtungsvarianten führt, werden für das montagegerechte Befestigungssystem T-Dichtungen verwendet, die als Meterware aufgerollt verfügbar sind. Diese können in der Montageumgebung leicht mit einem Schneidwerkzeug auf die benötigte Länge zugeschnitten werden.

Bild 108 zeigt den Querschnitt der Dichtung für rahmenlose PV-Module. Sie besteht aus einem T-Profil mit einem 5 mm breiten und 5,2 mm hohen Steg, der an beiden Seiten drei 1 mm hohe Dichtlippen besitzt. Am unteren Ende des Steges

schließt sich ein Anker an. Bei der Montage wird die Dichtung manuell mit der Ankerseite voran in die Fuge zwischen den rahmenlosen PV-Modulen gedrückt (Bild 109, a). Dabei verformt sich der Anker und gleitet in die Fuge. Da der Steg der Dichtung 2 mm länger als die Höhe der Module ist, tritt der Anker bei zusätzlichem Druck auf die Flanken des T-Profiles der Dichtung auf der Unterseite der Fuge aus (Bild 109, b). Entfällt nach Abschluss der manuellen Montage der äußere Druck auf die Flanken der Dichtung, verhakt sich der Anker an der Unterkante der beiden PV-Module. Durch die Rückstellkraft der verformten Flanken wird im montierten Zustand der Dichtung Druck auf die Dichtfläche zwischen den PV-Moduloberflächen und den Flanken der T-Dichtung ausgeübt (Bild 109, c). Zusätzlich können die Dichtlippen am Steg die Dichtfunktion übernehmen, wenn durch Verschleiß, Material- oder Montagefehler Wasser durch die Dichtfläche gelangen sollte.

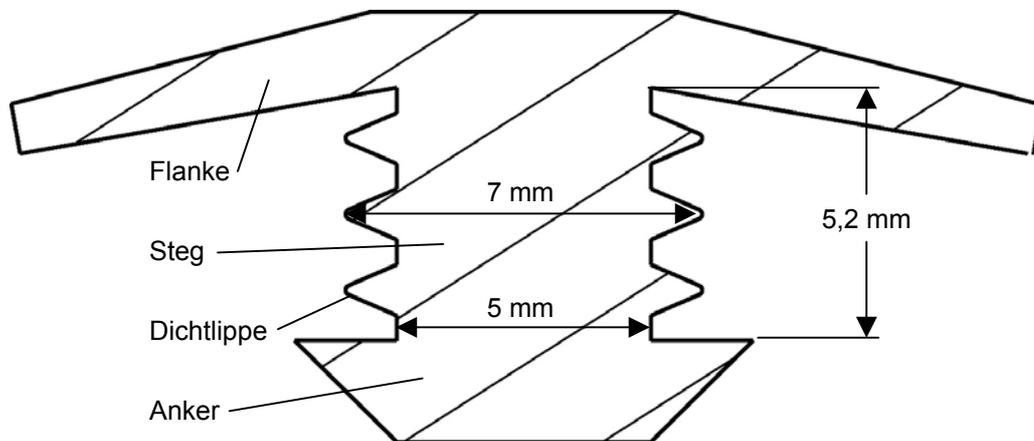


Bild 108: T-Dichtung für ungerahmte PV-Module

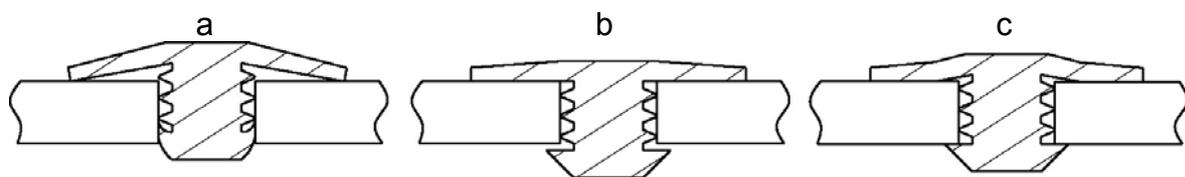


Bild 109: Montage der T-Dichtung zwischen ungerahmten PV-Modulen

Für gerahmte PV-Module ist die oben vorgestellte Dichtung weniger geeignet, da bei den Fugentiefen von 40 bis 50 mm zwischen gerahmten PV-Modulen nicht mehr sichergestellt ist, dass der Anker auf der Unterseite der Fuge austritt. Die konstruktive Gestalt einer für diese Fälle geeigneten Dichtung zeigt Bild 110. Die Dichtung ist ebenfalls T-förmig und besitzt einen 45 mm langen ankerlosen Steg mit 24 je 1 mm hohen Dichtlippen auf beiden Seiten. Sie macht sich die große Fugentiefe zunutze, indem sie die Reibungskräfte zwischen den Dichtlippen und den

Rahmen der PV-Module für die Dichtungsfunktion und für die Sicherung des Verbleibs in der Fuge nutzt.

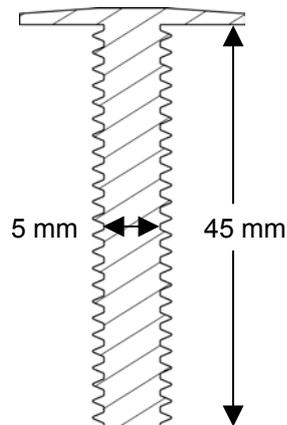


Bild 110: T-Dichtung für gerahmte PV-Module

Die T-Dichtungen zwischen den PV-Modulen werden bei der Montage so abgelängt, dass sie bündig mit der Dichtung unter dem jeweils angrenzenden Niederhalter (vgl. Bild 103) enden. Die Dichtung des Niederhalters hat die gleiche Stärke wie die Flanken der T-Dichtungen. Bei der Montage wird der Niederhalter somit auf einer glatten Fläche aus Dichtmaterial montiert. Durch ein Unterlappen der T-Dichtungen um 5 mm unter den Niederhalter (Bild 111) sichert die nach der Montage vom Niederhalter ausgehende Druckkraft die Dichtheit der Fuge zwischen den Dichtungen.

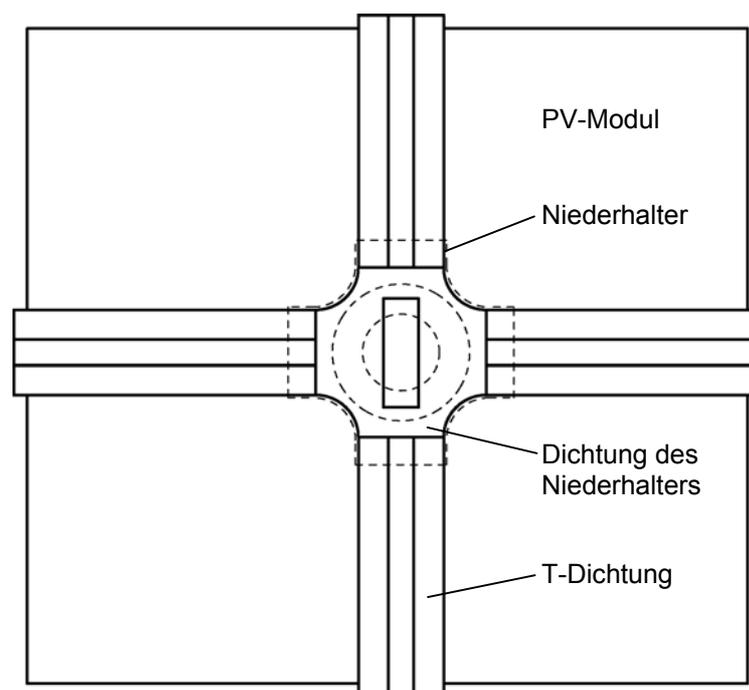


Bild 111: Dichtung unter dem Niederhalter

Die Materialauswahl für die Dichtung wird aufgrund des langen Einsatzzeitraums des montagegerechten Befestigungssystems maßgeblich durch das zeitliche Verhalten von Kunststoffen bestimmt. Thermoplastische Kunststoffe zeigen ein Relaxationsverhalten. Ihr E-Modul sinkt im Laufe der Zeit bei Belastung ab. Einwirkung von UV-Licht verstärkt dieses Verhalten [BAR00]. Demnach ist für die Profildichtung thermoplastischer Werkstoff weniger geeignet, da die durch Verformung hervorgerufenen inneren Spannungen mit der Zeit abgebaut und somit die Rückstellkraft der Flanken zu schnell abnehmen würde. Geeignet erscheint ein DIN-freies Spezial-Elastomer mit guter Temperaturbeständigkeit und hoher Alterungsbeständigkeit, das durch Rußfüllung besonders gegen UV-Einfluss geschützt ist [BER02]. Dichtungen aus diesem Material kosten als Meterware je laufenden Meter in der Herstellung unter EUR 0,01.

6.4 Wasserableitung

Bei der Indach-Variante des montagegerechten Befestigungssystems wird entsprechend des im Kapitel 5.2.6 konzipierten Lösungsansatzes das Ableiten von Wasser mit Anschlussblechen und -ecken zwischen der Modulfläche und der Dachhaut konstruktiv realisiert. Der konzeptionell gestaltete Lösungsansatz ermöglicht trotz der unterschiedlich geformten Anschlussbereiche der umgebenden Dachhaut an den verschiedenen Rändern des PV-Generators, dass die Anschlussbleche für alle vier Seiten und die Anschlussecken für alle vier Ecken des Modulfelds jeweils gleich sind. Die benötigte Anpassbarkeit an die Form der Anschlussbereiche wird durch einen zweiteiligen Aufbau der Bauteile ermöglicht. Sie bestehen aus einem starren Blech und einem daran anschließenden Streifen aus einem plastisch verformbaren, schneidbaren, wasserdichten und UV-beständigen Verbundstoff. Die Basis dieses Verbundstoffs besteht aus einem plastisch verformbaren Drahtgeflecht, welches in den Spezial-Elastomer CSM (Chlorsulfonierter Polyethylen-Kautschuk) eingebettet ist. Den schematischen Aufbau des Verbundstoffes zeigt Bild 112. Bei der Produktion des Befestigungssystems werden 400 mm breite Bahnen dieses Verbundstoffs an den Anschlussblechen und -ecken angeklebt.

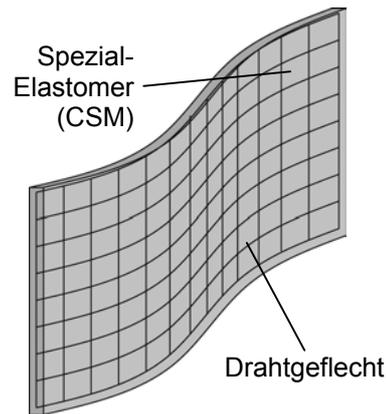


Bild 112: Verbundstoff

6.4.1 Anschlussblech

Um die Höhendifferenz zwischen der Modulfläche und der Ebene der Dachlatten und -ziegel zu überbrücken, besteht das Anschlussblech aus einem im Walzprozess geformten rampenförmigen Aluminiumblech. An der Unterkante hat das Blech eine 50 mm breite ebene Fläche, an der der Streifen aus dem Verbundstoff von unten angeklebt wird (Bild 113). An der Oberkante ist das Blech so gebogen, dass eine Bahn zum Klemmen der ebenfalls an den PV-Modulen verwendeten Aufnehmer (Bild 87) entsteht. Die Kosten je laufenden Meter Anschlussblech mit Verbundstoff inklusive Aufnehmer betragen ca. 0,72 EUR.

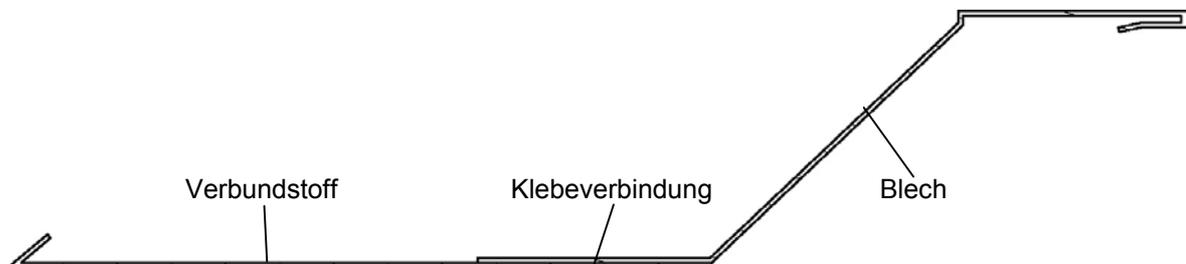


Bild 113: Querschnitt des Anschlussblechs

Bei der Montage der Indach-Variante des montagegerechten Befestigungssystems werden auch an den Rändern des Modulfelds Vierer-Modulverbinder (Bild 93, rechts) eingebaut. Auf die nicht von PV-Modulen belegten Stecker werden die Anschlussbleche mittels ihrer geklemmten Aufnehmer gesteckt. Da die Aufnehmer in der Klemmbahn verschoben werden können, kann das Anschlussblech an allen Seiten des Modulfelds angebaut werden, obwohl die Modulverbinder an den seitlichen und oberen/unteren Rändern des Modulfelds unterschiedlich weit auseinanderliegen. Bild 114 zeigt einen Schnitt durch ein Anschlussblech im am seitlichen Rand eines Modulfelds eingebauten Zustand. Die Dichtung zwischen Anschluss-

blech und Modulfläche ist identisch mit der in Kapitel 6.3 beschriebenen zwischen zwei Modulen. Zur Sicherung der Verbindung wird auch hier die in Kapitel 6.2.3 konstruktiv gestaltete Hammerkopfschraube mit Niederhalter verwendet. Eine Draufsicht auf ein eingebautes, mit Niederhalter gesichertes seitliches Anschlussblech zeigt Bild 115.

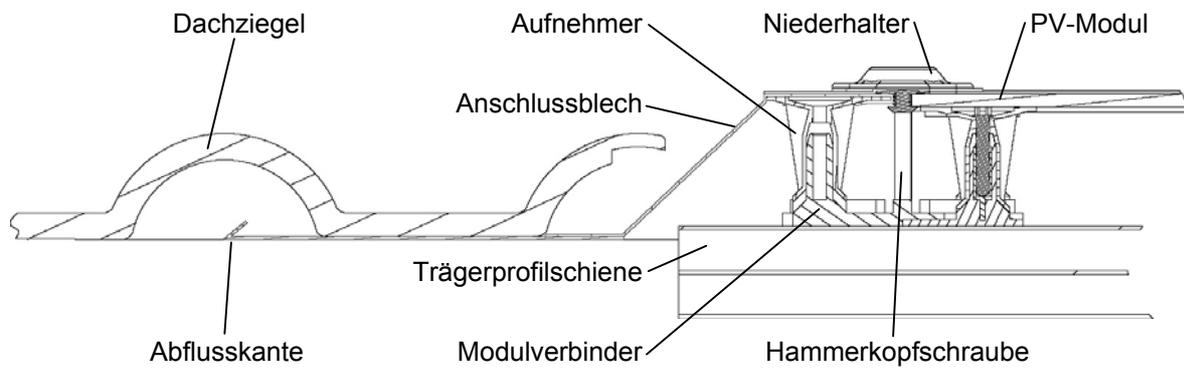


Bild 114: Anschlussblech, eingebaut am seitlichen Modulfeldrand

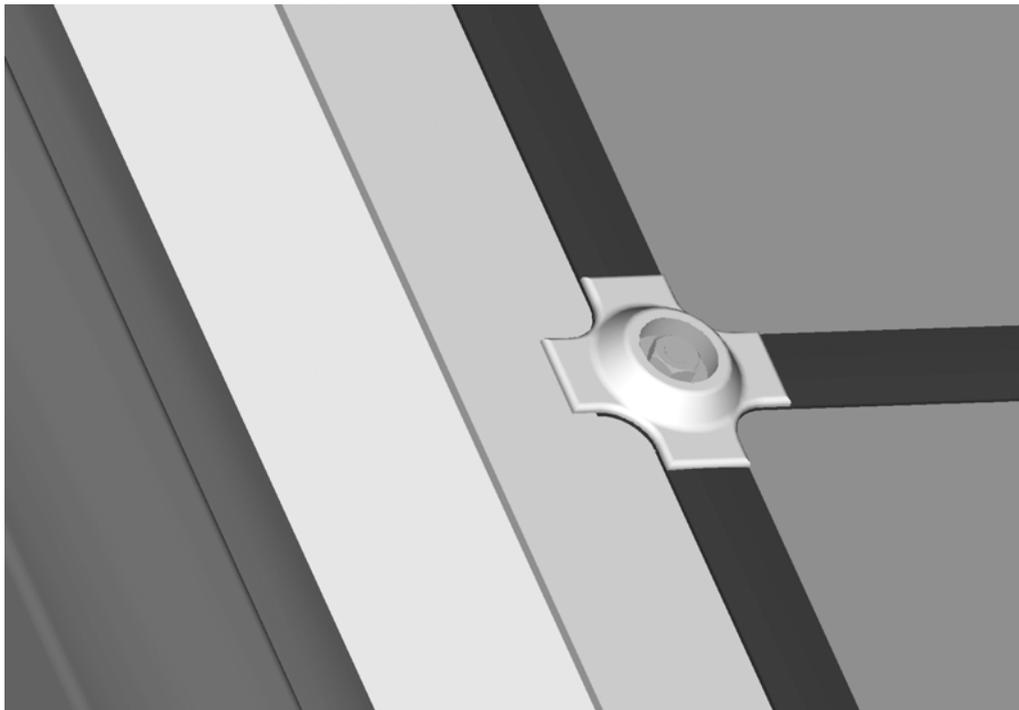


Bild 115: Eingebauter Niederhalter am seitlichen Anschlussblech

Bei der Montage wird das Anschlussblech in der benötigten Länge zugeschnitten. Bei dem Einbaufall am seitlichen Rand eines Modulfelds wird manuell die Kante in den flexiblen Teil des Anschlussbleches gebogen, die ein Eindringen von Wasser in den Dachstuhl verhindert (Bild 114). Am unteren Rand des Modulfelds wird der

flexible Teil des Anschlussbleches über die angrenzende Ziegelreihe gelegt und entsprechend der Ziegelkontur verformt (Bild 116). An dem oberen Rand eines Modulfelds benötigt das Anschlussblech keine bestimmte Kontur (Bild 117).

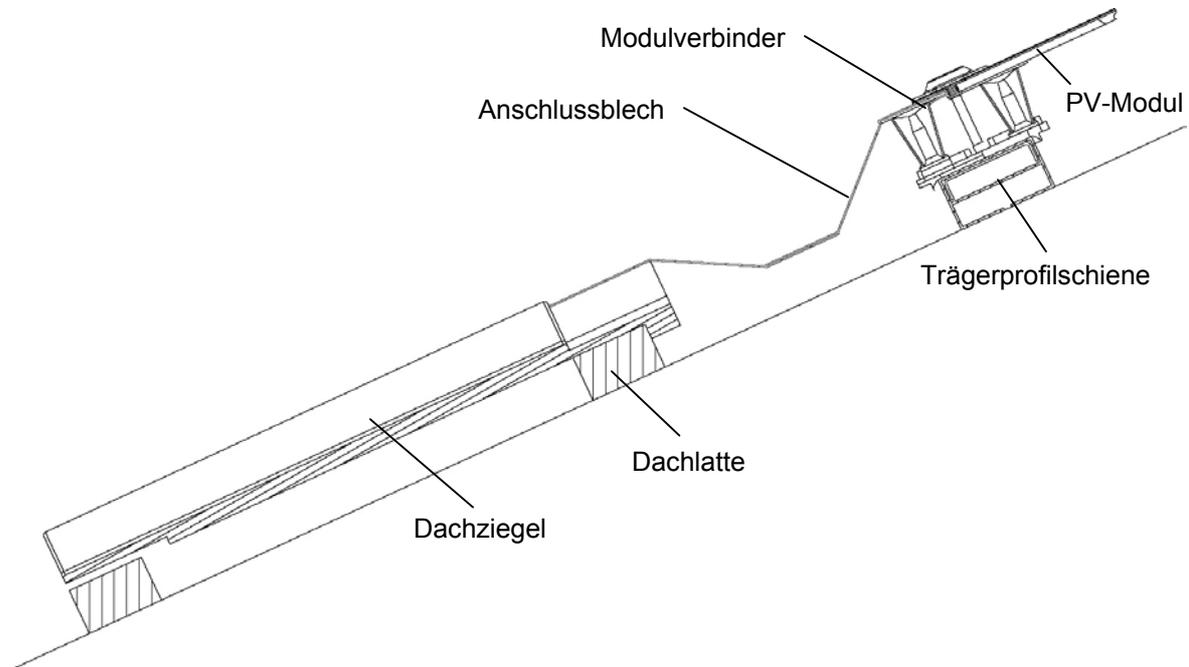


Bild 116: Anschlussblech, eingebaut am unteren Modulfeldrand

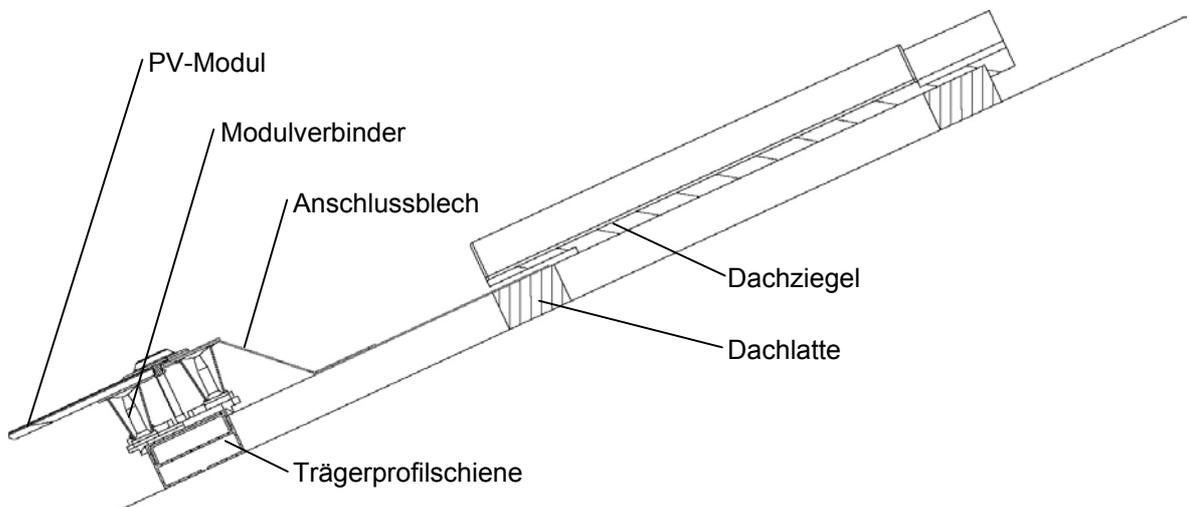


Bild 117: Anschlussblech, eingebaut am oberen Modulfeldrand

6.4.2 Anschlussecke

Die Anschlussecke ist ebenso wie das Anschlussblech ein Verbundbauteil aus einem Aluminiumblech und einer angeklebten Schürze aus dem Verbundstoff (Bild 118). Sie hat an ihrer auf der Ebene der Modulfläche liegenden Seite eine Boh-

rung und eine Auflagefläche mit der Form des Niederhalters. Dadurch kann sie mittels einer Hammerkopfschraube in den Ecken der Modulfläche montiert werden (Bild 119, Bild 120). Aufgrund der komplizierteren geometrischen Form wird dieses Blechteil im kombinierten Stanz- und Tiefziehverfahren hergestellt. Die Stückkosten der Ecke mit angeklebten Verbundstoff und Aufnehmer werden ca. 4,00 EUR betragen.

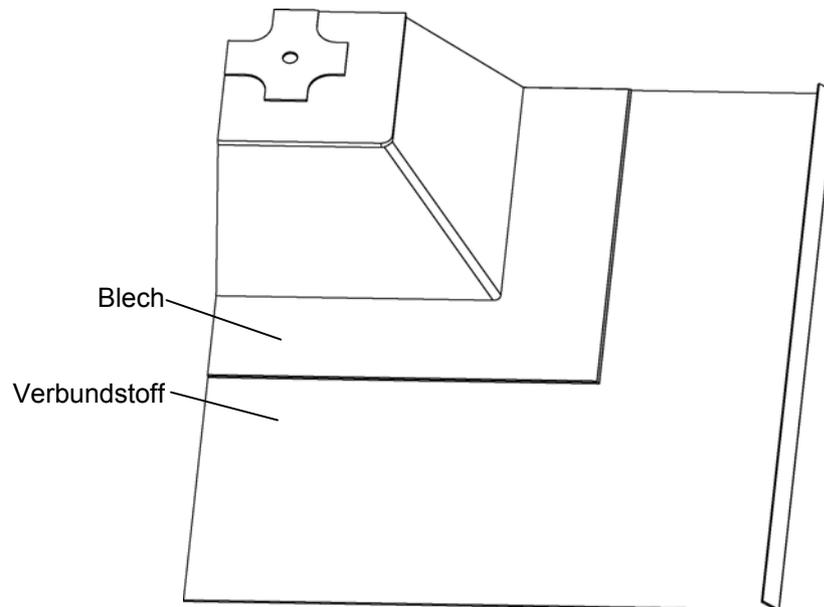


Bild 118: Anschlusssecke

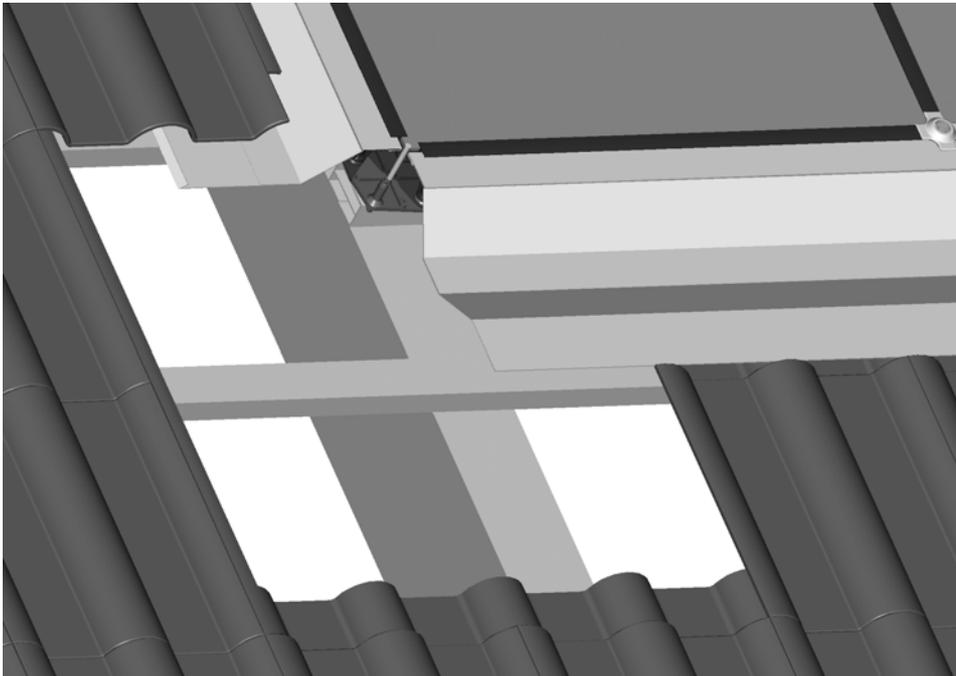


Bild 119: Montage der Anschlusssecke (I)

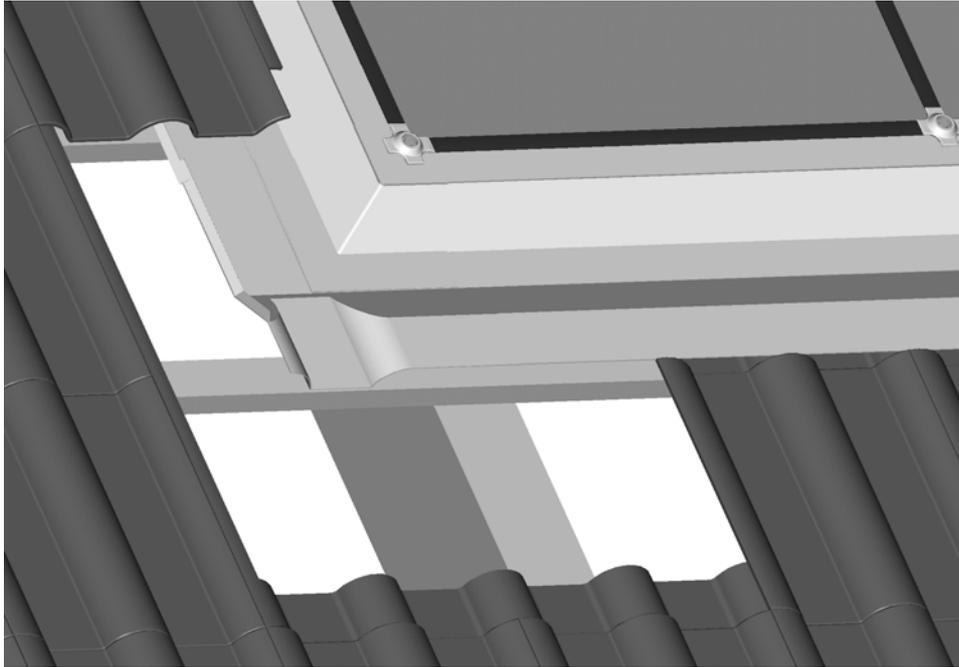


Bild 120: Montage der Anschlusssecke (II)

Unter der Anschlusssecke wird dieselbe Dichtung wie unter den Niederhaltern verwendet (vgl. Bild 103 und Bild 111). Die Anschlusssecke überlappt bei der Montage die beiden T-Dichtungen zwischen den PV-Modulen und den Anschlussblechen und dichtet durch den Druck die Fuge zwischen den beiden T-Dichtungen und der Dichtung unter der Ecke (vgl. Kapitel 6.3). Bild 121 zeigt die Dichtungen im Bereich der Anschlusssecke. Die angrenzenden Anschlussbleche werden von der Ecke sowohl mit dem Aluminiumblech als auch mit der Schürze überlappt. Die beiden dort entstehenden Fugen werden mit einem hoch witterungsbeständigen Dichtungstape geschlossen (Bild 122). Die Kosten dieses Tapes liegen weit unter 0,01 EUR je laufenden Meter.

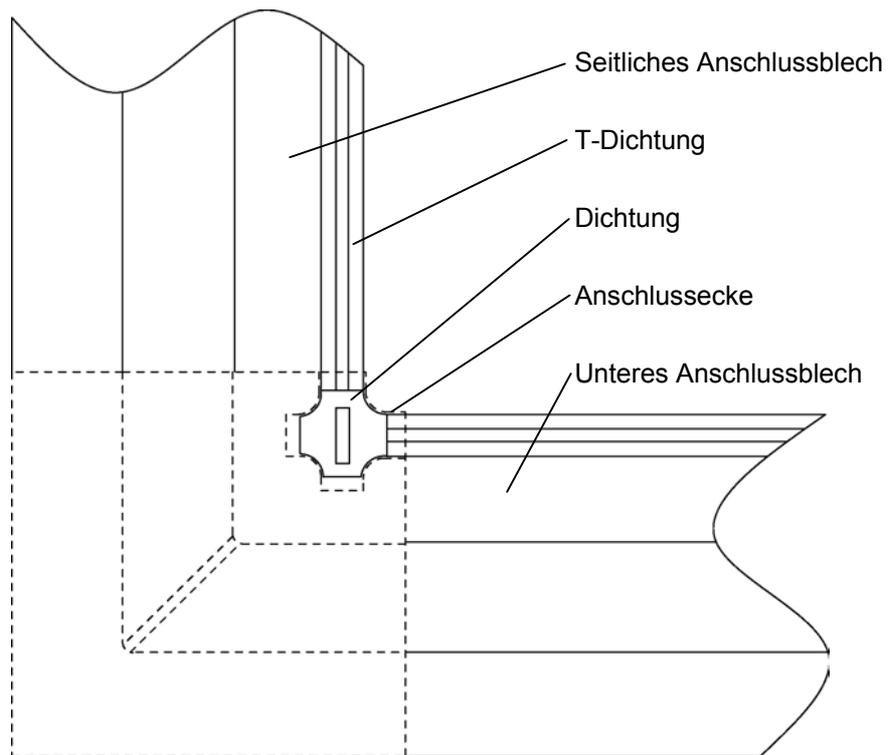


Bild 121: Dichtung unter der Anschlusssecke

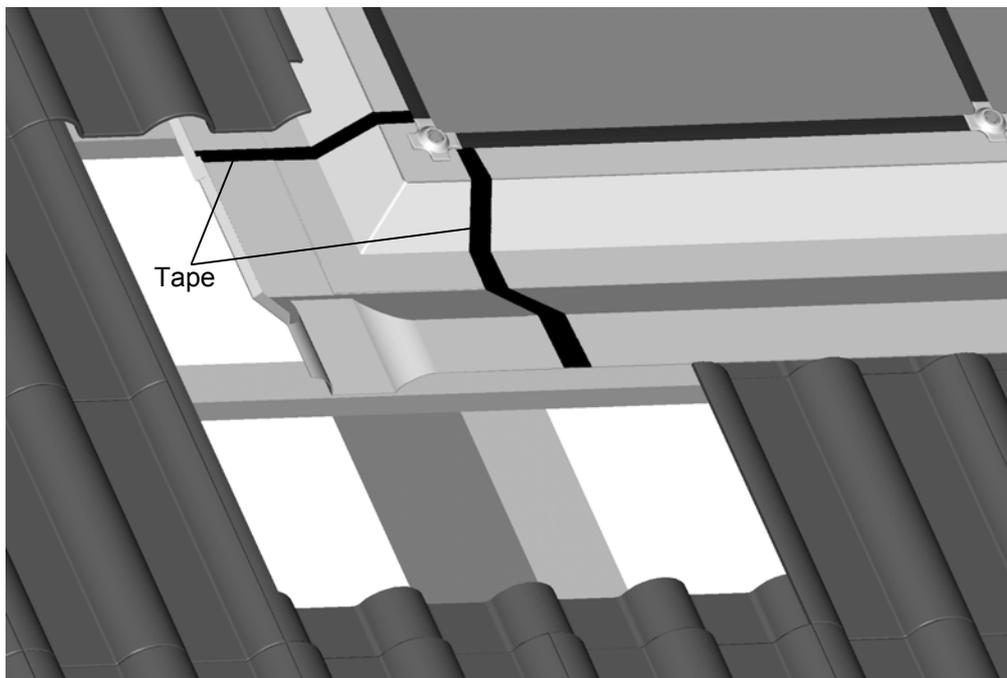


Bild 122: Dichten der Fugen um die Anschlusssecke mittels Tape

7 Systembewertung

7.1 Anforderungserfüllung

Das in dieser Arbeit entwickelte montagegerechte Befestigungssystem für PV-Generatoren wird abschließend anhand des Erfüllungsgrades der gestellten Anforderungen bewertet. Dazu werden sowohl die in Kapitel 3.2 abgeleiteten allgemeinen Anforderungen (Tabelle 8) als auch die in Kapitel 4.4 aufgestellten speziellen Anforderungen (Tabelle 18) herangezogen. Zum Vergleich werden dem entwickelten montagegerechten Befestigungssystem in seiner Aufdach-Variante und seiner Indach-Variante zwei marktrepräsentative herkömmliche Systeme gegenübergestellt. Dabei repräsentiert das System *SUNTOP II* der Fa. *CONERGY* [CON04] die etablierten Aufdach-Systeme und das System *Energiedach* der Fa. *SOLARWORLD* [SOL04a] die Indach-Systeme. Tabelle 22 zeigt die Bewertung der allgemeinen Anforderungen, Tabelle 23 die der speziellen Anforderungen. Der Bewertung liegen die in den Montageversuchen gewonnenen Erfahrungen und die in der Firmenumfrage ermittelten Expertenmeinungen zugrunde. Die Bewertungen der beiden Varianten des montagegerechten Befestigungssystems unterscheiden sich nur in wenigen Punkten, da das System nach dem Baukastenprinzip aufgebaut ist und die Anpassung an die jeweilige Montageart nur den Austausch und/oder die Ergänzung sehr weniger Baugruppen erfordert.

Der *Erfüllungsgrad* der jeweiligen Anforderung durch die einzelnen Systeme bzw. die Varianten des montagegerechten Befestigungssystems wird auf einer Skala von *nicht erfüllt (0)* bis *voll erfüllt (5)* bewertet. Dieser Wert wird mit der *Gewichtung* der Anforderung multipliziert und ergibt die *Kennzahl* der Erfüllung der entsprechenden Anforderung. Innerhalb der einzelnen Systeme werden die Kennzahlen summiert. Der so erhaltene Zahlenwert wird mit dem maximal möglichen ins Verhältnis gesetzt und ergibt die prozentuale Erfüllung der gestellten Anforderungen durch das jeweilige System. Da Indach-Systeme nur bei einer Art der Dach-eindeckung zum Einsatz kommen können, werden sie hinsichtlich der Anforderung *Universalität Dächer* nicht bewertet. Aus diesem Grund liegt der maximal mögliche Zahlenwert für die Indach-Systeme bei den speziellen Anforderungen nur bei 220, statt wie bei Aufdach-Systemen bei 240. Die Bewertung der Anforderung *Auf-/Indach Flexibilität* bei dem montagegerechten Befestigungssystem bezieht sich nicht auf die Varianten, sondern auf das Gesamtsystem, welches diese Flexibilität besitzt.

Anforderung	Forderung/ Wunsch	Gewichtung	SUNTOP II (Aufdach)		Energiedach (Indach)		Montagerechtes Befestigungssystem			
			Erfüllungsgrad	Kennzahl	Erfüllungsgrad	Kennzahl	Aufdach- Variante		Indach- Variante	
							Erfüllungsgrad	Kennzahl	Erfüllungsgrad	Kennzahl
Aufnahme von Drucklasten	F	6	5	30	5	30	5	30	5	30
Aufnahme von Zuglasten	F	6	5	30	5	30	5	30	5	30
Dynamische Steifigkeit	W	4	2	8	3	12	4	16	4	16
Geringe Wärmedehnung	W	1	2	2	2	2	3	3	3	3
Robustheit bei wechselnder Erwärmung und Abkühlung	W	3	4	12	4	12	3	9	3	9
Beibehaltung der Dichtigkeit des Daches	F	6	4	24	4	24	4	24	4	24
Behinderungsfreie Strömung im Bereich der Schnittstellen	W	4	4	16	4	16	4	16	3	12
Vermeidung der Ablagerung von Verunreinigungen	W	3	2	6	4	12	2	6	4	12
Steife Konstruktion / verschleißfeste Werkstoffe	W	2	4	8	3	6	4	8	3	6
Günstige Werkstoffpaarungen	W	2	3	6	3	6	3	6	3	6
Physische und chemische Stabilität	W	2	4	8	3	6	4	8	3	6
Sicherheit des elektrischen Anschlusses	F	6	3	18	3	18	5	30	5	30
Σ			168		174		186		184	
$\Sigma/225$			75 %		77 %		83 %		82 %	

Gewichtung

- 1: hilfreich
2: wünschenswert
3: sehr wünschenswert
4: wichtig
5: sehr wichtig
6: erforderlich

Erfüllungsgrad

- 0: nicht erfüllt
1: kaum erfüllt
2: wenig erfüllt
3: bedingt erfüllt
4: gut erfüllt
5: voll erfüllt

Tabelle 22: Bewertung der Erfüllung allgemeiner Anforderungen

Anforderung	Forderung / Wunsch	Gewichtung	SUNTOP II (Aufdach)		Energiedach (Indach)		Montagerechtes Befestigungssystem			
			Erfüllungsgrad	Kennzahl	Erfüllungsgrad	Kennzahl	Aufdach-Variante		Indach-Variante	
							Erfüllungsgrad	Kennzahl	Erfüllungsgrad	Kennzahl
Zwangslage	W	5	0	0	0	0	4	20	4	20
Zwischensicherung	W	2	1	2	2	4	4	8	4	8
Integrierte elektrische Verschaltung	F	6	0	0	0	0	5	30	5	30
Geringe Bauteilanzahl	W	5	3	15	1	5	2	10	1	5
Ergonomie	W	1	3	3	1	1	5	5	4	4
Schutzart	F	6	2	12	2	12	5	30	5	30
Universalität PV-Module	W	4	0	0	0	0	4	16	3	12
Universalität Dächer	W	4	4	16	-	-	4	16	-	-
Auf-/Indach Flexibilität	W	4	0	0	0	0	5	20	5	20
Baukastenfähigkeit	W	3	2	6	0	0	4	12	4	12
Universalität elektrischer Anschluss	W	3	3	9	3	9	3	9	3	9
Einfachheit elektrischer Anschluss	W	5	1	5	1	5	4	20	4	20
Σ			68		36		196		170	
$\Sigma/240$ bzw. $\Sigma/220$			28 %		16 %		82 %		77 %	

Gewichtung

- 1: hilfreich
 2: wünschenswert
 3: sehr wünschenswert
 4: wichtig
 5: sehr wichtig
 6: erforderlich

Erfüllungsgrad

- 0: nicht erfüllt
 1: kaum erfüllt
 2: wenig erfüllt
 3: bedingt erfüllt
 4: gut erfüllt
 5: voll erfüllt

Tabelle 23: Bewertung der Erfüllung spezieller Anforderungen

Die prozentuale Erfüllung der gestellten Anforderungen zeigt, dass das entwickelte montagegerechte Befestigungssystem den am Markt etablierten Systemen in Bezug auf die allgemeinen Anforderungen überlegen ist und diese in Bezug auf die speziellen Anforderungen sehr deutlich übertrifft. Die Aufdach-Variante des montagegerechten Befestigungssystems erfüllt im Vergleich zum herkömmlichen Auf-

dach-System die allgemeinen Anforderungen um acht Prozentpunkte, die speziellen um 54 Prozentpunkte besser. Die Indach-Variante des montagegerechten Befestigungssystems erfüllt die allgemeinen Anforderungen um fünf Prozentpunkte und die speziellen um 61 Prozentpunkte besser als das herkömmliche Indach-System.

7.2 Wirtschaftlichkeit

Die Stückkosten der Einzelteile des montagegerechten Befestigungssystems sind in Tabelle 24 zusammengefasst. Um eine Vergleichbarkeit mit den Daten aus Tabelle 5 zu gewährleisten, sind die Kosten zusätzlich für ein 2kW_p -System, das 20 m^2 Modulfläche entspricht, dargestellt. Für ein Indach-System mit 20 m^2 Modulfläche wird dabei von zwölf PV-Modulen in der in Bild 70 gezeigten Anordnung von drei Reihen mit je vier PV-Modulen und der entsprechenden Verschaltung ausgegangen.

Befestigungskomponenten	Geschätzte Stückkosten in EUR	2 kW_p -System	
		Erforderliche Stückzahl	Kosten in EUR
Aufnehmer	0,03	48	1,44
Modulverbinder			
Nichtleitend	0,01	28	0,28
Leitend	0,03	11	0,33
Endstück	0,62	1	0,62
Niederhalter	0,80	20	16,00
Dichtung	0,008	31	0,25
Anschlussblech	2,50	4	10,00
Anschlusssecke	4,00	4	16,00
			Σ 44,92

Tabelle 24: Kosten der Komponenten des montagegerechten Befestigungssystems

Aus Tabelle 24 ergeben sich in Summe für die Komponenten des montagegerechten Befestigungssystems Kosten von $0,02225\text{ EUR/W}_p$. Zur Abschätzung der Montagezeiterparnis sind in Tabelle 25 die Montageschritte bei der Installation eines PV-Systems mit Standard-Befestigungssystem aus Tabelle 7 den Montageschritten mit montagegerechtem Befestigungssystem gegenübergestellt und verglichen.

Standard-Befestigungssystem (Aufdach)		Montagegerechtes Befestigungssystem (Aufdach)	
Montageschritt	Zeitanteil in %	Montageschritt	Zeitersparnis in %
Dachpfannen abdecken	2	Dachpfannen abdecken	±0
Dachhaken anpassen	2	Dachhaken anpassen	±0
Dachhaken festschrauben	4	Dachhaken festschrauben	±0
Profilschienen ausrichten	6	Profilschienen ausrichten	±0
Profilschienen verschrauben	3	Profilschienen verschrauben	±0
Dachpfannen anpassen	3	Dachpfannen anpassen	±0
Dachpfannen eindecken	2	Dachpfannen eindecken	±0
		Hammerkopfschrauben auf-schieben	-1
		Modulverbinder aufstecken	-3
PV-Module auflegen	10	PV-Module aufstecken	±0
Verkabelung durchführen	25	<i>entfällt</i>	+25
Kabelführung sichern	10	<i>entfällt</i>	+10
PV-Module ausrichten	15	<i>entfällt</i>	+15
Modulklemmen positionieren	12	<i>entfällt</i>	+12
Modulklemmen verschrauben	6	Niederhalter verschrauben	±0
13 Montageschritte	∑ 100	11 Montageschritte	∑ +58

Tabelle 25: Gegenüberstellung der Montageschritte bei Standard-Aufdach- und montagegerechtem Befestigungssystem und Ableiten der Montagezeitersparnis

Basierend auf den in Tabelle 6 dargestellten Montageaufwand und Montagekosten bei einem Standard-Aufdach-Befestigungssystem und der in Tabelle 25 abgeleiteten geschätzten Montagezeitersparnis von 58 % bei dem montagegerechten Befestigungssystem, ergeben sich die in Tabelle 26 zusammengefassten Montagekosten für das montagegerechte Befestigungssystem.

Installierte Leistung	Standard-Aufdach-Befestigungssystem		Montagegerechtes Befestigungssystem (Aufdach)	
	Arbeitsaufwand [je kW _p]	Montagekosten [je kW _p]	Geschätzter Arbeitsaufwand [je kW _p]	Geschätzte Montagekosten [je kW _p]
1 kW _p	18~30 Std.	EUR 615~1.025	7,6~12,6 Std.	EUR 260~430
2 kW _p	15~23 Std.	EUR 515~770	6,3~9,7 Std.	EUR 215~325
3 kW _p	15~18 Std.	EUR 515~615	6,3~7,6 Std.	EUR 215~260
4 kW _p	15 Std.	EUR 515	6,3 Std.	EUR 215

Tabelle 26: Gegenüberstellung des Montagearbeitsaufwands bei Standard-Aufdach- und montagegerechtem Befestigungssystem und Ableiten der Montagekosten

Nach Tabelle 26 kann für die Installation eines netzgekoppelten PV-Systems mit 2 kW_p mit montagegerechtem Befestigungssystem von durchschnittlichen Kosten von 0,27 EUR/W_p ausgegangen werden. Summiert ergeben sich somit für das montagegerechte Befestigungssystem an Kosten für Installation und Befestigungskomponenten, die die elektrische Verschaltung enthalten, 0,29 EUR/W_p.

Abschließend sind in Tabelle 27 die Kosten eines netzgekoppelten PV-Systems (2 kW_p) mit Standard-Befestigungssystem aus Tabelle 5 denen mit montagegerechtem Befestigungssystem gegenübergestellt. Die Anteile der einzelnen Kosten an den Gesamtsystemkosten zeigt Bild 123.

	Durchschnittskosten in EUR/W _p	
	Standard- Befestigungssystem	Montagegerechtes Befestigungssystem
PV-Module	4,06	4,06
Wechselrichter	0,29	0,29
Elektrische Verkabelung	0,37	0,29
Befestigungskomponenten und Installation	1,31	
Summe	6,03	4,64
Mehrwertsteuer (16 %)	0,97	0,74
Gesamtsystem	7,00	5,38

Tabelle 27: Gegenüberstellung der Kosten eines netzgekoppelten PV-Systems (2 kW_p) mit Standard-Befestigungssystem und mit montagegerechtem Befestigungssystem

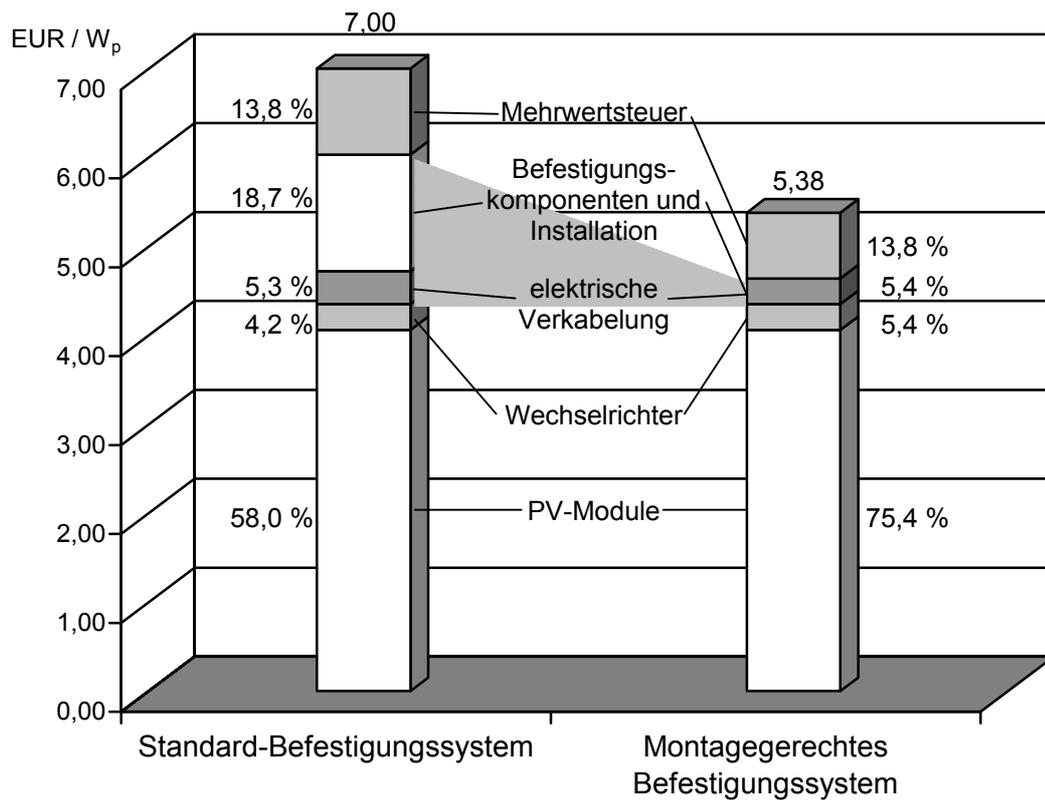


Bild 123: Kostenanteile eines netzgekoppelten PV-Systems (2 kWp) mit Standard-Befestigungssystem und mit montagegerechtem Befestigungssystem

Der Anteil der Kosten der elektrischen Verkabelung, Befestigungskomponenten und Installation an den Gesamtsystemkosten ist von 24 % bei dem Standard-Befestigungssystem auf 5,4 % durch das montagegerechte Befestigungssystem gesenkt worden. Das montagegerechte Befestigungssystem ermöglicht eine Reduzierung der Brutto-Systemkosten bei dachinstallierten PV-Generatoren um 1,62 EUR/Wp. Das entspricht einer Kostenreduzierung von 23 %.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Bedarf an elektrischer Energie ist durch die stetig wachsende Weltbevölkerung, die erhöhte Mobilität sowie das gestiegene Komfortbedürfnis innerhalb der letzten Jahrzehnte stark angestiegen. Eine Fortsetzung dieses Trends ist sehr wahrscheinlich. Der Großteil dieser benötigten elektrischen Energie wird durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas bereitgestellt. Diese konventionellen fossilen Energieträger sind in ihrem Vorkommen begrenzt. Bei der erforderlichen nachhaltigen Umstrukturierung der Energieversorgungssysteme kommt der Photovoltaik eine wesentliche Rolle zu. Photovoltaische Systeme geben während des Betriebs keine CO₂-Emissionen oder Schadstoffe an die Umwelt ab, sie arbeiten geräuschfrei und ohne bewegte Teile, und die Hauptausgangsstoffe Silizium, Glas und Stahl für Photovoltaiksysteme sind noch für sehr lange Zeit verfügbar.

Bei der Weiterentwicklung der Photovoltaiksysteme wurden bisher die Schwerpunkte der Forschungen auf die Neuentwicklung und Verbesserung der photovoltaisch-aktiven Schicht sowie auf rationellere Produktionsverfahren gelegt. Eine Betrachtung der angrenzenden Systeme, wie der Befestigungssysteme, ist weitgehend unterblieben. In diesem Bereich kann noch erhebliches Verbesserungspotential realisiert werden. Zur Reduzierung der Kosten der Photovoltaik müssen alle kostenverursachenden Faktoren im Hinblick auf ihr Kostensenkungspotential betrachtet werden. Die Komponenten des Befestigungssystems und die Installation machen zusammen etwa ein Drittel der Kosten eines Photovoltaiksystems aus. Einen erheblichen Anteil an diesen Kosten haben die elektrischen Verkabelungen. Durch eine Verbesserung der Installation zusammen mit einer Verringerung des Aufwands für die Verkabelung lassen sich erhebliche Einsparungen realisieren.

Der Stand der Technik zu Befestigungssystemen für Photovoltaikgeneratoren ist durch eine Vielzahl von Einzellösungen gekennzeichnet und zeigt, dass die bestehenden Befestigungssysteme eine Reihe von Schwachstellen aufweisen. Den mit Abstand größten Marktanteil haben auf Dächern befestigte Photovoltaiksysteme. Die Dachinstallation von Photovoltaikgeneratoren stellt eine Montage an einem nur erschwert zugänglichen und begeharen Ort dar. Die bei Arbeiten auf dem Dach erhöhten Anforderungen an die Aufmerksamkeit des Monteurs gehen zu Lasten der Fähigkeiten bei der Montagetätigkeit. Ein Monteur wird komplexe Tätigkeiten an einem nur schwer zugänglichen Montageort weniger schnell und fehlerfrei erledigen, als an einem eingerichteten Montageplatz in der Innenmontage. Folglich sind die Montagetätigkeiten zu minimieren und möglichst einfach zu gestalten. Der montagegerechten Gestaltung des Befestigungssystems muss daher

sehr große Bedeutung beigemessen werden. Laut einer im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Unternehmensbefragung sahen die meisten Unternehmen Verbesserungspotentiale bei den Befestigungssystemen. Als Probleme bei der Montage wurden eine schlechte Ergonomie, ein hoher Montageaufwand und damit verbunden eine lange Montagezeit, eine hohe Montagefehlerwahrscheinlichkeit sowie ein hohes Gefahrenpotential bei der elektrischen Verkabelung der Photovoltaikmodule genannt.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Lösungsansatz basiert auf der Bestimmung des Handlungsbedarfs in Bezug auf eine montagegerechtere Gestaltung der Befestigungssysteme durch Identifikation der Beanspruchungen eines solchen Systems und der daraus resultierenden Anforderungen. Eine sich auf eine umfassende Recherche der Anforderungen an ein Befestigungssystem stützende Methodik zur Bewertung der Montagegerechtheit von Befestigungssystemen wurde entwickelt und angewandt, um detaillierte Gestaltungshinweise für ein montagegerechtes Befestigungssystem für Photovoltaikgeneratoren zu erhalten. Erweitert, detailliert und verifiziert wurden die mit dieser Methodik erarbeiteten Gestaltungshinweise durch ergänzend durchgeführte Montageversuche. Mit den Erkenntnissen aus diesen theoretischen und praktischen Untersuchungen erfolgte die konzeptionelle und konstruktive Gestaltung eines montagegerechten Befestigungssystems für Photovoltaikgeneratoren. Dabei wurde die Funktionsstruktur für dieses System aufgestellt und detailliert, Wirkprinzipien und Lösungsansätze für die Detailfunktionen erarbeitet sowie darauf aufbauend Kombinationen der Detaillösungen konzipiert, welche anschließend konstruktiv ausgearbeitet wurden.

Das durch die dargestellten Arbeiten entwickelte montagegerecht gestaltete Befestigungssystem für Photovoltaikgeneratoren muss in der Folge gefertigt werden; es müssen Montageversuche und Versuche bezüglich des Belastungs- und Verschleißverhaltens der entwickelten Baugruppen und Bauteile durchgeführt werden. Um auch die Erschließung von Einsatzfällen zu ermöglichen, die einen häufigeren Auf- und Abbau eines Photovoltaikgenerators erfordern, einen so genannten Wechseleinsatz, müssen die dabei auftretenden Belastungen des Systems untersucht werden. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Schnittstelle zwischen Aufnehmer und Modulverbinder gelegt werden. Die Eignung des Systems auch für diesen Wechseleinsatz kann die Potentiale zukunftsweisender Dienstleistungen und Nutzenverkaufskonzepte auf dem Photovoltaiksektor erschließen und ermöglicht einen wichtigen Schritt hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung.

9 Literatur

- [AIC03] von Aichberger, S.; Kreutzmann, A.: Marktübersicht Solarmodule – Daten, Preise, Bezugsquellen. In: Photon – Das Solarstrom-Magazin, Heft 02/03. Solar Verlag, Aachen, 2003. S. 24-43.
- [ALS94] Alsema, E.A.; Engelenburg, B.C.W. van: Environmental Risks of Amorphous Silicon Solar Cell Modules. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Amsterdam, 1994. pp. 305-308.
- [ATH04] N.N.: Komplettanlagen nach Kundenwunsch – Zu jedem Gebäude die passende Lösung. Atmosphäre GmbH, Laatzen, Deutschland. Internetseite: www.atmosphaere.com, Stand 01/04, 2004.
- [BAR00] Bargel, H.-J.: Werkstoffkunde. Springer Verlag, Berlin, 2000.
- [BER03] Bernreuter, J.: Schlüsselfertige Solaranlagen. In: Photon – Das Solarstrom-Magazin, Heft 04/03. Solar Verlag, Aachen, 2003. S. 11-19.
- [BER02] Bergmann, W.: Werkstofftechnik, Band 1: Grundlagen. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2002.
- [BET02] Bettenwort, G.: Anforderungen an den Aufbau modularer Photovoltaikanlagen im Netzparallelbetrieb. Dissertation, Düsseldorf, 2002.
- [BIN98] N.N.: Photovoltaikanlagen – Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit. Projekt Infoservice Nr.6. BINE Informationsdienst, Fachinformationszentrum Karlsruhe, 1998.
- [BIR02] Birtsch, R.: Technische Anforderungen an dezentrale Versorgungsstrukturen in Europa. In: Themen 2001: Integration Erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen, Hrsg.: Forschungsverbund Sonnenenergie. Berlin, 2002. S. 15-21.
- [BMU02a] N.N.: Entwicklung der Erneuerbaren Energien – Aktueller Sachstand. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 2002.

- [BMU02b] N.N.: Bericht über den Stand der Markteinführung und der Kostenentwicklung von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (Erfahrungsbericht zum EEG). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin, 2002.
- [BMW02] N.N.: Energiedaten 2002 – Nationale und internationale Entwicklung. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. Berlin, 2002.
- [BMW01] N.N.: Energieforschung – Investition in die Zukunft. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. Berlin, 2001.
- [BRI03] N.N.: BP Statistical Review of World Energy. British Petrol. 2003.
- [BRÖ00] Brösicke, W.: Sonnenenergie: Wissen – Planen – Gewinnen. Verlag Technik, Berlin, 2000.
- [BRU99] Brugmann, J.: Auslegung von Photovoltaik-Anlagen mit Speicher- und Zusatzsystemen nach energetischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. Düsseldorf, 1999.
- [BSE02] N.N.: Kraftwerk Sonne – Aus Licht wird Strom. Bundesverband Solarenergie, München, 2002.
- [BUT02] Butz, C.: Sarasin Studie: PV 2002 – Markt, Akteure und Prognosen. Bank Sarasin & Cie AG, Basel, 2002.
- [CHE98] Chehab, C.: Architektonische Gestaltungsmöglichkeit bei Gebäuden mit Photovoltaik-elementen. In: Konferenz-Einzelbericht: VDI-Berichte Band 1406. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998. S. 125-130.
- [CON04] N.N.: Produktinformationen der Conergy AG, Hamburg. Internetseite: www.conergy.de, Stand 01/04, 2004.
- [DEU01] N.N.: Grundlagen der Photovoltaik. Deutsche Solar-AG, Freiberg, Deutschland, 2001.

- [DIN00] N.N.: Norm-Entwurf DIN IEC 64/1123/CD, Ausgabe 2000-08: Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 7-712: Anforderungen für spezielle Anlagen und Räume – Photovoltaik-Versorgungssysteme. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [DIN0100] N.N.: DIN VDE 0100-410/A1: Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 4: Schutzmaßnahmen, Kapitel 41: Schutz gegen elektrischen Schlag. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN0106] N.N.: DIN VDE 0106, Teil 1: Berührungsschutz elektrischer Anlagen. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 1993.
- [DIN1055] N.N.: DIN 1055, Teil 4: Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 1986.
- [DIN8593] N.N.: DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN50110] N.N.: DIN EN 50110-1: Betrieb von elektrischen Anlagen, DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 1997.
- [DIN61215] N.N.: DIN EN 61215: Terrestrische Photovoltaik-(PV)Module mit Silizium-Solarzellen – Bauarteignung und Bauartzulassung (IEC 61215:1993). DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 1996.
- [DIN61277] N.N.: DIN EN 61277: Terrestrische photovoltaische (PV-) Stromerzeugungssysteme – Allgemeines und Leitfaden (IEC 61277:1995); Deutsche Fassung EN 61277:1998, Ausgabe:1999-02. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 1999.

- [DIN61646] N.N.: DIN EN 61646: Terrestrische Dünnschicht-Photovoltaik-(PV) Module – Bauarteignung und Bauartzulassung (IEC 61646:1996). DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 1998.
- [DON04] N.N.: Produkt INTERSOL-Montagesystem der Donauer Solartechnik Vertriebs GmbH, Gauting, Deutschland. Internetseite: www.donauer-solar.de, Stand 01/04, 2004.
- [DUB01] Dubbel, H.; Beitz, W.: Taschenbuch für den Maschinenbau. 20. Auflage. Springer Verlag, Berlin, 2001.
- [ECO04] N.N.: Produktinformationen der Econergy International, Köln, Deutschland. Internetseite: www.econergy.de, Stand 01/04, 2004
- [EEG00] N.N.: Bundesrepublik Deutschland: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien. Berlin, 29.03.2000, Online-Version: www.gesetzesweb.de/EEG.html.
- [EIA03] N.N.: Annual Energy Outlook 2003 (AEO2003). Energy Information Administration. 2003.
- [ELI98] Eliasson, B.: Renewable Energy: Status and Prospects. ABB-Studie. 1998.
- [ENE04] N.N.: Produktinformationen der Enecolo AG, Mönchaltorf, Schweiz. Internetseite: www.enecolo.ch, Stand 01/04, 2004.
- [ESA04] N.N.: Technische Beschreibung zum Produkt SOLRIF Photovoltaik-Dachintegrationssystem der Ernst Schweizer AG, Hedingen, Schweiz. Internetquelle: www.solrif.ch/download/solrif_v6_dt.pdf, Stand 01/04, 2004.
- [EWG73] N.N.: Richtlinie des Rates vom 19. Februar 1973 betreffend elektrische Betriebsmittel zu Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen (73/23/EWG). EWG Kommission, Brüssel, 1973.
- [FIS98] Fisch, K.: Selbst Solaranlagen, Photovoltaik und Wärmepumpen einbauen. Carl Hanser Verlag, München, 1998.

- [FLA03] Flade, F.: Kraftwerk Sonne – Aus Licht wird Strom. Bundesverband Solarindustrie e.V., Berlin, 2003.
- [FLE00] Fleig, J.: Zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft: mit Nutzenverkauf, Langlebigkeit und Aufarbeitung ökonomisch und ökologisch wirtschaften. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2000.
- [FRI01] Frille, O.: Wettbewerbsorientierte Produktkreisläufe auf Basis des Nutzenverkaufs. Dissertation TU Berlin. dissertation.de – Verlag im Internet GmbH, Berlin, 2001.
- [FUH00] Fuhs, W.: Photovoltaik – Stand und Perspektiven. In: Themen 2000: Sonne – die Energie des 21. Jahrhunderts, Strategien zur Kostensenkung von Solarzellen, Hrsg.: Forschungsverbund Sonnenenergie. Berlin, 2000. S. 14-20.
- [GAB02a] N.N.: Gabler-Wirtschafts-Lexikon. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2002.
- [GAB02b] Gabler, H.: Photovoltaik am Gebäude – Stromversorgung mit Solarzellen?. In: Themen 2001: Integration Erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen, Hrsg.: Forschungsverbund Sonnenenergie, Berlin, 2002. S. 29-35.
- [GAB99] Gabler, H.; Preiser, K.: Photovoltaik – Ein Baustein zur nachhaltigen Entwicklung netzferner Regionen. In: Themen 98/99 – Nachhaltigkeit und Energie, Hrsg.: Forschungsverbund Sonnenenergie. Köln, 1999. S. 28-31.
- [GRA96] Granzeier, W.: Product Design for Photovoltaic Systems. In: 11. Symp. Photovoltaische Solarenergie. OTTI Technol.-Kolleg, 1996. S. 76-81.
- [HAD00] Hadamovsky, H.-F.; Jonas, D.: Solaranlagen (1. Auflage). Vogel Buchverlag, Würzburg, 2000.
- [HAG02] Hagemann, I.B.: Gebäudeintegrierte Photovoltaik: Architektonische Integration der Photovoltaik in die Gebäudehülle. Müller Verlag, Köln, 2002.

- [HEU96] Heuzeroth, D.: Photovoltaik in der Straßenausstattung. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Verkehrstechnik, Heft V 35, Bergisch-Gladbach, 1996.
- [HIR01] Hirschberg, S.: Solare Technologien heute. In: Energie-Spiegel (5/2001). 2001. S. 6-11.
- [HMU00] N.N.: Photovoltaik-Anlagen: Technische Anforderungen, Planungs- und Installationshinweise. Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Wiesbaden, 2000.
- [HOH02] Hohmeyer, O.: Vergleich externer Kosten der Stromerzeugung in Bezug auf das Erneuerbare Energien Gesetz. Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin, 2002.
- [HOT98] Hotopp, R.; Kammler, M.; Lange-Hüsken, M.: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag: nach DIN VDE 0100-410, DIN VDE 0100-470 und DIN VDE 0100-540. VDE-Schriftenreihe, 9: Normen verständlich (11. vollst. überarb. Aufl.), Berlin, 1998.
- [HUL00] Hullmann, H.: Photovoltaik in Gebäuden – Handbuch für Architekten und Ingenieure. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, 2000.
- [IBC04] N.N.: Produktinformationen der IBC Solar AG, Bad Staffelstein, Deutschland. Internetseite: www.ibc-solar.de, Stand 01/04, 2004.
- [IEA01] N.N.: Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2000, Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA – PVPS T1 – 10:2001, 2001.
- [IEC62234] N.N.: Normvorschlag IEC 62234, Ed. 1.0: Safety Regulations for Residential, Grid Connected PV-Power Generating Systems. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2003.
- [ISE02] N.N.: Leistungen und Ergebnisse, Jahresbericht 2001. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg, 2002.

- [KÄL02] Kälin, T.: Bauintegrierte Photovoltaikanlagen der ETHZ Höggerberg. In: Bulletin, Band 93 (2002), Heft 10. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, 2002. S. 19-22.
- [KAL03] Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte (3., vollst. neu bearb. und erw. Aufl.). Springer Verlag, Berlin, 2003.
- [KAR92] Karus, M.; Wittassek, R.; Linden, W.: Umweltaspekte bei der Nutzung von Cadmium-Tellurid-Solarzellen. 8. Internationales Sonnenforum. Berlin, 1992. S. 591-600.
- [KAT95] Kate, K.; et al.: Contribution of Photovoltaic Energy Systems to Energy Saving, Environment and Economy – An Approach Based on Life-Cycle-Analysis. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Nice, 1995. pp. 868-871.
- [KER96] Kern, W.: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1996.
- [KHA97] Khartchenko, N.: Umweltschonende Energietechnik. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1997.
- [KLE00] Kleinkauf, W.: Stromversorgung mit erneuerbaren Energien – Dezentrale Strukturen und modulare Systemtechnik. In: Themen 2000: Sonne – die Energie des 21. Jahrhunderts, Strategien zur Kostensenkung von Solarzellen, Hrsg.: Forschungsverbund Sonnenenergie. Berlin, 2000. S. 49-58.
- [KLE95] Klenke, B.: Beitrag zur Gestaltung von Inselnetzen mit photovoltaischen Generatoren unter Verwendung wissenschaftlicher Systeme. Dissertation TU Berlin. Berlin, 1995.
- [KLO03] Klotz, F.H.: Adaptive Photovoltaik – Tageslichtsysteme auf dem Weg zum Standardprodukt. In: 18. Symp. Photovoltaische Solarenergie. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Inst. und OTTI Energie-Kolleg, Bad Regensburg, 2003. S. 231-235.

- [KOL92] Kolb, G.: Umweltauswirkungen bei der Herstellung und Nutzung von Solarzellen. KfA Jülich, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung, Angewandte Systemanalyse Nr. 64. Bonn, 1992.
- [KRA98] Krauter, S.: Energiebilanzierung photovoltaischer Generatoren unter Berücksichtigung der Reduktion des anthropogenen CO₂-Ausstoßes. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Energietechnik, Düsseldorf, 1998.
- [LAF04] N.N.: Produktinformationen der Marke Braas der Lafarge Dachsysteme GmbH, Oberursel, Deutschland. Internetseite: www.braas.de, Stand 01/04, 2004.
- [LAU02] Lauterbach, F.: Solarstromanlagen zur Netzeinspeisung – Planung, Montage, Betrieb (2. Aufl.). Verlag Technik, Berlin, 2002.
- [LEH95] Lehmann, H.; Reetz, T.: Zukunftsstrategien – Strategien einer neuen Energiepolitik. Birkhäuser Verlag, Berlin, 1995.
- [MÜL01] Müller, K.: Wege zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen. Dissertation TU Berlin. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Berlin, 2001.
- [MUL04] N.N.: Produktinformationen der Multi-Contact AG, Allschwill, Schweiz. Internetseite: www.multi-contact.com, Stand 01/04, 2004.
- [MYR85] Myrup Andreasen, M.; Kähler, S.; Lund, T.: Montagegerechtes Konstruieren, Springer Verlag, Berlin, 1985.
- [OSM04] N.N.: Produktinformationen der Osmer Elektrotechnik GmbH, Lilienthal, Deutschland. Internetseite: www.osmer-solar.de, Stand 01/04, 2004.
- [PAH97] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung. 4. neubearbeitete Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
- [PAL92] Palz, W.; Zibetta, H.: Energy Pay-back Time of Photovoltaic Modules. In: The Yearbook of Renewable Energies 1992, Hrsg.: Scheer, H. et al. Ponte Press, Bochum, 1992.

- [PHO03] N.N.: Marktübersicht Solarmodule 2003. In: Photon – Das Solarstrom-Magazin, Heft 06/03, Solar Verlag, Aachen, 2003. S. 52-68.
- [PHO02] N.N.: Naturparadies mit Komfort. In: Photon – Das Solarstrom-Magazin, Heft 06/02, Solar Verlag, Aachen, 2002. S. 58-60.
- [QUA03] Quaschning, V.: Regenerative Energiesysteme, Technologie – Berechnung – Simulation, 3. Aufl.. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2003.
- [QUA99] Quaschning, V.; Blaschke, C.; Hanitsch, R.: Einsatzmöglichkeiten der Photovoltaik für eine zukunftsfähige Elektrizitätsversorgung in Deutschland. In: 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie. Otti Energie-Kolleg, Staffelstein, 1999. S. 526-530.
- [REI02] Reismayer, S.: Netzgekoppelte Solarstromanlagen. In: Photon – Das Solarstrom-Magazin, Sonderheft: Photon Special (2002). Solar Verlag, Aachen, 2002. S. 17-28.
- [REM00] Rempel, H.: Geht die Kohlenwasserstoff-Ära zu Ende? Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover, 2000.
- [REX02] Rexroth, S.: Energie gestalten. Photovoltaik: Strom aus der Gebäudehülle. In: Sonnenenergie (2002), Sonderheft Solares Bauen. 2002. S. 30-34.
- [RIN00] Rindelhardt, U.: Begriffe der Versorgungswirtschaft – Photovoltaik. Verband der Elektrizitätswirtschaft VDEW e.V., 2000.
- [SCH04] N.N.: Produktinformationen der Leichtmetallbau Schletter GmbH, Haag, Deutschland. Internetseite: www.schletter.de, Stand 01/04, 2004.
- [SCH03a] Schmela, M.: Ein ermutigendes Jahr – Marktübersicht zur weltweiten Solarzellenproduktion 2002. In: Photon – Das Solarstrom-Magazin, Heft 04/03, Solar Verlag, Aachen, 2003. S. 43-47.

- [SCH03b] Schumann, S.; Seliger, G.: Nutzenverkaufsgerechte Produktgestaltung – Flexibilität und Mobilität durch montagegerechte Produktgestaltung am Beispiel von Photovoltaik-Systemen. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 93 (2003), H.9. Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2003. S. 603-608.
- [SCH01] Schattner, S.: Die elektromagnetische Verträglichkeit und der Blitzschutz von PV-Anlagen. Dissertation, Karlsruhe, 2001.
- [SCH98] Scheer, C.: Baukonstruktionen II – Holzbau (6. Aufl.). Technische Universität Berlin, Berlin, 1998.
- [SCH88] Schuh, G.: Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten. Dissertation, RWTH Aachen, 1988.
- [SEL02] Seliger, G.; Schumann, S.; Eggenstein, M.; Meyer, M.: TheoPrax – Inspiring Young Potentials for Engineering by Practical Problem Solving. In: Conference proceedings of 1st International CIRP Manufacturing Education Conference. The Netherlands, Enschede, 2002. pp. 311-318.
- [SEL01a] Seliger, G.; Meyer, M.; Schumann, S.; Eggenstein, M.: Integrating Environmental Considerations into Modern Engineering Education. In: Conference proceedings of IEEE, EcoDesign 2001: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Japan, Tokyo, 2001. pp. 635-641.
- [SEL01b] Seliger, G.; Eggenstein, M.; Schumann, S.: Innovative Use Strategies for Manufacturing Facilities Combining Economical and Ecological Interests. In: Conference Proceedings of 8th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering. Bulgaria, Varna, 2001. pp. 203-209.
- [SEL00a] Seliger, G.: Ökologie als wirtschaftliche Chance. Sfb 281 Demontagefabriken. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 7/2000, Sonderbeilage Demontage. Carl Hanser Verlag, München, 2000. S.1.
- [SEL00b] Seliger, G.; Rebařka, U.; Basdere, B.: Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Betrieb (ZwF), 7/2000, Sonderbeilage Demontage. Carl Hanser Verlag, München, 2000. S. 34-36.

- [SEL00c] Seliger, G.; Basdere, B.; Schumann, S.; Wapler, M.: Technological Conditions for Selling Use instead of Selling Products. In: Conference Proceedings of 7th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering. Japan, Tokyo, 2000. pp. 17-22.
- [SEL97] Seliger G.; Friedrich U.; Müller K.; Perlewitz H.: Produktmodularität steigert die Nutzenproduktivität von Ressourcen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 11/1997. Carl Hanser Verlag, München, 1997. S. 592-595.
- [SIE03a] Siemer, J.: Montagesysteme für Solaranlagen. In: Photon – Das Solarstrom-Magazin, Heft 01/03. Solar Verlag, Aachen, 2003. S. 17-23.
- [SIE03b] Siemer, J.: Für jedes Dach der passende Deckel. In: Photon – Das Solarstrom-Magazin, Heft 01/03, Solar Verlag, Aachen, 2003. S. 34-41.
- [SOL04a] N.N.: Produktinformationen der SolarWorld AG, Bonn, Deutschland. Internetseite: www.solarworld.de, Stand 01/04, 2004.
- [SOL04b] N.N.: Aufdach-Schnellmontagesystem ADS III, Datenblatt und Montageanleitung. SOLARWATT Solar-Systeme GmbH, Dresden, 2003.
- [SOL04c] N.N.: Produkt SOLMAX der Solstis GmbH, Genf, Schweiz. Internetseite: www.solstis.ch, Stand 01/04, 2004.
- [SOL04d] N.N.: Produktinformationen der Fa. Soltech, Bielefeld, Deutschland. Internetseite: www.solartechniken.de, Stand 01/04, 2004.
- [SOL04e] N.N.: Leistungsphasen vor Montagebeginn, Montage von PV-Anlagen der Solarstocc AG, Durach, Deutschland. Internetquelle: www.solarstocc.com/katalog/artikel176.html, Stand 01/04, 2004.
- [SOL04f] N.N.: Montage der Systemprofile, Montage von PV-Anlagen der Solarstocc AG, Durach, Deutschland. Internetquelle: www.solarstocc.com/katalog/artikel73.html, Stand 01/04, 2004.

- [SOL04g] N.N.: Verlegung der Solarkabel, Montage von PV-Anlagen der Solarstocc AG, Durach, Deutschland. Internetquelle: www.solarstocc.com/katalog/artikel101.html, Stand 01/04, 2004.
- [SOL02] N.N.: Solar Energy Industry Statistics – Funding Programs. Solarbuzz. 2002.
- [SPU86] Spur, G.; Stöferle, Th.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 5 (Fügen, Handhaben und Montieren). Carl Hanser Verlag, München, 1986.
- [STA99] Staiß, F.: Nutzungsperspektiven der Photovoltaik in industrialisierten Ländern. In: Themen 98/99 – Nachhaltigkeit und Energie, Hrsg.: Forschungsverbund Sonnenenergie, Köln, 1999. S. 22-27.
- [STA98] Stahl, W.: Die weltweiten Reserven der Energierohstoffe: Mangel oder Überfluß? Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1998.
- [STA96] Staiß, F.: Photovoltaik – Technik, Potentiale und Perspektiven der solaren Stromerzeugung, Braunschweig, 1996.
- [STR01] Stryi-Hipp, G.: PV-Förderung in Deutschland führt zu neuen Photovoltaik-Fabriken. In: Erneuerbare Energien, 2/2001, Online-Ausgabe: www.sses.ch/de/zeitschrift/deutschland_201.html, Stand 01/04. Schweizerische Vereinigung für Sonnenenergie SSES, Bern, 2001.
- [SUN03] N.N.: Berechnungstool der Fa. Sun Consult. Internetquelle: www.sun-consult.de/PVStromanlage.html, Stand 07/03, 2003.
- [SWI03] N.N.: SOLBAC. Swiss Institute of Technology, Lausanne, 2003.
- [UBA02] N.N.: Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Die Zukunft dauerhaft umweltgerecht gestalten. Umweltbundesamt, Berlin, 2002.
- [UNF96] N.N.: Unfallverhütungsvorschrift A1 – Allgemeine Vorschriften. Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, 1996.

- [UNF93] N.N.: Unfallverhütungsvorschrift C22 – Bauarbeiten. Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, 1993.
- [UNF79] N.N.: Unfallverhütungsvorschrift A2 – Elektrische Anlagen und Betriebsmittel. Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, 1979.
- [URS04] N.N.: Produktinformationen der Fa. Urs Bühler Energy Systems and Engineering, Cham, Schweiz. Stand 01/04, 2004.
- [VDI1538] N.N.: VDI-Richtlinie 1538: Technische Regeln zur Photovoltaik – Bestand und Bedarf. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [VDI2221] N.N.: VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [VDI3780] N.N.: VDI-Richtlinie 3780: Technikbewertung – Begriffe und Grundlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [VER98] Verschelling, F.A.; et al: Stand-Alone PV Systems in Water Management. In: 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 1998. pp. 3104-3107.
- [VIE04] N.N.: Produkt Vitovolt 300 der Viessmann Werke GmbH & Co KG, Allendorf, Deutschland. Internetseite: www.viessmann.de, Stand 01/04, 2004.
- [WEC99] Wecker, R.: Wie kann die solare Marktfähigkeit gesteigert werden? In: Chancen der Solartechnik zur Jahrtausendwende – Einsatzmöglichkeiten der Solarthermie und Photovoltaik. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie und Thüringer Staatskanzlei, München, Erfurt, 1999. S. 83-94.
- [WEI95] v. Weizsäcker, E.U.; Lovins, A.B.; Lovins, L.H.: Faktor Vier: doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch. Droemer Knaur Verlag, München, 1995.

- [WIE96] Wiesner, W.: Qualifikation photovoltaischer Systeme und Komponenten als Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz. In: Deutscher Kongress Erneuerbare Energie '96 mit Fachkonferenzen Wind, Photovoltaik, Geothermie. Winkra-Recom, Hanover, 1996. S. 189-198.
- [WIS90] Wismeth, W.: GWU-Solar- und Energiesparsysteme. Ökobuch Verlag, Nürnberg, 1990.
- [WOD00] Woditsch, P.: Kostenreduktionspotentiale bei der Herstellung von PV-Modulen. In: Themen 2000: Sonne – die Energie des 21. Jahrhunderts, Strategien zur Kostensenkung von Solarzellen, Hrsg.: Forschungsverbund Sonnenenergie. Berlin, 2000. S. 72-85.
- [WÖR04] N.N.: Produktinformationen der Fa. Würle Solar und Heizungsbau, Erkheim, Deutschland. Internetseite: www.woerle-solar.de, Stand 01/04, 2004.
- [WOY01] Woyte, A.; Belmans, R.; Nijs, J.: Grid-connected Photovoltaic Systems. In: International Conference Power Generation and Sustainable Development (AIM), Liège, Belgium, 2001. pp. 233-238.
- [YAN99] Yang, J.: Amorphous Silicon Photovoltaics for Terrestrial Applications. In: Chancen der Solartechnik zur Jahrtausendwende – Einsatzmöglichkeiten der Solarthermie und Photovoltaik. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie und Thüringer Staatskanzlei, München, Erfurt, 1999. S. 95-105.
- [ZOP99] Zopf, U.: Wie kann die solare Marktfähigkeit gesteigert werden? In: Chancen der Solartechnik zur Jahrtausendwende – Einsatzmöglichkeiten der Solarthermie und Photovoltaik. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie und Thüringer Staatskanzlei, München, Erfurt, 1999. S. 69-72.

10 Anhang

Anhangsverzeichnis:

Zu Kapitel 4.1.3:

- Tabelle A1: Vollständige Anforderungsmatrix

Zu Kapitel 4.1.4:

- Tabelle A2: Bei der Linearisierung der Matrix entfernte Anforderungen mit Begründung der Entfernung
- Tabelle A3: Vollständige Bewertungsliste

Zu Kapitel 4.2:

- Tabelle A4: Bewertung des Verkabelungssystems Solarline der Multi-Contact AG [MUL04]
- Tabelle A5: Bewertung des AluTec-Systems der Firma Urs Bühler Energy Systems and Engineering [URS04]
- Tabelle A6: Bewertung des Schletter-Systems der Leichtmetallbau Schletter GmbH [SCH04]
- Tabelle A7: Bewertung des Systems PVTec 2000 der Firma Soltech [SOL04d]
- Tabelle A8: Bewertung des Solrif-Systems der Enecolo AG [ENE04]
- Tabelle A9: Ergebnisübersicht der Bewertung der Systeme

Tabelle A1: Vollständige Anforderungsmatrix

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
Sicherheit							
<i>während der Montage</i>							
Allgemeine Sicherheitsvorschriften.	[UNF96, UNF93, UNF79]	muss				[Si-1] Einhaltung der allgemeinen Sicherheitsvorschriften der Berufsgenossenschaft; [Si-2] Persönliche Schutzausrüstungen gegen Absturz für Monteure, ggf. Einrüstung.	
Isolationsfehler bei der Montage stellen Gefahren für die Monteure sowie für die allgemeine Sicherheit dar.	[VDI1538], S.72	kann	[Si-3] Kabelführung an Bauelementen klar markieren und festlegen.			[Si-4] Verkabelung aus einadrigen Kabeln und einadrigen Mantelleitungen verwenden.	
<i>während des Betriebs</i>							
PV-Module können bei Lichteinstrahlung lebensgefährliche elektrische Spannung erzeugen.	[DIN0100, DIN0106, DIN50110, HOT98, VDI1538]	muss		[Si-5] UV- und Witterungslangzeitbeständigkeit der Leitungen (min. 20 Jahre).	[Si-6] System erlaubt Parallelverschaltung der Module, um elektrische Spannung niedrig halten zu können; [Si-7] Leerlaufspannung des Generators darf 120 V nicht übersteigen.	[Si-8] Berührungsschutz der elektrischen Kontakte auch im ungesteckten Zustand, d.h. elektrische Sicherheit während der Montage; [Si-9] unerlaubtes Lösen der Verkabelung ist konstruktiv verhindert; [Si-10] Eignung der Verkabelung für Standard-Anschlussdosen; [Si-11] Kompaktes Steckerdesign (Verringerung des Platzbedarfs in Kabelschächten).	[Si-12] Besondere Isolierung der Betriebsmittel gegen elektrischen Schlag.

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
Funktionsfähigkeit							
<i>Zuverlässigkeit und Haltbarkeit</i>							
Verschraubung von Modulen verzögert den Montageprozess und kann Verwindungsspannungen erzeugen.	[SIE03b]	kann				[Fu-1] System erlaubt das Fixieren der Module ohne Verschraubung.	
<i>Wartungszugänglichkeit</i>							
Die Module können im montierten Zustand beschädigt werden bzw. ausfallen.	[HUL00], S.100	kann			[Fu-2] System erlaubt Zugang zu und Austausch von einzelnen Modulen.		
Eine mögliche Reparatur der Dachhaut erfordert Demontage des darüber liegenden PV-Generators.	[LAU02], S.63	kann				[Fu-3] Kontrolle der Dachhaut vor Montage, bei evtl. erforderlichem Austausch / Reparatur ist dies vor Montage durchführen.	
Tieren und Pflanzen muss genügend Freiraum unter der PV-Anlage gegeben werden können.		kann					[Fu-4] Aufständigung für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.
<i>Übereinstimmung mit den Kundenwünschen</i>							
PV-Anlage wird bei Aufdachmontage oft optisch als Fremdkörper wahrgenommen.		kann			[Fu-5] Anpassung an Dachform ermöglichen.	[Fu-6] Optisch-harmonische Montage.	[Fu-7] Ausschöpfung von Design-Potentialen.
Kapazität der Anlage soll nachträglich erweitert oder verringert werden.		kann	[Fu-8] Anschluss von Ausbauteilen an bestehende Anlage möglich.		[Fu-9] Erweiterbarkeit bzw. Reduzierbarkeit der Anlage gewährleisten.		
Anlage soll vor oder nach Ablauf der Lebenszeit demontiert werden.		kann	[Fu-10] Wiederverwendung der Elemente möglich.			[Fu-11] Montage und Demontage zerstörungsfrei, sonst hohe Instandsetzungskosten.	

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
<i>Schnittstellengestaltung</i>							
Kraftaufbringung auf Dachziegel kann zu Ziegelbruch führen.		kann	[Fu-12] Sparrenanker/Dachhaken müssen Lasten des Generators aufnehmen, ohne sich auf den Dachziegeln abzustützen.			[Fu-13] Vorsicht bei Laufen auf Dachhaut, bei Schieferdächern immer Dachdecker hinzuziehen.	
Elektrische Kabel müssen mit anderen Elementen unter der Dachhaut verbunden werden; die Dichtigkeit des Daches darf aber nicht gefährdet werden.		kann				[Fu-14] Verkabelung zum Anschlusskasten möglich durch Lüftungsziegel o.ä..	
Schutzfunktion des Daches darf nicht verletzt werden.	[SOL04e]	muss				[Fu-15] Statische Prüfung, insbesondere bei Flachdachmontage. Die Flächenlast des PV-Generators ist dabei mit 20-22 kg/m ² anzusetzen.	
Dachsparrenabstand und Modulabmessungen sind nicht standardisiert.	[SCH98]	kann			[Fu-16] System ermöglicht Montage auch bei unterschiedlichen Abmessungen der Dachsparren sowie der Module.		
Dachunebenheiten behindern Fluchtung bzw. Ausrichtung der Module.	[SOL04f]	kann			[Fu-17] Höhenausgleich an Dachhaken möglich.		
Laub kann Zwischenraum zwischen Generator und Dachhaut verstopfen und Regenabfluss behindern.	[HMU00], S.47	kann			[Fu-18] Genügend Abstand des Generators von der Dachhaut gewährleisten.		

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
Bei Flach- und Blechdächern ist keine Verschraubung ohne Verletzung der Dachhaut möglich.		kann	[Fu-19] System kann in Dachisolation des Flachdaches integriert werden (v.a. bei Neubauten interessant).		[Fu-20] Verwendung von speziellen Klemmen ohne Durchdringung des Daches.		
PV-Generator bildet nicht gesamte Dacheindeckung, sondern wird kombiniert mit z.B. Ziegeln.	[ESA04]	kann	[Fu-21] System erlaubt einfachen Übergang zu anderer Dacheindeckung.				
Schutz der Komponenten vor Diebstahl oder Beschädigung gewährleisten.	[HUL00], S.99	kann	[Fu-22] Sicherung der Elemente gegen unbefugtes Demontieren.				
Wirtschaftlichkeit							
<i>Ertragssteigerung</i>							
Stromertrag sinkt mit steigender Temperatur der Solarzellen.	[WIS90], S.11	kann					[Wi-1] System ermöglicht ausreichende Kühlung der Module, z.B. durch Hinterlüftung.
PV-Anlagen erbringen höchsten Ertrag bei senkrechter Ausrichtung zur Sonne.	[HUL00], S.90	kann	[Wi-2] System ermöglicht Nachführung oder 45° bzw. 30° Ausrichtung, unabhängig vom Untergrund.				[Wi-3] Bei Aufdachmontage erzeugt Korrektur des Neigungswinkels der Module zur Dachhaut starke Windlasten.
Verschattung verringert den Ertrag und kann sog. "Hotspots" hervorrufen.	[HAG02], S.46	kann	[Wi-4] Vermeidung von Verschattung einzelner Zellen, insbesondere durch hervorstehende Schrauben oder hohe/breite Rahmenprofile.				

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
Verschmutzungen und Schnee können die Moduloberfläche bedecken und zu Ertragseinbußen führen.	WI-6: [HAG02], S.43-48; WI-7: [DIN61215] [DIN61646]	kann		[Wi-5] Umrahmung der Module muss Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc) sicherstellen; [Wi-6] Module mit hafter Oberfläche verwenden (Selbstreinigungseffekt).	[Wi-7] Verwendung von rahmenlosen Modulen ermöglichen (Laminat).		
Die Gleichstromseite der Anlage wird üblicherweise mit niedriger Spannung betrieben, somit können hohe Ertragseinbußen durch lange Leitungen entstehen.	[HUL00], S.95	kann			[Wi-8] Spannungsabfall und Kosten durch möglichst kurze Gleichstromverkabelung minimieren.		
<i>Kostensenkung</i>							
Eine Verschaltung der Module vor Verschraubung auf dem Dach verlängert die Arbeitszeit allgemein und im absturzfährdeten Bereich; das Handling der Generatorelemente wird erschwert.		kann			[Wi-9] Verschaltung der Module nach Montage jedes einzelnen Moduls ermöglichen.		
Mehr Anwendungsmöglichkeiten erschließen Kostendegressionseffekte durch Stückzahlsteigerung.	[SIE03b]	kann	[Wi-10] System ist für verschiedene Montagearten geeignet.		[Wi-11] Keine Bindung an bestimmte Module/Modulgrößen/Rahmenarten.		
Dachbefestigungspunkte können nur aufwendig montiert werden (z.B. Sparrenanker, Dachhaken).	[SIE03b]	kann	[Wi-12] Keine Veränderung der vorhandenen Dachkonstruktion erforderlich.	[Wi-13] Verwendung von Dachelementen (z.B. Austauschziegeln) mit integrierten Befestigungspunkten.	[Wi-14] Minimierung der erforderlichen Befestigungspunkte auf dem Dach.		

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
Zur Montage erforderliches Bohren im Modul kann die aktive Schicht beschädigen und kostet Montagezeit.	[HUL00], S.100	kann				[Wi-15] System erlaubt Montage ohne zusätzliches Bohren in Modulen oder Profilen.	
Unsauber verlegte Kabel erschweren die Wartung und die Montage ("Kabelbindermontage").			[Wi-16] Kabelführung an Bauelementen vorsehen (Kanäle in Profilen etc.).				
Die Erdungsverkabelung erfordert zusätzlichen Aufwand.	[DIN61215]	kann					[Wi-17] Verwendung von Schutzklasse II-konformen Modulen (keine Erdung per Norm erfordert).
Kurze Montagezeit vermeidet Personalkosten.	[HUL00], S.98	kann	[Wi-18] Stabile Auslegung der Elemente und spannungsfreie Herstellung der Module (bei gerahmten Modulen), um Beschädigungsrisiko zu verringern.		[Wi-19] Vorkonfektionierte Sets von Montageteilen; [Wi-20] Kabelsteckverbindungen; [Wi-21] mit Steckern vorkonfektionierte Kabel.	[Wi-22] Anlieferung aller Komponenten zur selben Zeit, nach Möglichkeit Vermeidung von Transportschäden; Kontrolle auf Beschädigungen vor Montage.	[Wi-23] Montagearme Gewährleistung der Dichtigkeit der Dachhaut (z.B. Dichtfolien sind aufwendig zu montieren).
Äußere Einflüsse							
<i>Gesetze, Richtlinien und Vorschriften</i>							
Dacheindeckung muss vom Dachdecker durchgeführt werden (Gewerkentrennung).	[HUL00]	muss			[Um-1] System ermöglicht Verwendung von anschlussfertigen Modulen, dann kann der Monteur die Verkabelung bis zum Anschlusskasten übernehmen.		
PV-Anlagen dürfen nur von Elektrofachkraft oder unter Aufsicht dieser errichtet werden (Gewerkentrennung).	[UNF79]	muss				[Um-2] Installation des Gleichrichters muss von Elektrofachkraft durchgeführt werden.	

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
CE-Kennzeichnungspflicht für Generator.	[EWG73]	muss	[Um-3] Nur CE-zertifizierte elektrische Elemente verwenden.				
Bauvorschriften fordern ggf. Schließung des Daches vor elektrischer Verkabelung.	[VDI1538] S.67	muss				[Um-4] Dachintegration: Koordination von Dachdecken und Elektrifizierung; Angebot der Planungshilfe für Bauplaner.	
Bauvorschriften fordern Dichtigkeitsnachweis des Daches.		muss					[Um-5] Dichtigkeit des gesamten Systems bei Indach-Montage sicherstellen.
<i>Normen</i>							
Generator der Schutzklasse II muss außerhalb der Reichweite von Personen angebracht werden.	[IEC62234]	muss					[Um-6] Personenkontakt mittels Absperrungen verhindern (Vorsicht bei zugänglichen Flachdächern, z.B. Dachterrassen).
Zusatzlasten und Windlasten dürfen nicht zu groß für Dachstuhl oder Dachfläche sein.	[DIN1055, LAU02]	muss	[Um-7] System muss Kräfte aufnehmen und ableiten können.	[Um-8] Erforderliche Steifigkeit des Befestigungssystems durch entsprechende Materialauswahl gewährleisten.		[Um-9] Dachstuhl überprüfen und abschätzen, ggf. statische Prüfung für Flachdächer.	[Um-10] Haltepunkte stabil genug auslegen, um Wind- und Wetterfestigkeit zu gewährleisten (Dachhaken, Befestigungsziegel).
<i>Umweltqualität</i>							
Umgebungstemperatur steigt auf Dächern im Sommer nicht selten auf 70°C, im Dachstuhl auf 55°C.	[HMU00], S.51	kann	[Um-11] Dehnungsfugen zwischen Bauelementen vorsehen.	[Um-12] Temperaturbeständigkeit gewährleisten im Bereich -40°C bis 70°C.			

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
Korrosion oder Ausfall der Verkabelung oder Anschlussdosen erfordern Wartung und Ersatz.	[HUL00], S.115	kann		[Um-13] UV- und Witterungsbeständigkeit der Leitungen; [Um-14] Langzeitbeständigkeit von Steckverbindungen im Außenbereich.			
Haltbarkeit heutiger Module liegt bei 20-30 Jahren.	[HMU00], S.47	kann		[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für gleiche Lebensdauer wie Module; [Um-16] Holz nur nach Kesseldruckimprägnierung verwendbar; Holz für Flachdächer zu schwer; [Um-17] Verwendung von gleichen oder isolierten Materialien für Befestigung: Modulrahmen, Schrauben, Klammern usw., um Korrosionsprobleme durch elektrochemische Zersetzung zu vermeiden.			
Wasser kann in die Modulanschlussboxen eindringen.	[SOL04g]	kann				[Um-18] Die Einführung der Solarkabel in die Modulanschlussdosen hat von unten zu erfolgen, so dass ein Eindringen von Wasser über die Kabeleinführung ausgeschlossen werden kann (Abtropfschlaufe bilden).	

	Lit.-Quelle	muss kann	Geometrie	Material	Flexibilität	Montageprozess	Umgebungswirkung
Schutz gegen Schäden durch Blitzschlag.	[HUL00], S.130	kann					[Um-19] Erdung der Generatorenhäuser über die Montagestruktur; evtl. Verbindung zur bestehenden Blitzschutzanlage am nächsten Punkt.
Bei Dachintegration bildet sich unter PV-Modulen Kondenswasser im Dach.	[SIE03b]	kann					[Um-20] Ableitung von Kondenswasser ermöglichen.

Tabelle A2: Bei der Linearisierung der Matrix entfernte Anforderungen mit Begründung der Entfernung

Entfernte Anforderung	Begründung
[Um-7] System muss Kräfte aufnehmen und ableiten können.	Nicht ohne entsprechende Versuche überprüfbar, es wird angenommen, dass am Markt verfügbare Systeme dementsprechend ausgelegt sind.
[Um-8] Erforderliche Steifigkeit des Befestigungssystems durch entsprechende Materialauswahl gewährleisten.	Nicht ohne entsprechende Versuche überprüfbar, es wird angenommen, dass am Markt verfügbare Systeme dementsprechend ausgelegt sind.
[Si-7] Leerlaufspannung des Generators darf 120 V nicht übersteigen.	Wird durch die Erfüllung der Anforderung [Si-6] gewährleistet.
[Fu-15] Statische Prüfung insbesondere bei Flachdachmontage. Die zu erwartende Flächenlast des PV-Generators ist dabei mit 20-22 kg/m ² anzusetzen.	Eine eventuelle statische Prüfung vor Montage ist organisatorisch zu lösen, die Erfüllung ist unabhängig vom System.
[Si-12] Besondere Isolierung der Betriebsmittel gegen elektrischen Schlag.	Wird durch die Erfüllung der Anforderung [Si-8] gewährleistet.
[Um-2] Installation des Gleichrichters muss von Elektrofachkraft durchgeführt werden.	Wer den Anschluss durchführt, ist für die technische Auslegung des Systems nur von geringer Bedeutung.
[Um-4] Dachintegration: Koordination von Dachdecken und Elektrifizierung; Angebot der Planungshilfe für Bauplaner.	Erfordert organisatorische Lösungen, keine technischen.
[Um-16] Holz nur nach Kesseldruckimprägnierung verwendbar; Holz für Flachdächer zu schwer.	Nur für Freilandmontage relevant, da Holz für Dachmontage zu schwer. Nischenmarkt, Systemlösung für mehrere Montagearten dadurch unmöglich.
[Um-6] Personenkontakt mittels Absperrungen verhindern (Vorsicht bei zugänglichen Flachdächern, z.B. Dachterrassen).	Unabhängig vom System; bei Dachmontage ist erforderliche Entfernung grundsätzlich gegeben.
[Fu-3] Kontrolle der Dachhaut vor Montage; bei evtl. erforderlichem Austausch/Reparatur ist diese vor Montage durchführen.	Erfordert organisatorische Lösungen, keine technischen.
[Fu-6] Optisch-harmonische Montage.	Bewertung sehr schwer bis unmöglich, da nur subjektiv bewertbar.
[Wi-14] Minimierung der erforderlichen Befestigungspunkte auf dem Dach.	Geht in Anforderung [Wi-13] auf.
[Fu-7] Ausschöpfung von Design-Potentialen.	Bewertung sehr schwer bis unmöglich, da nur subjektiv bewertbar.
[Si-1] Einhaltung der allgemeinen Sicherheitsvorschriften der Berufsgenossenschaft.	Befolgung der Vorschriften ist unabhängig vom System.

Entfernte Anforderung	Begründung
[Si-2] Persönliche Schutzausrüstungen gegen Absturz für Monteure, ggf. Einrüstung.	Befolgung der Vorschriften ist unabhängig vom System.
[Wi-22] Anlieferung aller Komponenten zur selben Zeit. Nach Möglichkeit Vermeidung von Transportschäden; Kontrolle auf Beschädigungen vor Montage.	Erfordert organisatorische Lösungen, keine technischen.
[Um-9] Dachstuhl überprüfen und abschätzen, ggf. statische Prüfung für Flachdächer.	Eine eventuelle statische Prüfung vor Montage ist organisatorisch zu lösen, die Erfüllung ist unabhängig vom System. Redundant mit [Fu-15].
[Um-13] UV- und Witterungsbeständigkeit der Leitungen.	Wird durch die Erfüllung der Anforderung [Si-5] gewährleistet.
[Fu-13] Vorsicht bei Laufen auf Dachhaut; bei Schieferdächern immer Dachdecker hinzuziehen.	Unabhängig vom System; Sorgfalt eines ordentlichen Handwerkers kann bei jeder Montage erwartet werden.
[Fu-14] Verkabelung zum Anschlusskasten möglich durch Lüftungziegel o.ä..	Es wurde kein System gefunden, bei der eine solche Verkabelung nicht möglich wäre.
[Wi-3] Bei Aufdach-Montage erzeugt Korrektur des Neigungswinkels der Module zur Dachhaut starke Windlasten.	Wird durch die Höhenverstellbarkeit der Befestigungspunkte gewährleistet [Fu-17].
[Fu-8] Anschluss von Ausbauteilen an bestehende Anlage möglich.	Wird durch die Erfüllung der Anforderung [Fu-9] gewährleistet.
[Um-14] Langzeitbeständigkeit von Steckverbindungen im Außenbereich.	Wird durch die Erfüllung der Anforderung [Si-5] gewährleistet.

Tabelle A3: Vollständige Bewertungsliste

Systemname: x		
Muss-Anforderungen	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
Genügende technische Informationen verfügbar?		
[Um-3] Nur CE-zertifizierte elektrische Elemente verwenden.		
[Um-1] System ermöglicht Verwendung von anschlussfertigen Modulen, dann kann der Monteur die Verkabelung bis zum Anschlusskasten übernehmen.		
[Um-5] Dichtigkeit des gesamten Systems bei Indach-Montage sicherstellen.		
[Um-10] Haltepunkte stabil genug auslegen, um Wind- und Wetterfestigkeit zu gewährleisten (Dachhaken, Befestigungsziegel).		
Wertung	x %	
Geometrie	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-16] Kabelführung an Bauelementen vorsehen (Kanäle in Profilen etc.).		
[Fu-10] Wiederverwendung der Elemente möglich.		
[Fu-12] Sparrenanker/Dachhaken müssen Lasten des Generators aufnehmen, ohne sich auf den Dachziegeln abzustützen.		
[Fu-19] System kann in Dachisolation des Flachdaches integriert werden (v.a. bei Neubauten interessant).		
[Fu-21] System erlaubt einfachen Übergang zu anderer Dacheindeckung.		
[Fu-22] Sicherung der Elemente gegen unbefugtes Demontieren.		
[Wi-2] System ermöglicht Nachführung oder 45° bzw. 30° Ausrichtung unabhängig vom Untergrund.		
[Wi-4] Vermeidung von Verschattung einzelner Zellen, insbesondere durch hervorstehende Schrauben oder hohe/breite Rahmenprofile.		

[Wi-10] System ist für verschiedene Montagearten geeignet.		
Schrägdach über der Dachhaut		
Dachintegrierte Schrägdachmontage		
Flachdach bzw. Bodenmontage		
Fassadenmontage		
[Wi-12] Keine Veränderung der vorhandenen Dachkonstruktion zur Anbringung der Befestigungspunkte erforderlich.		
[Wi-18] Stabile Auslegung der Elemente und spannungsfreie Herstellung der Module (bei gerahmten Modulen), um Beschädigungsrisiko zu verringern.		
[Um-11] Dehnungsfugen zwischen Bauelementen vorsehen.		
Wertung Geometrie	x %	
Material	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-5] Umrahmung der Module muss Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc.) sicherstellen.		
[Wi-6] Module mit haftarmer Oberfläche verwenden (Selbstreinigungseffekt).		
[Wi-13] Verwendung von Dachelementen (z.B. Austauschziegeln) mit integrierten Befestigungspunkten und Minimierung der erforderlichen Punkte.		
[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für mindestens gleiche Lebensdauer wie Module.		
[Um-17] Verwendung von gleichen oder isolierten Materialien für Befestigung: Modulrahmen, Schrauben, Klammern usw., um Korrosionsprobleme durch elektrochemische Zersetzung zu vermeiden.		
Wertung Material	x %	

Flexibilität	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-2] System erlaubt Zugang zu und Austausch von einzelnen Modulen.		
[Fu-5] Anpassung an Dachform ermöglichen.		
[Fu-9] Erweiterbarkeit bzw. Reduzierbarkeit der Anlage gewährleisten.		
[Fu-16] System ermöglicht Montage auch bei unterschiedlichen Abmessungen der Dachsparren sowie der Module.		
[Fu-17] Höhenausgleich an Befestigungspunkten möglich.		
[Fu-18] Genügend Abstand des Generators von der Dachhaut gewährleisten, um Verstopfungen durch Laub o.ä. zu vermeiden.		
[Fu-20] Verwendung von speziellen Klemmen ohne Durchdringung des Daches.		
[Wi-7] Verwendung von rahmenlosen Modulen ermöglichen (Laminare).		
[Wi-8] Spannungsabfall und Kosten durch möglichst kurze Gleichstromverkabelung minimieren.		
[Wi-9] Verschaltung der Module nach Montage jedes einzelnen Moduls ermöglichen.		
[Wi-11] Keine Bindung an bestimmte Module/Modulgrößen/Rahmenarten.		
[Wi-19] Vorkonfektionierte Sets von Montageteilen.		
Wertung Flexibilität	x %	
Montageprozess	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-1] System erlaubt das Fixieren der Module ohne Verschraubung.		
[Fu-11] Montage und Demontage möglichst zerstörungsfrei, sonst hohe Instandsetzungskosten.		
[Wi-15] System erlaubt Montage ohne zusätzliches Bohren in Modulen oder Profilen.		
[Um-18] Die Einführung der Solarkabel in die Modulanschlussdosen hat von unten zu erfolgen, so dass ein Eindringen von Wasser über die Kabeleinführung ausgeschlossen werden kann (Abtropfschlaufe bilden).		
Wertung Montageprozess	x %	

Umgebungswirkung	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-4] Aufständering für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.		
[Wi-1] System ermöglicht ausreichende Kühlung der Module, z.B. durch Hinterlüftung.		
[Wi-23] Montagearme Gewährleistung der Dichtigkeit der Dachhaut (z.B. Dichtfolien sind aufwendig zu montieren).		
[Wi-17] Verwendung von Schutzklasse II-konformen Modulen (keine Erdung per Norm erforderlich).		
[Um-19] Erdung der Generatorengehäuse über die Montagestruktur; evtl. Verbindung zur bestehenden Blitzschutzeinrichtung am nächsten Punkt.		
[Um-20] Ableitung von Kondenswasser ermöglichen.		
Wertung Umgebungswirkung	x %	
Gesamtwertung System (alle Anforderungen gleich gewichtet)	x %	

1: Anforderung erfüllt;

0: Anforderung nicht erfüllt;

n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

Tabelle A4: Bewertung des Verkabelungssystems Solarline der Multi-Contact AG [MUL04]

Systemname: Solarline		
Anforderungen an die Elektrik aus mehreren Bereichen	ja/nein	
[Si-5] UV- und Witterungslangzeitbeständigkeit der Leitungen (min. 20 Jahre).	1	
[Si-6] System erlaubt Parallelverschaltung der Module, um elektrische Spannung niedrig halten zu können.	1	Parallelverschaltung durch T-Stücke möglich.
[Si-8] Berührungsschutz der elektrischen Kontakte auch im ungesteckten Zustand, d.h. elektrische Sicherheit während der Montage.	1	In Steckern und Buchsen verdeckte Kontakte.
[Si-9] Unerlaubtes Lösen der Verkabelung ist konstruktiv verhindert.	1	Auszugkraft der Steckverbindungen 50 N, nur durch Zusammendrücken des Steckers ausziehbar.
[Um-12] Temperaturbeständigkeit gewährleisten im Bereich -40° C bis 70°C.	1	-40°C bis +90°C.
[Si-10] Eignung der Verkabelung für Standard-Anschlussdosen.	1	
[Si-11] Kompaktes Steckerdesign (Verringerung des Platzbedarfes in Kabelschächten).	1	Stecker und Buchsen 13,5 mm Durchmesser.
[Wi-20] Kabelsteckverbindungen.	1	
[Wi-21] (Mit Steckern) vorkonfektionierte Kabel.	1	
[Si-4] Verkabelung aus einadrigen Kabeln und einadrigen Mantelleitungen verwenden.	1	
[Si-3] Kabelführung an Bauelementen klar markieren und festlegen.	1	Kabelführung ist durch unterschiedliche Länge sowie Steckverbindung klar (Verpolung physisch unmöglich).
Wertung	100,0%	

1: Anforderung erfüllt;

0: Anforderung nicht erfüllt;

n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

Tabelle A5: Bewertung des AluTec-Systems der Firma Urs Bühler Energy Systems and Engineering [URS04]

Systemname: AluTec / AluStand		
Muss-Anforderungen	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
Genügende technische Informationen verfügbar?	1	Technische Beschreibung & Studie (alutec.pdf).
[Um-3] Nur CE-zertifizierte elektrische Elemente verwenden.	1	
[Um-1] System ermöglicht Verwendung von anschlussfertigen Modulen, dann kann der Monteur die Verkabelung bis zum Anschlusskasten übernehmen.	1	
[Um-5] Dichtigkeit des gesamten Systems bei Indach-Montage sicherstellen.	1	Aber: System nicht für Dachintegration konstruiert, erfordert Abdichtung mittels Dichtfolie unter der Anlage.
[Um-10] Haltepunkte stabil genug auslegen, um Wind- und Wetterfestigkeit zu gewährleisten (Dachhaken, Befestigungsziegel).	1	Verschraubte Dachhaken.
Wertung	100,0%	
Geometrie	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-16] Kabelführung an Bauelementen vorsehen (Kanäle in Profilen etc.).	1	Kabelkanäle in Profilen vorgesehen.
[Fu-10] Wiederverwendung der Elemente möglich.	1	Demontageaufwand entspricht Montageaufwand.
[Fu-12] Sparrenanker/Dachhaken müssen Lasten des Generators aufnehmen, ohne sich auf den Dachziegeln abzustützen.	1	Keine gegenteiligen Informationen.
[Fu-19] System kann in Dachisolation des Flachdaches integriert werden (v.a. bei Neubauten interessant).	0	Keine entsprechende Montageplattform für Flachdachaufständerung vorhanden.
[Fu-21] System erlaubt einfachen Übergang zu anderer Dacheindeckung.	0	Keine Randabschlussbleche im System, Folienabdichtung.
[Fu-22] Sicherung der Elemente gegen unbefugtes Demontieren.	1	Profilabschlusskanten können mit Spezialschrauben gesichert werden.
[Wi-2] System ermöglicht Nachführung oder 45° bzw. 30° Ausrichtung unabhängig vom Untergrund.	0	Flachdachaufständerung: nur 30°, sonst kein Ausgleich möglich.
[Wi-4] Vermeidung von Verschattung einzelner Zellen, insbesondere durch hervorstehende Schrauben oder hohe/breite Rahmenprofile.	1	Keine überstehenden Elemente, Profilkanten sind nur 0,6 mm dick.

[Wi-10] System ist für verschiedene Montagearten geeignet.		
Schrägdach über der Dachhaut	1	
Dachintegrierte Schrägdachmontage	1	Abdichtung erfolgt mittels untergezogener Dichtfolie (aufwendig).
Flachdach bzw. Bodenmontage	1	
Fassadenmontage	1	
[Wi-12] Keine Veränderung der vorhandenen Dachkonstruktion zur Anbringung der Befestigungspunkte erforderlich.	1	
[Wi-18] Stabile Auslegung der Elemente und spannungsfreie Herstellung der Module (bei gerahmten Modulen), um Beschädigungsrisiko zu verringern.	1	Verwendung von geeigneten Standard-Modulen möglich.
[Um-11] Dehnungsfugen zwischen Bauelementen vorsehen.	1	Dehnfuge zwischen Profilen vorhanden.
Wertung Geometrie	80,0%	
Material	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-5] Umrahmung der Module muss Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc.) sicherstellen.	1	Verwendung von geeigneten Standard-Modulen möglich.
[Wi-6] Module mit haftarmer Oberfläche verwenden (Selbstreinigungseffekt).	1	Verwendung von geeigneten Standard-Modulen möglich.
[Wi-13] Verwendung von Dachelementen (z.B. Austauschziegeln) mit integrierten Befestigungspunkten und Minimierung der erforderlichen Punkte.	0	Maximaler Abstand der vertikalen (lasttragenden) Profile: 1,8 m.
[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für mindestens gleiche Lebensdauer wie Module.	1	Alle Teile bestehen aus nicht-korrozierendem Material (Aluminium bzw. nicht rostender Stahl).
[Um-17] Verwendung von gleichen oder isolierten Materialien für Befestigung: Modulrahmen, Schrauben, Klammern usw., um Korrosionsprobleme durch elektrochemische Zersetzung zu vermeiden.	0	Keine Isolierung an Kontaktstellen.
Wertung Material	60,0%	

Flexibilität	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-2] System erlaubt Zugang zu und Austausch von einzelnen Modulen.	1	
[Fu-5] Anpassung an Dachform ermöglichen.	1	Durch 2 Profillagen Ausgleich von Unebenheiten gut möglich.
[Fu-9] Erweiterbarkeit bzw. Reduzierbarkeit der Anlage gewährleisten.	1	Profile können / müssen mit Zwischenstücken verlängert werden.
[Fu-16] System ermöglicht Montage auch bei unterschiedlichen Abmessungen der Dachsparren sowie der Module.	0	Profile müssen genau auf Moduldicke angepasst sein, sonst kein sicherer Halt.
[Fu-17] Höhenausgleich an Befestigungspunkten möglich.	1	Verwendung von Dachhaken mit Höhenausgleich bis zu 20 mm.
[Fu-18] Genügend Abstand des Generators von der Dachhaut gewährleisten, um Verstopfungen durch Laub o.ä. zu vermeiden.	1	
[Fu-20] Verwendung von speziellen Klemmen ohne Durchdringung des Daches.	0	Wird nicht im System angeboten.
[Wi-7] Verwendung von rahmenlosen Modulen ermöglichen (Laminate).	0	Modulrahmen wird zwingend zur Befestigung benötigt.
[Wi-8] Spannungsabfall und Kosten durch möglichst kurze Gleichstromverkabelung minimieren.	1	Zentrale Positionierung des Wechselrichters unter dem Dach möglich.
[Wi-9] Verschaltung der Module nach Montage jedes einzelnen Moduls ermöglichen.	1	Verschaltung bei Montage der einzelnen Module.
[Wi-11] Keine Bindung an bestimmte Module/Modulgrößen/Rahmenarten.	0	Profile müssen genau auf Moduldicke angepasst sein, sonst kein sicherer Halt.
[Wi-19] Vorkonfektionierte Sets von Montageteilen.	0	Teile müssen einzeln geordert werden.
Wertung Flexibilität	58,3%	

Montageprozess	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-1] System erlaubt das Fixieren der Module ohne Verschraubung.	1	Module werden nur eingelegt und festgeklemmt.
[Fu-11] Montage und Demontage möglichst zerstörungsfrei, sonst hohe Instandsetzungskosten.	0	Ausfräsen der Ziegel, Bohrungen in Dachkonstruktion, Löcher in Well-Eternit-Dächern.
[Wi-15] System erlaubt Montage ohne zusätzliches Bohren in Modulen oder Profilen.	0	Kein Bohren in Modulen, aber Bohren in Profilen auf dem Dach.
[Um-18] Die Einführung der Solarkabel in die Modulanschlussdosen hat von unten zu erfolgen, so dass ein Eindringen von Wasser über die Kabeleinführung ausgeschlossen werden kann (Abtropfschlaufe bilden).	1	
Wertung Montageprozess	50,0%	
Umgebungswirkung	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-4] Aufständering für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.	0	Dachdachelement "Alustand" wird nur in einer Höhe angeboten.
[Wi-1] System ermöglicht ausreichende Kühlung der Module, z.B. durch Hinterlüftung.	1	Konvektion wird nicht durch quer verlaufende Streben gestört.
[Wi-23] Montagearme Gewährleistung der Dichtigkeit der Dachhaut (z.B. Dichtfolien sind aufwendig zu montieren).	0	Abdichtung erfolgt mittels untergezogener Dichtfolie (aufwendig).
[Wi-17] Verwendung von Schutzklasse II-konformen Modulen (keine Erdung per Norm erfordert).	1	
[Um-19] Erdung der Generatorengehäuse über die Montagestruktur; evtl. Verbindung zur bestehenden Blitzschutzanlage am nächsten Punkt.	1	Erdung der Montageprofile leicht möglich.
[Um-20] Ableitung von Kondenswasser ermöglichen.	0	
Wertung Umgebungswirkung	50,0%	
Gesamtwertung System (alle Anforderungen gleich gewichtet)	64,3%	

1: Anforderung erfüllt;

0: Anforderung nicht erfüllt;

n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

Tabelle A6: Bewertung des Schletter-Systems der Leichtmetallbau Schletter GmbH [SCH04]

Systemname: Schletter		
Muss-Anforderungen	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
Genügende technische Informationen verfügbar?	1	Beschreibung auf Homepage.
[Um-3] Nur CE-zertifizierte elektrische Elemente verwenden.	1	
[Um-1] System ermöglicht Verwendung von anschlussfertigen Modulen, dann kann der Monteur die Verkabelung bis zum Anschlusskasten übernehmen.	1	
[Um-5] Dichtigkeit des gesamten Systems bei Indach-Montage sicherstellen.	n/a	Keine Dachintegration, System noch Vorbereitung.
[Um-10] Haltepunkte stabil genug auslegen, um Wind- und Wetterfestigkeit zu gewährleisten (Dachhaken, Befestigungsziegel).	1	Durch Zugversuche nachgewiesen.
Wertung	100,0%	
Geometrie	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-16] Kabelführung an Bauelementen vorsehen (Kanäle in Profilen etc.).	1	Profile mit Kabelkanal verfügbar.
[Fu-10] Wiederverwendung der Elemente möglich.	1	
[Fu-12] Sparrenanker/Dachhaken müssen Lasten des Generators aufnehmen, ohne sich auf den Dachziegeln abzustützen.	1	Nachweis durch Zugversuche für verschiedene Befestigungspunkte.
[Fu-19] System kann in Dachisolation des Flachdaches integriert werden (v.a. bei Neubauten interessant).	0	Keine entsprechende Montageplattform für Flachdachaufständerung vorhanden.
[Fu-21] System erlaubt einfachen Übergang zu anderer Dacheindeckung.	n/a	Dachintegration noch nicht vorgesehen.
[Fu-22] Sicherung der Elemente gegen unbefugtes Demontieren.	1	Durch Einschlag von Stahl-Kugeln in Imbus-Schrauben (aber: Danach nur noch durch Zerstörung der Schrauben zu öffnen).
[Wi-2] System ermöglicht Nachführung oder 45° bzw. 30° Ausrichtung unabhängig vom Untergrund.	1	Flexibler Flachdach- und Bodenständer.
[Wi-4] Vermeidung von Verschattung einzelner Zellen, insbesondere durch hervorstehende Schrauben oder hohe/breite Rahmenprofile.	1	Verwendung von flachen Klemmen, keine Schatten.

[Wi-10] System ist für verschiedene Montagearten geeignet.		
Schrägdach über der Dachhaut	1	
Dachintegrierte Schrägdachmontage	0	
Flachdach bzw. Bodenmontage	1	
Fassadenmontage	1	
[Wi-12] Keine Veränderung der vorhandenen Dachkonstruktion zur Anbringung der Befestigungspunkte erforderlich.	1	
[Wi-18] Stabile Auslegung der Elemente und spannungsfreie Herstellung der Module (bei gerahmten Modulen), um Beschädigungsrisiko zu verringern.	1	Nachweis durch Zugversuche.
[Um-11] Dehnungsfugen zwischen Bauelementen vorsehen.	0	Module werden durch Klemmen formschlüssig gehalten, Ausdehnung der Module durch Erwärmung muss zu Verspannungen führen.
Wertung Geometrie	78,6%	
Material	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-5] Umrahmung der Module muss Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc.) sicherstellen.	1	Verwendung von geeigneten Standard-Modulen möglich.
[Wi-6] Module mit haftarmer Oberfläche verwenden (Selbstreinigungseffekt).	1	Verwendung von geeigneten Standard-Modulen möglich.
[Wi-13] Verwendung von Dachelementen (z.B. Austauschziegeln) mit integrierten Befestigungspunkten und Minimierung der erforderlichen Punkte.	0	Wird nicht im System angeboten.
[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für mindestens gleiche Lebensdauer wie Module.	1	Alle Teile bestehen aus nicht korrodierendem Material (Aluminium bzw. nicht rostender Stahl).
[Um-17] Verwendung von gleichen oder isolierten Materialien für Befestigung: Modulrahmen, Schrauben, Klammern usw., um Korrosionsprobleme durch elektrochemische Zersetzung zu vermeiden.	0	Keine Isolierung an Kontaktstellen.
Wertung Material	60,0%	

Flexibilität	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-2] System erlaubt Zugang zu und Austausch von einzelnen Modulen.	0	Nur durch Lockerung von min. 1 weiterem Modul möglich (1 Klemme hält 2 Module).
[Fu-5] Anpassung an Dachform ermöglichen.	1	"Gridtop" erlaubt größere Freiheit durch 2 Profillaugen.
[Fu-9] Erweiterbarkeit bzw. Reduzierbarkeit der Anlage gewährleisten.	1	
[Fu-16] System ermöglicht Montage auch bei unterschiedlichen Abmessungen der Dachsparren sowie der Module.	1	T-Trägerprofil erlaubt auch weite Unterstützungsabstände.
[Fu-17] Höhenausgleich an Befestigungspunkten möglich.	1	Verschiedene Dachhaken zur Auswahl.
[Fu-18] Genügend Abstand des Generators von der Dachhaut gewährleisten, um Verstopfungen durch Laub o.ä. zu vermeiden.	1	
[Fu-20] Verwendung von speziellen Klemmen ohne Durchdringung des Daches.	1	
[Wi-7] Verwendung von rahmenlosen Modulen ermöglichen (Laminat).	1	Spezielle Laminat-Klemmen verfügbar.
[Wi-8] Spannungsabfall und Kosten durch möglichst kurze Gleichstromverkabelung minimieren.	1	
[Wi-9] Verschaltung der Module nach Montage jedes einzelnen Moduls ermöglichen.	1	Verschaltung bei Montage der einzelnen Module.
[Wi-11] Keine Bindung an bestimmte Module/Modulgrößen/Rahmenarten.	1	
[Wi-19] Vorkonfektionierte Sets von Montageteilen.	1	
Wertung Flexibilität	91,7%	
Montageprozess	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-1] System erlaubt das Fixieren der Module ohne Verschraubung.	0	Module müssen verschraubt werden (2n+2 Schrauben zur Fixierung der Module, n=Anzahl der Module des Systems).
[Fu-11] Montage und Demontage möglichst zerstörungsfrei, sonst hohe Instandsetzungskosten.	0	Ausfräsen der Ziegel, Bohrungen in Dachkonstruktion, Löcher in Well-Eternit-Dächern.
[Wi-15] System erlaubt Montage ohne zusätzliches Bohren in Modulen oder Profilen.	1	Nach Setzen der Dachhaken ist Montage mittels Schraubendreher und Schlüssel möglich.
[Um-18] Die Einführung der Solarkabel in die Modulanschlussdosen hat von unten zu erfolgen, so dass ein Eindringen von Wasser über die Kabeleinführung ausgeschlossen werden kann (Abtropfschlaufe bilden).	1	Verwendung von Standardmodulen und -laminaten.
Wertung Montageprozess	50,0%	

Umgebungswirkung	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-4] Aufständering für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.	1	System sieht verschiedene Halterungen für Bodenmontage in verschiedenen Höhen vor.
[Wi-1] System ermöglicht ausreichende Kühlung der Module, z.B. durch Hinterlüftung.	n/a	
[Wi-23] Montagearme Gewährleistung der Dichtigkeit der Dachhaut (z.B. Dichtfolien sind aufwendig zu montieren).	n/a	Keine Dachintegration.
[Wi-17] Verwendung von Schutzklasse II-konformen Modulen (keine Erdung per Norm erforderlich).	1	Verwendung von Standardmodulen und –laminaten.
[Um-19] Erdung der Generatorenhäuse über die Montagestruktur; evtl. Verbindung zur bestehenden Blitzschutzeinrichtung am nächsten Punkt.	1	
[Um-20] Ableitung von Kondenswasser ermöglichen.	n/a	Keine Dachintegration.
Wertung Umgebungswirkung	100,0%	
Gesamtwertung System (alle Anforderungen gleich gewichtet)	78,9%	

1: Anforderung erfüllt;

0: Anforderung nicht erfüllt;

n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

Tabelle A7: Bewertung des Systems PVTec 2000 der Firma Soltech [SOL04d]

Systemname: PVTec 2000		
Muss-Anforderungen	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
Genügende technische Informationen verfügbar?	1	
[Um-3] Nur CE-zertifizierte elektrische Elemente verwenden.	1	Verwendung von Standardmodulen und -laminaten.
[Um-1] System ermöglicht Verwendung von anschlussfertigen Modulen, dann kann der Monteur die Verkabelung bis zum Anschlusskasten übernehmen.	1	Verwendung von Standardmodulen und -laminaten.
[Um-5] Dichtigkeit des gesamten Systems bei Indach-Montage sicherstellen.	1	Abdichten der Standard-Module/Laminaten durch Klebefolien.
[Um-10] Haltepunkte stabil genug auslegen, um Wind- und Wetterfestigkeit zu gewährleisten (Dachhaken, Befestigungsziegel).	1	
Wertung	100%	
Geometrie	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-16] Kabelführung an Bauelementen vorsehen (Kanäle in Profilen etc.).	0	Keine Kabelkanäle in Profilen.
[Fu-10] Wiederverwendung der Elemente möglich.	1	
[Fu-12] Sparrenanker/Dachhaken müssen Lasten des Generators aufnehmen, ohne sich auf den Dachziegeln abzustützen.	1	Keine gegenteiligen Informationen.
[Fu-19] System kann in Dachisolation des Flachdaches integriert werden (v.a. bei Neubauten interessant).	0	Keine entsprechende Montageplattform für Flachdachaufständerung vorhanden.
[Fu-21] System erlaubt einfachen Übergang zu anderer Dacheindeckung.	1	Übergang wird per "Wakaflex"-Anschluss bei Dachschindeln montagearm gewährleistet.
[Fu-22] Sicherung der Elemente gegen unbefugtes Demontieren.	0	Verwendung von Standardschrauben.
[Wi-2] System ermöglicht Nachführung oder 45° bzw. 30° Ausrichtung unabhängig vom Untergrund.	1	Flachdachträger auf 30° ausgerichtet.
[Wi-4] Vermeidung von Verschattung einzelner Zellen, insbesondere durch hervorstehende Schrauben oder hohe/breite Rahmenprofile.	1	Es werden nur flache Leisten zur Befestigung verwendet, 10 mm Klemmbreite.

[Wi-10] System ist für verschiedene Montagearten geeignet.		
Schrägdach über der Dachhaut	1	
Dachintegrierte Schrägdachmontage	1	
Flachdach bzw. Bodenmontage	1	
Fassadenmontage	1	
[Wi-12] Keine Veränderung der vorhandenen Dachkonstruktion zur Anbringung der Befestigungspunkte erforderlich.	1	
[Wi-18] Stabile Auslegung der Elemente und spannungsfreie Herstellung der Module (bei gerahmten Modulen), um Beschädigungsrisiko zu verringern.	1	Standard-Module.
[Um-11] Dehnungsfugen zwischen Bauelementen vorsehen.	1	Zwischenraum zwischen Modulen konstruktionsbedingt gewährleistet.
Wertung Geometrie	80,0%	
Material	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-5] Umrahmung der Module muss Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc.) sicherstellen.	1	Verwendung von geeigneten Standard-Modulen möglich.
[Wi-6] Module mit haftarmer Oberfläche verwenden (Selbstreinigungseffekt).	1	Verwendung von geeigneten Standard-Modulen möglich.
[Wi-13] Verwendung von Dachelementen (z.B. Austauschziegeln) mit integrierten Befestigungspunkten und Minimierung der erforderlichen Punkte.	0	
[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für mindestens gleiche Lebensdauer wie Module.	1	Alle Teile bestehen aus nicht-korrozierendem Material (Aluminium bzw. nicht rostender Stahl).
[Um-17] Verwendung von gleichen oder isolierten Materialien für Befestigung: Modulrahmen, Schrauben, Klammern usw., um Korrosionsprobleme durch elektrochemische Zersetzung zu vermeiden.	0	Keine Isolierung an Kontaktstellen.
Wertung Material	60,0%	

Flexibilität	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-2] System erlaubt Zugang zu und Austausch von einzelnen Modulen.	0	Nur durch Lockerung von min. 1 weiterem Modul möglich (1 Klemme hält 2 Module).
[Fu-5] Anpassung an Dachform ermöglichen.	1	2 Profillagen möglich zum Ausgleich.
[Fu-9] Erweiterbarkeit bzw. Reduzierbarkeit der Anlage gewährleisten.	1	
[Fu-16] System ermöglicht Montage auch bei unterschiedlichen Abmessungen der Dachsparren sowie der Module.	1	
[Fu-17] Höhenausgleich an Befestigungspunkten möglich.	0	Keine entsprechenden Dachhaken.
[Fu-18] Genügend Abstand des Generators von der Dachhaut gewährleisten, um Verstopfungen durch Laub o.ä. zu vermeiden.	1	
[Fu-20] Verwendung von speziellen Klemmen ohne Durchdringung des Daches.	0	Wird nicht im System angeboten.
[Wi-7] Verwendung von rahmenlosen Modulen ermöglichen (Lamine).	1	
[Wi-8] Spannungsabfall und Kosten durch möglichst kurze Gleichstromverkabelung minimieren.	1	
[Wi-9] Verschaltung der Module nach Montage jedes einzelnen Moduls ermöglichen.	1	Verschaltung bei Montage der einzelnen Module.
[Wi-11] Keine Bindung an bestimmte Module/Modulgrößen/Rahmenarten.	1	
[Wi-19] Vorkonfektionierte Sets von Montageteilen.	0	Einzelbestellung erforderlich.
Wertung Flexibilität	66,7%	
Montageprozess	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-1] System erlaubt das Fixieren der Module ohne Verschraubung.	0	Module müssen verschraubt werden (2n+2 Schrauben zur Fixierung der Module, n=Anzahl der Module des Systems).
[Fu-11] Montage und Demontage möglichst zerstörungsfrei, sonst hohe Instandsetzungskosten.	0	Ausfräsen der Ziegel.
[Wi-15] System erlaubt Montage ohne zusätzliches Bohren in Modulen oder Profilen.	1	Nach Setzen der Befestigungspunkte kein weiteres Bohren erforderlich.
[Um-18] Die Einführung der Solarkabel in die Modulanschlussdosen hat von unten zu erfolgen, so dass ein Eindringen von Wasser über die Kabeleinführung ausgeschlossen werden kann (Abtropfschlaufe bilden).	1	
Wertung Montageprozess	50,0%	

Umgebungswirkung	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-4] Aufständigung für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.	n/a	Kein Gründachsystem / kein Freilandssystem.
[Wi-1] System ermöglicht ausreichende Kühlung der Module, z.B. durch Hinterlüftung.	0	Keine besondere Hinterlüftungsmöglichkeit bei Dachintegration.
[Wi-23] Montagearme Gewährleistung der Dichtigkeit der Dachhaut (z.B. Dichtfolien sind aufwändig zu montieren).	1	Dichtung wird von Außen aufgeklebt.
[Wi-17] Verwendung von Schutzklasse II-konformen Modulen (keine Erdung per Norm erforderlich).	1	Verwendung von Standardmodulen und -laminaten.
[Um-19] Erdung der Generatorenhäuser über die Montagestruktur; evtl. Verbindung zur bestehenden Blitzschutzanlage am nächsten Punkt.	1	
[Um-20] Ableitung von Kondenswasser ermöglichen.	0	Keine Vorkehrung im Profil, kein Dachintegrationssystem.
Wertung Umgebungswirkung	60,0%	
Gesamtwertung System (alle Anforderungen gleich gewichtet)	68,3%	

1: Anforderung erfüllt;

0: Anforderung nicht erfüllt;

n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

Tabelle A8: Bewertung des Solrif-Systems der Enecolo AG [ENE04]

Systemname: SOLRIF		
Muss-Anforderungen	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
Genügende technische Informationen verfügbar?	1	Ausführliche technische Beschreibungen inkl. Montageanleitungen.
[Um-3] Nur CE-zertifizierte elektrische Elemente verwenden.	1	Verwendung von Standardlaminaten.
[Um-1] System ermöglicht Verwendung von anschlussfertigen Modulen, dann kann der Monteur die Verkabelung bis zum Anschlusskasten übernehmen.	1	Verwendung von Standardlaminaten.
[Um-5] Dichtigkeit des gesamten Systems bei Indach-Montage sicherstellen.	1	Durch Befestigungssystem selbst sichergestellt (!).
[Um-10] Haltepunkte stabil genug auslegen, um Wind- und Wetterfestigkeit zu gewährleisten (Dachhaken, Befestigungsziegel).	1	
	Wertung	100,0%
Geometrie	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-16] Kabelführung an Bauelementen vorsehen (Kanäle in Profilen etc.).	0	Kabelführung muss an Dachkonstruktion erfolgen.
[Fu-10] Wiederverwendung der Elemente möglich.	0	Nur eingeschränkt möglich wg. Farbgebung des Rahmens.
[Fu-12] Sparrenanker/Dachhaken müssen Lasten des Generators aufnehmen, ohne sich auf den Dachziegeln abzustützen.	n/a	
[Fu-19] System kann in Dachisolation des Flachdaches integriert werden (v.a. bei Neubauten interessant).	n/a	Keine Flachdachaufständering.
[Fu-21] System erlaubt einfachen Übergang zu anderer Dacheindeckung.	1	
[Fu-22] Sicherung der Elemente gegen unbefugtes Demontieren.	0	Elemente können ohne Aufwand entnommen werden.
[Wi-2] System ermöglicht Nachführung oder 45° bzw. 30° Ausrichtung unabhängig vom Untergrund.	0	Keine Flachdachaufständering, kein Höhenausgleich möglich.
[Wi-4] Vermeidung von Verschattung einzelner Zellen, insbesondere durch hervorstehende Schrauben oder hohe/breite Rahmenprofile.	1	

[Wi-10] System ist für verschiedene Montagearten geeignet.		
Schrägdach über der Dachhaut	0	
Dachintegrierte Schrägdachmontage	1	
Flachdach bzw. Bodenmontage	0	
Fassadenmontage	0	
[Wi-12] Keine Veränderung der vorhandenen Dachkonstruktion zur Anbringung der Befestigungspunkte erforderlich.	1	
[Wi-18] Stabile Auslegung der Elemente und spannungsfreie Herstellung der Module (bei gerahmten Modulen), um Beschädigungsrisiko zu verringern.	1	
[Um-11] Dehnungsfugen zwischen Bauelementen vorsehen.	1	Elemente überlappen, Dehnungsfugen in Überlappung.
Wertung Geometrie	46,2%	
Material	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Wi-5] Umrahmung der Module muss Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc.) sicherstellen.	1	
[Wi-6] Module mit haftarmer Oberfläche verwenden (Selbstreinigungseffekt).	1	
[Wi-13] Verwendung von Dachelementen (z.B. Austauschziegeln) mit integrierten Befestigungspunkten und Minimierung der erforderlichen Punkte.	n/a	
[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für mindestens gleiche Lebensdauer wie Module.	1	Aluminiumrahmen.
[Um-17] Verwendung von gleichen oder isolierten Materialien für Befestigung: Modulrahmen, Schrauben, Klammern usw., um Korrosionsprobleme durch elektrochemische Zersetzung zu vermeiden.	1	Unproblematisch möglich.
Wertung Material	100,0%	

Flexibilität	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-2] System erlaubt Zugang zu und Austausch von einzelnen Modulen.	1	
[Fu-5] Anpassung an Dachform ermöglichen.	0	Muss als geschlossene Fläche eingedeckt werden.
[Fu-9] Erweiterbarkeit bzw. Reduzierbarkeit der Anlage gewährleisten.	0	Nur unter großem Aufwand möglich.
[Fu-16] System ermöglicht Montage auch bei unterschiedlichen Abmessungen der Dachsparren sowie der Module.	1	Rahmung für jede Abmessung möglich, Dachsparrenabstand zur Montage irrelevant.
[Fu-17] Höhenausgleich an Befestigungspunkten möglich.	0	Keine Befestigungspunkte, Höhenausgleich nicht möglich.
[Fu-18] Genügend Abstand des Generators von der Dachhaut gewährleisten, um Verstopfungen durch Laub o.ä. zu vermeiden.	n/a	
[Fu-20] Verwendung von speziellen Klemmen ohne Durchdringung des Daches.	n/a	Keine Überdachmontage auf Schrägdächern möglich.
[Wi-7] Verwendung von rahmenlosen Modulen ermöglichen (Lamine).	1	Es können ausschließlich Lamine verwendet werden.
[Wi-8] Spannungsabfall und Kosten durch möglichst kurze Gleichstromverkabelung minimieren.	1	
[Wi-9] Verschaltung der Module nach Montage jedes einzelnen Moduls ermöglichen.	1	
[Wi-11] Keine Bindung an bestimmte Module/Modulgrößen/Rahmenarten.	1	
[Wi-19] Vorkonfektionierte Sets von Montageteilen.	1	
Wertung Flexibilität	70,0%	
Montageprozess	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-1] System erlaubt das Fixieren der Module ohne Verschraubung.	1	Einzelne Ziegel werden nur überlappend aufgelegt.
[Fu-11] Montage und Demontage möglichst zerstörungsfrei, sonst hohe Instandsetzungskosten.	1	Ersatz der Dachhaut, jedoch wiederherstellbar.
[Wi-15] System erlaubt Montage ohne zusätzliches Bohren in Modulen oder Profilen.	1	
[Um-18] Die Einführung der Solarkabel in die Modulanschlussdosen hat von unten zu erfolgen, so dass ein Eindringen von Wasser über die Kabeleinführung ausgeschlossen werden kann (Abtropfschlaufe bilden).	1	
Wertung Montageprozess	100,0%	

Umgebungswirkung	ja/nein	Begründung / weitere Informationen
[Fu-4] Aufständigung für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.	n/a	Keine Flach- und Bodenaufständigung.
[Wi-1] System ermöglicht ausreichende Kühlung der Module, z.B. durch Hinterlüftung.	1	Abschlussbleche oben und unten verfügen über Lüftungsschlitze.
[Wi-23] Montagearme Gewährleistung der Dichtigkeit der Dachhaut (z.B. Dichtfolien sind aufwändig zu montieren).	1	Befestigungssystem selbst stellt Dichtigkeit her.
[Wi-17] Verwendung von Schutzklasse II-konformen Modulen (keine Erdung per Norm erforderlich).	1	
[Um-19] Erdung der Generatorenhäuser über die Montagestruktur; evtl. Verbindung zur bestehenden Blitzschutzanlage am nächsten Punkt.	1	
[Um-20] Ableitung von Kondenswasser ermöglichen.	1	Kein Problem durch gute Hinterlüftung (ähnlich wie Ziegeldächer).
Wertung Umgebungswirkung	100,0%	
Gesamtwertung System (alle Anforderungen gleich gewichtet)	72,2%	

1: Anforderung erfüllt;

0: Anforderung nicht erfüllt;

n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

Tabelle A9: Ergebnisübersicht der Bewertung der Systeme

Systemname:	AluTec	Schletter	PVTec	SOLRIF	Filter*
Geometrie					
[Wi-16] Kabelführung an Bauelementen vorsehen (Kanäle in Profilen etc.).	1	1	0	0	zwei
[Fu-10] Wiederverwendung der Elemente möglich.	1	1	1	0	drei
[Fu-12] Sparrenanker/Dachhaken müssen Lasten des Generators aufnehmen, ohne sich auf den Dachziegeln abzustützen.	1	1	1	n/a	drei
[Fu-19] System kann in Dachisolation des Flachdaches integriert werden (v.a. bei Neubauten interessant).	0	0	0	n/a	keins
[Fu-21] System erlaubt einfachen Übergang zu anderer Dacheindeckung.	0	n/a	1	1	zwei
[Fu-22] Sicherung der Elemente gegen unbefugtes Demontieren.	1	1	0	0	zwei
[Wi-2] System ermöglicht Nachführung oder 45° bzw. 30° Ausrichtung unabhängig vom Untergrund.	0	1	1	0	zwei
[Wi-4] Vermeidung von Verschattung einzelner Zellen, insbesondere durch hervorstehende Schrauben oder hohe/breite Rahmenprofile.	1	1	1	1	alle
[Wi-10] System ist für verschiedene Montagearten geeignet.					
Schrägdach über der Dachhaut	1	1	1	0	drei
Dachintegrierte Schrägdachmontage	1	0	1	1	drei
Flachdach bzw. Bodenmontage	1	1	1	0	drei
Fassadenmontage	1	1	1	0	drei
[Wi-12] Keine Veränderung der vorhandenen Dachkonstruktion zur Anbringung der Befestigungspunkte erforderlich.	1	1	1	1	alle
[Wi-18] Stabile Auslegung der Elemente und spannungsfreie Herstellung der Module (bei gerahmten Modulen), um Beschädigungsrisiko zu verringern.	1	1	1	1	alle
[Um-11] Dehnungsfugen zwischen Bauelementen vorsehen.	1	0	1	1	drei
Wertung Geometrie	80,0 %	78,6 %	80,0 %	46,2 %	

Systemname:	AluTec	Schletter	PVTec	SOLRIF	Filter*
Material					
[Wi-5] Umrahmung der Module muss Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc.) sicherstellen.	1	1	1	1	alle
[Wi-6] Module mit haftarmer Oberfläche verwenden (Selbstreinigungseffekt).	1	1	1	1	alle
[Wi-13] Verwendung von Dachelementen (z.B. Austauschziegeln) mit integrierten Befestigungspunkten und Minimierung der erforderlichen Punkte.	0	0	0	n/a	keins
[Um-15] Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit des Befestigungssystems für mindestens gleiche Lebensdauer wie Module.	1	1	1	1	alle
[Um-17] Verwendung von gleichen oder isolierten Materialien für Befestigung: Modulrahmen, Schrauben, Klammern usw., um Korrosionsprobleme durch elektrochemische Zersetzung zu vermeiden.	0	0	0	1	eins
Wertung Material	60,0 %	60,0 %	60,0 %	100,0 %	
Flexibilität					
[Fu-2] System erlaubt Zugang zu und Austausch von einzelnen Modulen.	1	0	0	1	zwei
[Fu-5] Anpassung an Dachform ermöglichen.	1	1	1	0	drei
[Fu-9] Erweiterbarkeit bzw. Reduzierbarkeit der Anlage gewährleisten.	1	1	1	0	drei
[Fu-16] System ermöglicht Montage auch bei unterschiedlichen Abmessungen der Dachsparren sowie der Module.	0	1	1	1	drei
[Fu-17] Höhenausgleich an Befestigungspunkten möglich.	1	1	0	0	zwei
[Fu-18] Genügend Abstand des Generators von der Dachhaut gewährleisten, um Verstopfungen durch Laub o.ä. zu vermeiden.	1	1	1	n/a	drei
[Fu-20] Verwendung von speziellen Klemmen ohne Durchdringung des Daches.	0	1	0	n/a	eins
[Wi-7] Verwendung von rahmenlosen Modulen ermöglichen (Laminate).	0	1	1	1	drei
[Wi-8] Spannungsabfall und Kosten durch möglichst kurze Gleichstromverkabelung minimieren.	1	1	1	1	alle
[Wi-9] Verschaltung der Module nach Montage jedes einzelnen Moduls ermöglichen.	1	1	1	1	alle
[Wi-11] Keine Bindung an bestimmte Module/Modulgrößen/Rahmenarten.	0	1	1	1	drei
[Wi-19] Vorkonfektionierte Sets von Montageteilen.	0	1	0	1	zwei
Wertung Flexibilität	58,3 %	91,7 %	66,7 %	70,0 %	

Systemname:	AluTec	Schletter	PVTec	SOLRIF	Filter*
Montageprozess					
[Fu-1] System erlaubt das Fixieren der Module ohne Verschraubung.	1	0	0	1	zwei
[Fu-11] Montage und Demontage möglichst zerstörungsfrei, sonst hohe Instandsetzungskosten.	0	0	0	1	eins
[Wi-15] System erlaubt Montage ohne zusätzliches Bohren in Modulen oder Profilen.	0	1	1	1	drei
[Um-18] Die Einführung der Solarkabel in die Modulanschlussdosen hat von unten zu erfolgen, so dass ein Eindringen von Wasser über die Kabeleinführung ausgeschlossen werden kann (Abtropfschlaufe bilden).	1	1	1	1	alle
Wertung Montageprozess	50,0 %	50,0 %	50,0 %	100,0 %	
Umgebungswirkung					
[Fu-4] Aufständering für genügend Freiraum zum Boden anpassbar.	0	1	n/a	n/a	eins
[Wi-1] System ermöglicht ausreichende Kühlung der Module, z.B. durch Hinterlüftung.	1	n/a	0	1	zwei
[Wi-23] Montagearme Gewährleistung der Dichtigkeit der Dachhaut (z.B. Dichtfolien sind aufwendig zu montieren).	0	n/a	1	1	zwei
[Wi-17] Verwendung von Schutzklasse II-konformen Modulen (keine Erdung per Norm erforderlich).	1	1	1	1	alle
[Um-19] Erdung der Generatorenhäuser über die Montagestruktur; evtl. Verbindung zur bestehenden Blitzschutzanlage am nächsten Punkt.	1	1	1	1	alle
[Um-20] Ableitung von Kondenswasser ermöglichen.	0	n/a	0	1	eins
Wertung Umgebungswirkung	50,0 %	100,0 %	60,0 %	100,0 %	
Gesamtwertung System (alle Anforderungen gleich gewichtet)	64,3 %	78,9 %	68,3 %	72,2 %	

1: Anforderung erfüllt;

0: Anforderung nicht erfüllt;

n/a: Anforderung trifft auf das System nicht zu

*: Die Spalte Filter gibt an, wie viele Systeme die jeweilige Anforderung erfüllen