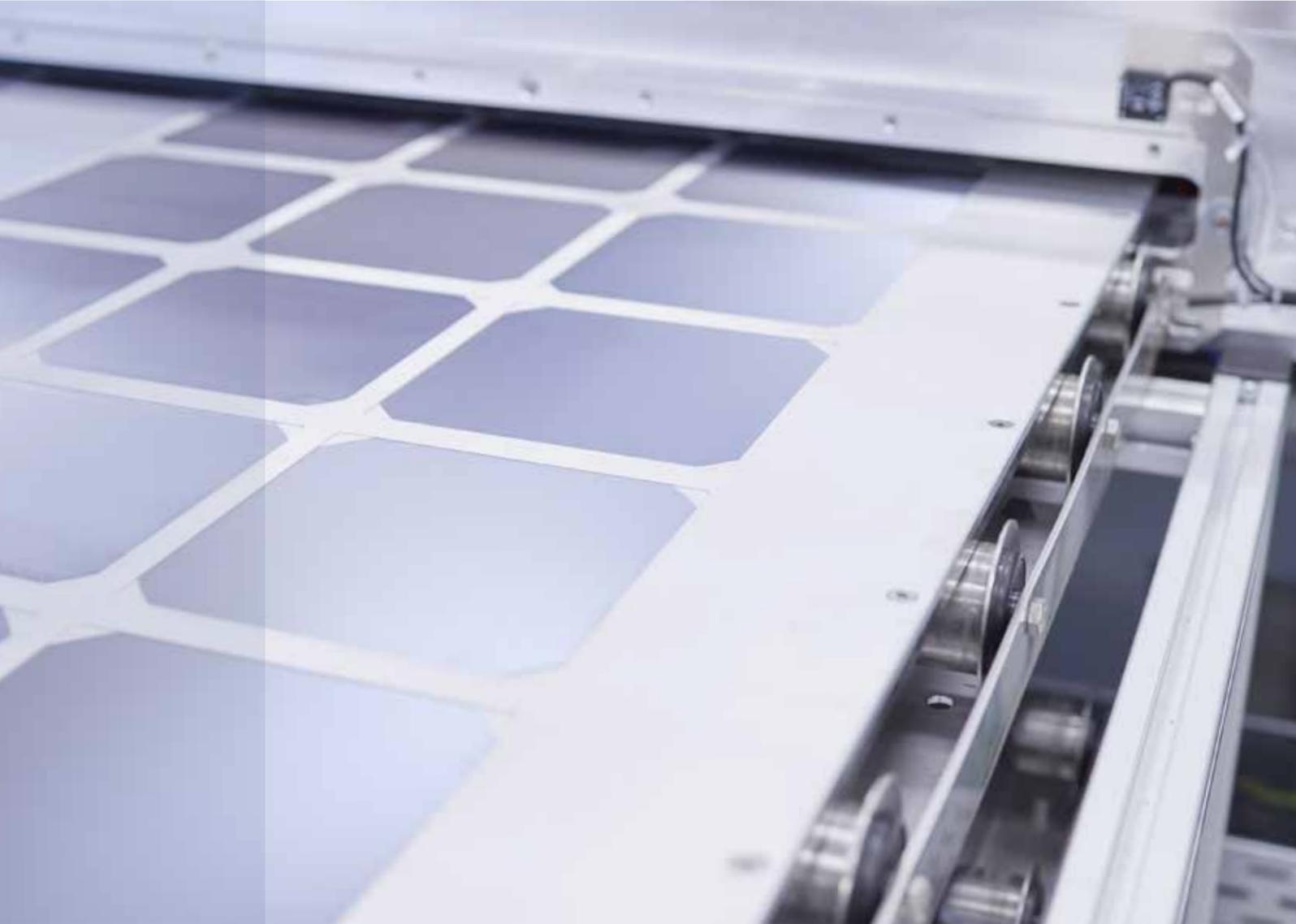




Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Energie BFE**



# Schweizer Forschungs- und Technologielandschaft im Bereich Photovoltaik

Januar 2017



Schweizer Forschungs- und Technologielandschaft im Bereich Photovoltaik

**Bundesamt für Energie BFE**  
Forschungsbereich Photovoltaik  
Stefan Oberholzer  
CH-3003 Bern, Schweiz

Januar 2017

[www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>1 Globale Entwicklungen im Bereich Photovoltaik</b>	<b>3</b>
1.1 Bedeutung der Photovoltaik in der künftigen Energieversorgung	3
1.2 Globale Marktentwicklung	3
1.3 Reduktion der Gestehungskosten von Photovoltaikstrom	4
1.4 Industrieentwicklung	5
1.5 Technologieentwicklung	6
<b>2 Photovoltaik in der Schweiz</b>	<b>8</b>
2.1 Rolle der Photovoltaik in der Energiestrategie 2050	8
2.2 Marktentwicklung in der Schweiz	8
<b>3 Photovoltaik im Kontext «Cleantech»</b>	<b>9</b>
<b>4 Schweizer Technologieentwicklung und Forschung im Bereich Photovoltaik</b>	<b>11</b>
4.1 Akteure in der Industrie	11
4.2 Akteure an Hochschulen	14
4.3 Themenfelder in Forschung, Umsetzung und Industrie	17
<b>5 Wissens- und Technologietransfer</b>	<b>18</b>
<b>6 Förderung im Bereich Photovoltaikforschung</b>	<b>18</b>
<b>7 Beispiele für Zusammenarbeit von Hochschule und Industrie</b>	<b>19</b>
<b>8 Referenzen</b>	<b>20</b>

## Zusammenfassung

Im Vergleich verschiedener Optionen zur Bereitstellung erneuerbarer Energie verfügt die Photovoltaik über sehr hohe Ausbaupotenziale bei tiefen Gestehungskosten. Sowohl global wie national wird dieser Technologie deshalb in der künftigen Energieversorgung eine tragende Rolle zugeschrieben.

Schweizer Akteure in Forschung und Industrie sind in verschiedenen Teilbereichen der Photovoltaik international führend. Die absehbaren weltweiten Entwicklungen bei der Solarstromnutzung bieten dem Schweizer Technologie- und Industriestandort Chancen und Entwicklungsmöglichkeiten, um in diesem internationalen Wachstumsmarkt eine bedeutendere volkswirtschaftliche Rolle zu spielen, verbunden mit einer entsprechenden Wertschöpfung.

Die gute Ausgangslage der Schweizer Photovoltaikindustrie basiert auf Anstrengungen in den letzten Jahrzehnten in Forschung und Entwicklung verbunden mit der industriellen Umsetzung von Innovationen. Ergänzt wird dies durch eine allgemein gute Struktur der nationalen Forschungsförderung.

In den letzten Jahren wurden zusätzliche öffentliche Fördermittel für die Photovoltaikforschung speziell für industrie- und umsetzungsnahe Aktivitäten bereitgestellt. Insbesondere konnte ein nationales und industrieorientiertes Kompetenzzentrum für Photovoltaik geschaffen werden. Die Anzahl an Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekten zur Erprobung und Demonstration neuer Photovoltaiktechnologien hat deutlich zugenommen. Ausserdem wurden die Mittel für Industrieprojekte gefördert durch die Kommission für Technologie und Innovation aufgestockt. Zusammen mit speziellen Förderinitiativen («Nano-Tera») und Nationalen Forschungsprogrammen (NFP 70 und 71) des Schweizerischen Nationalfonds, den Forschungsrahmenprogrammen der Europäischen Kommission sowie mit dem gezielten Einsatz der spezifisch für Photovoltaik vorgesehenen Mittel für anwendungsorientierte Forschung

am Bundesamt für Energie wurde die Entwicklung der Photovoltaikforschung in der Schweiz positiv beeinflusst. Gemäss der Schweizer Energieforschungsstatistik liegen die insgesamt für die Forschung und Entwicklung im Bereich Photovoltaik eingesetzten Mittel bei rund 30 Millionen Franken pro Jahr, was im internationalen Vergleich gut ist.

Für umsetzungsnahe Forschungsaktivitäten besteht eine gute und sehr enge Zusammenarbeit zwischen akademischen Institutionen und der im Photovoltaikbereich tätigen Industrieunternehmen. Dies gilt speziell für Projekte, wo die Industrie ihre Bedürfnisse an die Forschungspartner direkt einbringt und für welche gute Fördermöglichkeiten bestehen.

Im Bereich mittel- und langfristiger technologischer Fragestellungen sowie im Bereich der Qualitätssicherung haben einzelne Forschungszentren im Bereich der Eidgenössischen Technischen Hochschulen und an Fachhochschulen teilweise Schwierigkeiten, die Mittel für den Kompetenzerhalt und -ausbau sicherzustellen. Dies trifft ebenfalls für einzelne (Start-up-)Firmen zu, bei deren Forschungsvorhaben jeweils nur die beteiligten Hochschulpartner von der öffentlichen Hand unterstützt werden können.

In ihrer Gesamtheit ist die Photovoltaikindustrie in der Schweiz trotz starker Veränderungen während der letzten Jahre und des Verschwindens einiger Unternehmen gut aufgestellt ist. Die Akteure verteilen sich relativ breit über die gesamte Wertschöpfungskette. In den letzten Jahren konnte eine Vielzahl von Innovationen beobachtet werden, speziell im Bereich der industriellen Umsetzung neuer hoch effizienter Solarzellentechnologien, sowie bei der Entwicklung neuer Photovoltaikprodukte zur Gebäudeintegration. Diese allgemein positive Entwicklung geht auf eine gute Fördersituation der öffentlichen Hand zurück. Ein wesentlicher Teil der Schweizer Photovoltaikindustrie ist exportorientiert, so dass die künftige Entwicklung auch stark von globalen Marktentwicklungen abhängt.

# 1 Globale Entwicklungen im Bereich Photovoltaik

## 1.1 Bedeutung der Photovoltaik in der künftigen Energieversorgung

Weltweit wird die Photovoltaik zunehmend als «Mainstream»-Technologie für die Strom- und Energieversorgung wahrgenommen. Insgesamt werden die erneuerbaren Energien – Windenergie, Photovoltaik und konzentrierende Solarenergie, Geothermie, Biomasse usw. – sich im Stromsektor bis zum Jahr 2020 zur am stärksten wachsenden Energieressource entwickeln [1].

Zusammen mit der Windenergie (39 %) und der Wasserkraft (21 %) wird die Photovoltaik (35 %) einen zentralen Beitrag zu den in den kommenden Jahren weltweit neu installierten erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten (rund 700 GW<sup>1</sup>) leisten. Die von der internationalen Energieagentur IEA 2014 veröffentlichte Roadmap zur Photovoltaik geht langfristig von einem Photovoltaikanteil an der globalen Gesamtstromerzeugung von bis zu 16 % aus. Eine frühere Prognose von 10 % aus dem Jahr 2010 wurde auf Grund des beobachteten Zubaus angepasst [2].

Dass diese Entwicklung im Gange ist, lässt sich an der starken Zunahme des Anteils an erneuerbarer Stromproduktion weltweit ablesen. So nahm der Anteil an erneuerbarer Stromproduktion im Jahr 2013 um 22 % zu, was einer Steigerung von 5 % gegenüber dem Vorjahr 2012 entsprach [1].

Ein weiteres Zeichen sind die in den Jahren 2012 bis 2015 global getätigten Investitionen in erneuerbare Strompro-

duktion<sup>2</sup>, welche in diesem Zeitraum um mehr als einen Faktor zwei höher lagen im Vergleich zu den Investitionen in fossile Kraftwerke (Kohle und Gas) (Abb. 2.1) [3].

## 1.2 Globale Marktentwicklung

Im Jahr 2014 lag die weltweit kumulierte installierte Photovoltaikleistung bei 178 GW. Damit betrug der Anteil von aus Photovoltaikanlagen produziertem Strom erstmals mehr als ein Prozent der Gesamtproduktion [4]. Im Jahr 2015 hat sich die installierte Leistung weiter erhöht auf 227 GW Ende 2015 [5, 6], rund ein Viertel (plus 50 GW) mehr gegenüber 2014 (Abb. 1.2). An erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten insgesamt wurden 2015 weltweit 148 GW installiert [7].

Die Photovoltaik trägt damit aktuell zu 1,3 % an der gesamten Stromproduktion bei. In Europa liegt dieser Anteil bei rund 4 %, in drei europäischen Ländern bereits bei über 7 %. Die fünf Länder mit der grössten installierten Leistung sind China (43,5 GW), Deutschland (39,7 GW), Japan (34,4 GW), die USA (25,6 GW) und Italien (18,9 GW). Pro Einwohner liegen Deutschland (491 W/Kopf), Italien (308 W/Kopf) und Belgien (287 W/Kopf) an der Spitze.

Der europäische Beitrag an der gesamthaft installierten Photovoltaikkapazität liegt heute bei rund 100 GW (42 %). Andere Weltregionen wie China holen jedoch stark auf: Anteil Asien: 42 %, Amerika: 13 %. Bis 2020 sollen allein in

1 Die 700 GW an erneuerbaren Erzeugungskapazitäten werden etwa zwei Drittel der insgesamt neu installierten Leistung ausmachen.  
2 Hier sind mit den «Erneuerbaren» gemeint: «neue Erneuerbare» (Photovoltaik, Windenergie, Geothermie, Biomasse usw.) zusammen mit der Grosswasserkraft.

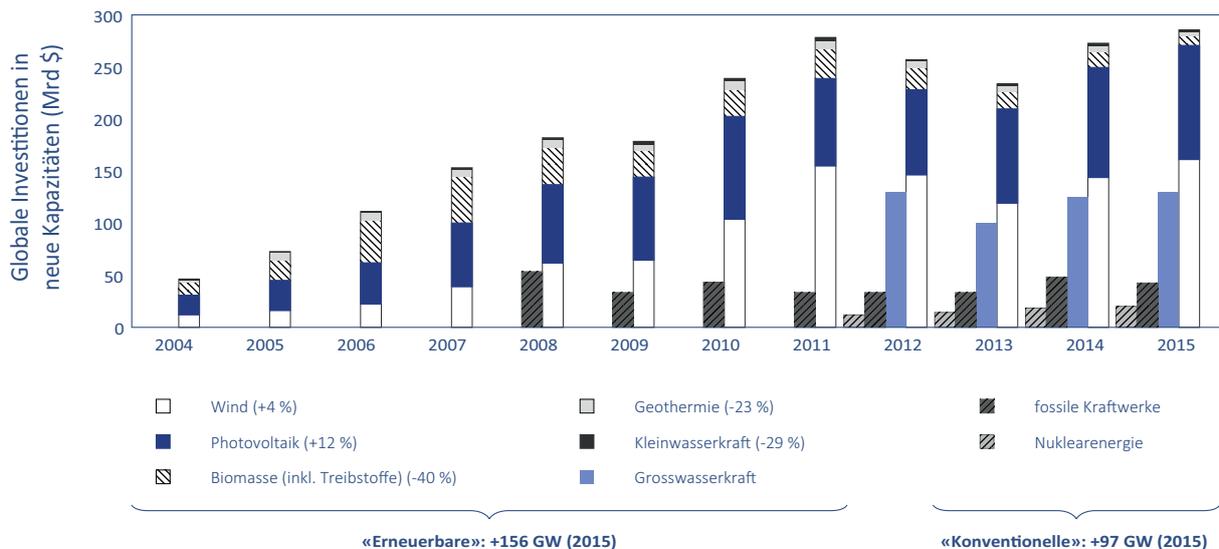
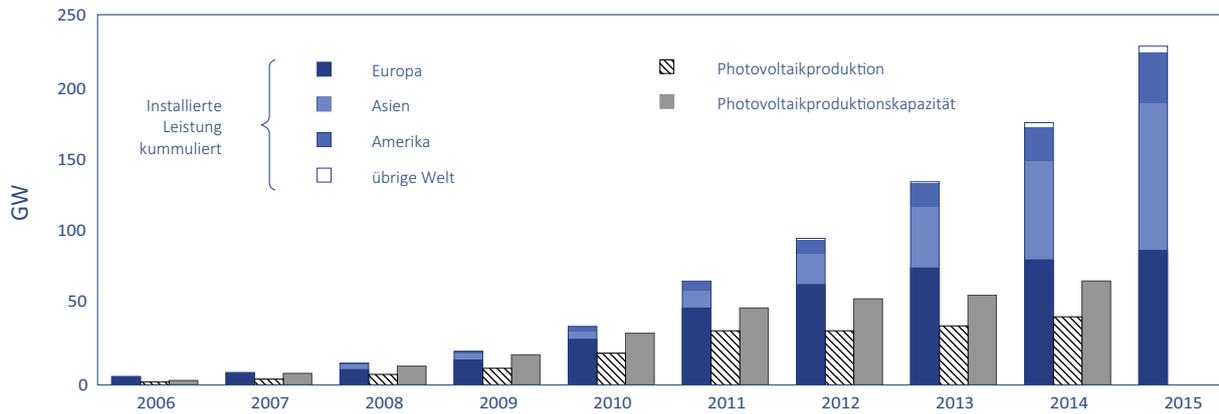


Abbildung 1.1 Globale Investitionen in Stromerzeugungskapazitäten. Seit 2012 werden jährlich mehr als doppelt so hohe Investitionen in erneuerbare als in fossile Stromerzeugungskapazitäten investiert. Die Prozentzahlen geben die Veränderungen in 2015 gegenüber 2014 an. Im Jahr 2015 wurden total 156 GW an erneuerbaren Stromerzeugung (davon 22 GW Grosswasserkraft) und 97 GW an fossiler Stromproduktion (42 GW Kohle, 40 GW Gas, 15 GW Nuklear) installiert (Datenquelle: [3]).



**Abbildung 1.2** Weltweit installierte Photovoltaikkapazität (kumuliert), Produktion von Photovoltaikmodulen und bestehende Produktionskapazität. Vor einigen Jahren war der Markt durch Europa dominiert, heute verteilt sich dies auf verschiedene Weltregionen.

China mehr als 150 GW an Photovoltaikleistung am Netz sein. Rückblickend betrachtet haben insbesondere europäische Länder (Deutschland, Spanien, Italien usw.) durch starke Fördermassnahmen diese Entwicklung – massiver Ausbau verbunden mit einer starken Kostenreduktion – ausgelöst.

Der im Jahr 2015 erfolgte rekordhohe Zubau neuer Photovoltaikanlagen ist auf ein speziell hohes Wachstum in Asien (China und Japan: 15,2 bzw. 11,0 GW) und den USA (7,3 GW) zurückzuführen. In Europa war der jährliche Zubau an neuer Photovoltaik seit 2011 (22 GW) rückläufig<sup>3</sup> und ist erstmals 2015 mit zusätzlichen 8,1 GW gegenüber dem Vorjahr (7 GW) wieder leicht angestiegen. Im Jahr 2015 lagen die grössten europäischen Märkte im Vereinigten Königreich (3,5 GW), Deutschland (1,5 GW) und Frankreich (0,9 GW).

3 Der in den letzten Jahren rückläufige jährliche Zubau an Photovoltaik in Europa ist auf eine starke Anpassung der Fördermassnahmen in verschiedenen europäischen Ländern sowie auf eine verlangsamtete Kostenreduktion zurückzuführen. Letzteres wird von vielen Akteuren in Europa auf die von der Europäischen Kommission seit einigen Jahren eingeführten Mindestimportpreise für chinesische Photovoltaikprodukte zurückgeführt, welche die Photovoltaik in Europa künstlich verteuern und der Photovoltaikindustrie in Europa (Installateure, Planer, Photovoltaikzuliefererindustrie) schaden würden. Von dieser Seite wird vehement deren Abschaffung gefordert.  
 4 Der Einspeisetarif für Photovoltaikstrom aus grösseren Anlagen in Deutschland lag Anfang 2015 bei 8,7 Eurocents/kWh, im Vergleich zu 6 bis 8,9 Eurocents/kWh für Strom aus Onshore-Windanlagen und zu den Produktionskosten von 7 bis 11 Eurocents/kWh von neuen Gas- und Kohlekraftwerken [10].

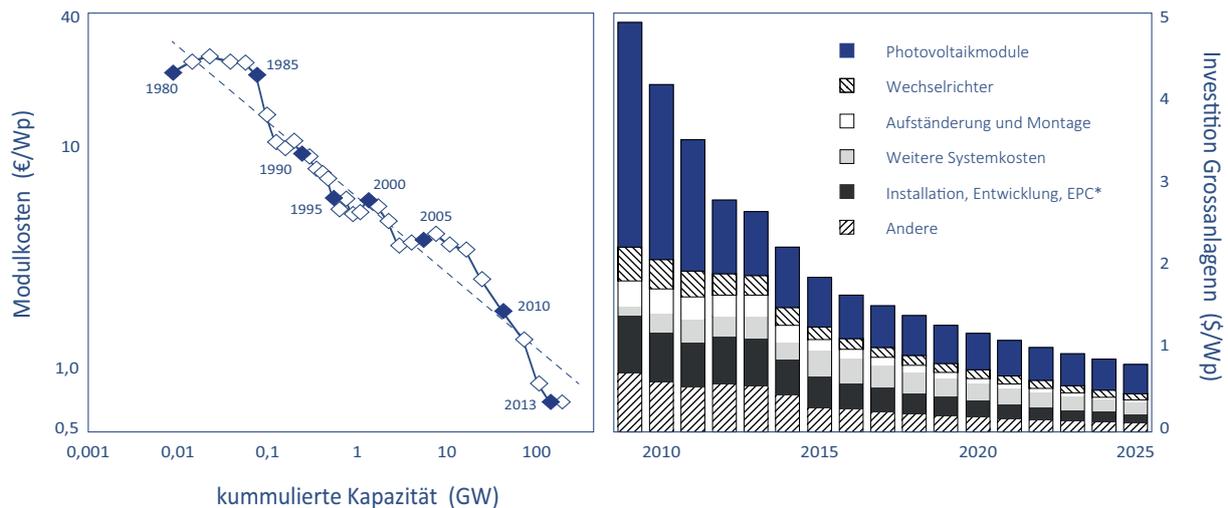
### 1.3 Reduktion der Gesteungskosten von Photovoltaikstrom

Die Kostenreduktion in der Photovoltaik erfolgte in den letzten Jahren mit einer erstaunlichen Geschwindigkeit, welche in dieser Form von kaum einem Experten vorausgesehen wurde (Abb. 2.3). In der zweiten Hälfte 2015 lagen die global gemittelten Gesteungskosten für Photovoltaik bei CHF 0.122 pro kWh im Vergleich zu CHF 0.143 pro kWh in der zweiten Hälfte 2014 [8]. Aktuell sinken die Kosten in der Modulproduktion unvermindert schnell [9]: Seit Anfang 2015 konnten alle weltweit führenden Hersteller die Produktionskosten um 8 % bis 13 % reduzieren.

Über die letzten 35 Jahre wurde mit jeder Verdoppelung der Kapazität eine Preisreduktion von rund 20 % beobachtet (Abb. 1.3)<sup>4</sup>. Wichtige Faktoren waren und sind hier Ska-

**Tabelle 1.1** Weltweit grösste Solarzellen- und Modulhersteller nach Absatz im Jahr 2015 in GW (Quelle: <http://de.statista.com>). Die 10 grössten Hersteller machen mehr als zwei Drittel des gesamten Marktvolumens aus. Mit «Land» ist der Firmensitz gemeint.

	Firma	Land	GW	Marktanteil
1	Trina Solar	China	5,7	11,5 %
2	Canadian Solar	Canada	4,7	9,4 %
3	Jinko Solar	China	4,5	9,0 %
4	JA Solar	China	3,9	7,9 %
5	Hanwha Q Cells	Südkorea	3,3	6,6 %
6	First Solar	USA	2,8	5,6 %
7	ReneSola	China	2,7	5,4 %
8	Yingli Solar	China	2,4	4,8 %
9	Suntech (Shunfeng)	China	2,3	4,6 %
10	Risen Energy	China	1,2	2,5 %
1–10	Total		33,6	67,2 %
	Restliche		16,4	32,8 %



**Abbildung 1.3** Links: Entwicklung der Photovoltaikmodulkosten in den vergangenen 30 Jahren (Datenquelle: Strategies Unlimited, Navigant Consulting, EUPD-research). Rechts: Weltweit gemittelte Photovoltaikinvestitionskosten für grosse Anlagen («utility scale»). Der Anteil der Modulkosten ist in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Ein Potenzial für Kosteneinsparungen liegt insbesondere bei den Planungs-, Beschaffungs-, Anmelde- und Bewilligungskosten («soft cost»), wobei regional grosse Unterschiede bestehen (\*EPC = Engineering, Procurement, and Construction = Planung, Beschaffung, Vergabe, Konstruktion) (Datenquelle: [7]).

leneffekte (Industrialisierung), eine technologische Weiterentwicklung wie beispielsweise eine starke Verringerung des Materialeinsatzes<sup>5</sup>, sowie auch grosse marktbedingte Überkapazitäten. Der Anteil der Modul- im Vergleich zu den Systemkosten (Wechselrichter, Montage, Planung usw.) hat in den letzten Jahren stark abgenommen und macht heute selbst bei einer typischen Dachanlage weniger als 50 % aus.

Für grössere Anlagen – oftmals betrieben von Energieversorgungsunternehmen – sind in den kommenden Jahren verbreitet Gestehungskosten von CHF 100 pro MWh und weniger möglich. Die Internationale Organisation für erneuerbare Energien (IRENA) geht in einem aktuellen Bericht zu Photovoltaik und Wind davon aus, dass sich die Gestehungskosten für grosse Photovoltaikanlagen im Zeitraum 2015 bis 2025 um 59 % senken und in einem Bereich von CHF 30 bis 120 pro MWh liegen werden [7].

Unter Berücksichtigung der bereits erfolgten und des noch vorhandenen Potenzials für eine weitere Kostenreduktion – bei gleichzeitiger technologischer Weiterentwicklung – ist die Photovoltaik damit auf dem Weg, in den nächsten Jahren die Position als kostengünstigste erneuerbare Stromerzeugungsart weiter zu stärken. In einigen Teilen der Welt ist dies bereits heute der Fall.<sup>6</sup>

In Bezug auf die Förderung von Photovoltaikanlagen zeigen verschiedene Publikationen auf, dass Subventionen und Vergütungen mittel- und langfristig nicht notwendig sind [1]. Vielmehr hängt die künftige Entwicklung von stabilen regulatorischen Rahmenbedingungen und geeig-

neten Finanzierungs- und (neuen) Geschäftsmodellen ab, kombiniert mit einem entsprechenden Marktdesign. Hinzu kommt eine kontinuierliche fortschreitende technische Weiterentwicklung [2].

## 1.4 Industrieentwicklung

Nach einer Boomerperiode um das Jahr 2011 setzte in der Photovoltaikbranche eine starke Konsolidierungsphase ein, insbesondere in Europa und Nordamerika, verzögert auch in Asien. Während die Gesamtleistung an neuinstallierten Photovoltaikanlagen in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2012 jeweils mehr als 7 GW betrug, lag der Zubau 2015 unter 1,5 GW. Die in Deutschland politisch angestrebten Ausbauziele werden damit zur Zeit nicht erreicht.

Diese Konsolidierungsphase wurde ausgelöst durch hohe Überkapazitäten in der Produktion und einem damit einhergehenden Preiszerfall, verbunden mit teilweise drastischen Anpassungen in der Förderung und in den Rahmenbedingungen. Viele Unternehmen weltweit und speziell in Europa haben diesen Wandel nicht überlebt.<sup>7</sup> So ist allein in Deutschland die Anzahl Arbeitsplätze in der Photovoltaikbranche von 128 000 im Jahr 2011 auf unter 50 000 zurückgegangen. Verschiedene Analysten betrachten diese Phase in Europa als noch nicht vollständig abgeschlossen.

<sup>5</sup> Als Beispiel: der Materialverbrauch für Silizium-Solarzellen konnte in den letzten zehn Jahren um einen Faktor 2,7 verringert werden, dies auf Grund höherer Effizienz und dem Einsatz dünnerer Wafer [8].

<sup>6</sup> In verschiedenen Ländern wurden grosse Anlagen im Rahmen von Ausschreibungsverfahren mit Abnahmeverträgen realisiert (power purchase agreement) mit vertraglich geregelten Gestehungskosten von weniger als \$ 60/MWh. (Z. B. \$ 58/MWh für eine 200 MW-Anlage in den Vereinigten Arabischen Emiraten) [3].

<sup>7</sup> Speziell in der Schweiz betraf dies (1) 2014: TEL Solar (amorphe Dünnschichtsiliziumzellen), welche 2012 die Prozessanlagentechnologie von Oerlikon Solar übernommen hatte; (2) 2014: Sputnik Engineering (Solarwechselrichter); (3) 2012: Flexcell (flexible amorphe Dünnschichtsiliziumzellen); (4) 2012: PRAMAC: Modulhersteller mit amorpher Dünnschichttechnologie von Oerlikon Solar.

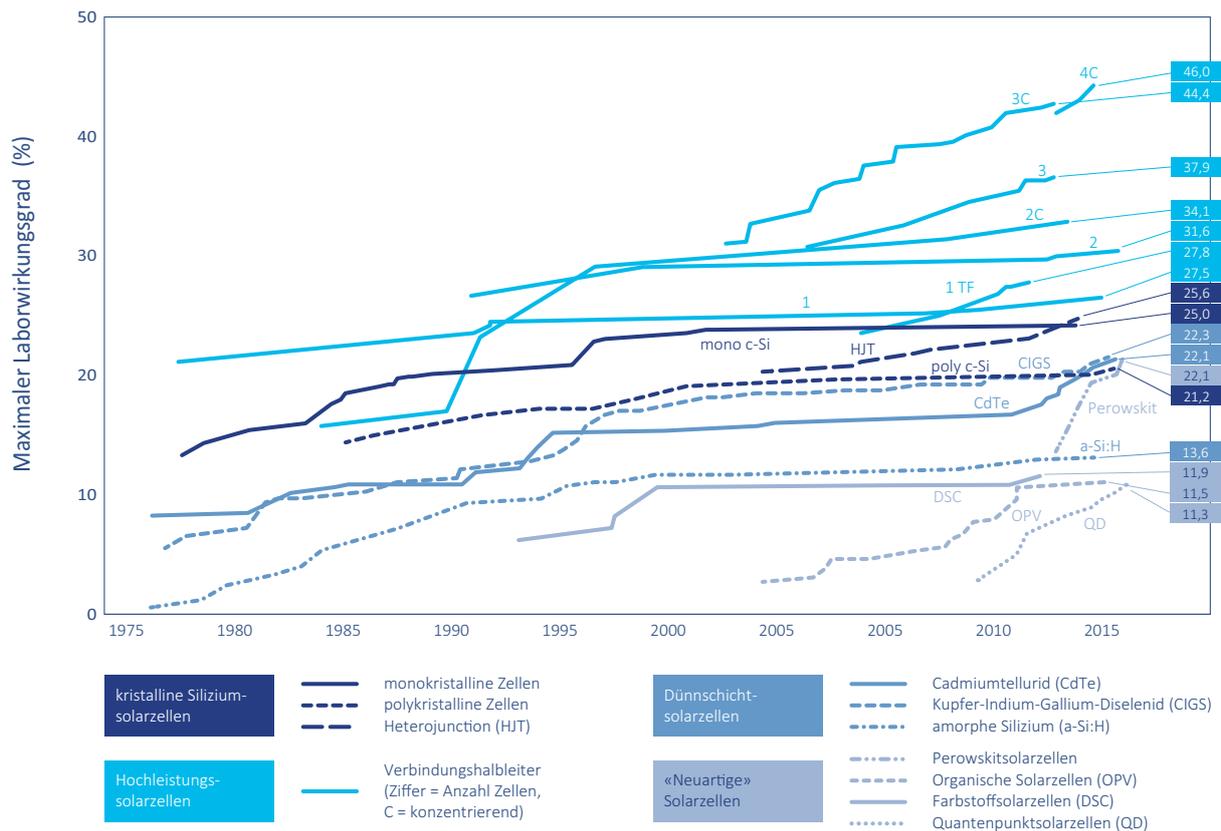


Abbildung 1.4 Entwicklung der Laborwirkungsgrade verschiedener Solarzellentechnologien nach [11], Stand Juni 2016.

In den vergangenen Jahren hat eine starke Verlagerung der Produktion von Photovoltaikkomponenten nach China stattgefunden (Tab. 1.1), dies bedingt durch tiefere Produktionskosten<sup>8</sup>, einen enormen Kostendruck auf Grund bestehender Überkapazitäten (siehe Abb. 1.2), sowie beeinflusst durch staatliche Anreize in Fernost. Der Anteil chinesischer Hersteller an der weltweiten Photovoltaikmodulproduktion liegt bei 71 % (2015), gefolgt vom restlichen asiatischen/pazifischen Raum mit 14 %. In Europa werden heute nur noch rund 5 % aller Photovoltaikmodule hergestellt [8].

Im Vergleich der verschiedenen Modultechnologien liegt der Anteil von auf Silizium (Si) basierenden Zellen bei über 90 % – rund 69 % multikristalline Si-Module mit einem Wirkungsgrad von bis zu 16 %, und 24 % monokristalline Si-Module mit einem typischen Wirkungsgrad um die 19 %. Der Anteil an Dünnschichttechnologien beträgt etwa 7 % der Gesamtmodulproduktion [6].

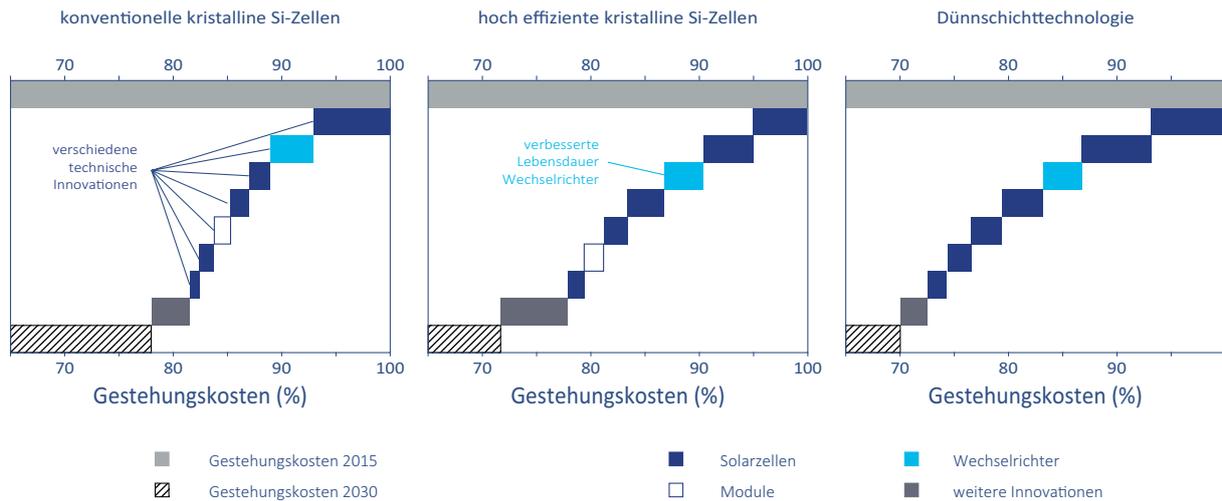
Ein bedeutender Teil der weltweit eingesetzten Photovoltaiktechnologie ist in Europa erforscht und entwickelt worden, neben grossen und wichtigen Forschungsbeiträgen und technologischen Entwicklungen aus Japan, Australien und den USA.

Für die Photovoltaikindustrie in Europa bieten sich durch technologische Innovationen Aussichten, Marktanteile zurückzugewinnen. Dies trifft insbesondere für Photovoltaikmaschinenbauer mit neuen Prozesstechnologien für die Produktion von hoch effizienten und potenziell kostengünstigen Solarzellen zu.<sup>9</sup> Verschiedene Studien zeigen auf, dass durch einen hohen Automatisierungsgrad im Fertigungsprozess sowie eine Konzentration auf Hocheffizienzmodule und Spezialanwendungen (Gebäudeintegration) die Produktionskosten in Europa global wettbewerbsfähig sein könnten [9, 10]. Allgemein bestehen durchaus gute Rahmenbedingungen dank exzellenten Forschungseinrichtungen und langjähriger intensiver Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung.

Auch der verbreitete Einsatz dezentraler Batteriespeicherlösungen wird als Treiber für eine weitere Entwicklung des Photovoltaikmarktes in Europa angesehen. Zulieferindustrie, Installation, Planung und Wartung sind allgemein Felder, wo sich für die europäische Branche gute Entwicklungsperspektiven bieten und ein grosser regionaler Wertschöpfungsanteil möglich ist.

<sup>8</sup> Eine im Auftrag der europäischen Vereinigung Solar Alliance for Europe (SAFE) im April 2016 publizierte Studie zeigt auf, dass Photovoltaikproduzenten in China nicht auf Grund von Subventionen günstiger produzieren, sondern reale Produktionskostenvorteile gegenüber europäischen und japanischen Unternehmen besitzen. Gemäss der Studie stellen Skaleneffekte und Standardisierung wichtige Faktoren dar und bilden einen Kostenvorteil von mehr als 10 %. Mittlere Fabrikgrössen in China liegen um einen Faktor fünf höher als die wenigen verbleibenden in Europa und Japan [9].

<sup>9</sup> Als potenziell wettbewerbsfähig für eine europäische Produktion werden hier insbesondere die Advanced PERC-(Passivated Emitter and Rear Cell) und die Heterojunction-Zelltechnologie angesehen [9].



**Abbildung 1.5** Potenzial zur Reduktion der Gestehungskosten von Photovoltaikstrom auf Grund von technischen Innovationen im Zeitraum 2015 bis 2030 für konventionelle kristalline Siliziumzellen, hoch effiziente Siliziumzellen (Heterojunctiontechnologie) und Dünnschichtsolarzellen nach einer Veröffentlichung des Innovationsunternehmens KIC InnoEnergy [13]. Die Darstellung hier dient der Illustration; einzelne technische Innovationspotenziale für verschiedene Zelltechnologien werden in dieser Publikation detailliert aufgeführt.

## 1.5 Technologieentwicklung

Die Photovoltaikforschung befasst sich zum einen mit der Weiterentwicklung bestehender und bereits im Markt befindlicher Technologien. Zum anderen werden neue Zellkonzepte und Materialien erforscht und zur Anwendungsreife gebracht. Neben der eigentlichen Forschung an Zellen und Modulen stellen die Verbesserung von Fertigungsanlagen oder die Bereitstellung von Materialien inklusive Wiederverwertung bedeutende Themenfelder dar.

Neben dem Kerngebiet der verschiedenen Solarzellen- und Modultechnologien beinhaltet die Photovoltaikforschung auch weitergehende Themen, welche sich mit der Einbettung der Photovoltaik in Gesamtsysteme beschäftigen. Beispiele hierfür sind die Entwicklung von Technologien zur verbesserten Integration von Photovoltaik in Gebäude (Gebäudeintegration), die Weiterentwicklung der Systemtechnik (Wechselrichter) oder Untersuchungen zu Umweltindikatoren (Lebenszyklusanalysen) sowie zur Wiederverwertung von Materialien (Recycling). Mit der derzeit anhaltenden Kostenreduktion gewinnen systemübergreifende Aspekte wie die Netzintegration, energetische Konzepte im Gebäude und speziell das Thema Speicherung immer stärker an Bedeutung.

Einen Eindruck für die fortlaufende Entwicklung im Bereich der Solarzellen vermittelt der Verlauf der in Forschungslabors über die letzten 40 Jahre erzielten Wirkungsgrade<sup>10</sup>. Diese sind für verschiedene Zelltechnologien in Abb. 2.4 wiedergegeben (Juni 2016) [11]. Es ist hier eine stetige Weiterentwicklung festzustellen, wobei einige neuere Technologien bemerkenswerte Wirkungsgradverbesserungen auf relativ kurzer Zeitskala aufzeigen.

Für kristalline Siliziumsolarzellen liegen die höchsten im Labor gemessenen Wirkungsgrade bei 25,6 % für monokristalline und bei 20,8 % für polykristalline Zellen<sup>11</sup>. Der Wirkungsgrad kommerzieller Siliziummodule hat sich in rund zehn Jahren im Durchschnitt von 12 auf 17 % erhöht<sup>12</sup>.

Im Bereich der Dünnschichtsolarzellen betragen die im Labor erzielten maximalen Wirkungsgrade 22,1 % (First Solar 2016) für die CdTe (Cadmiumtellurid)- und 22,8 % (Solar Frontier 2016) für die CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-(Di-)Selenid)-Technologie. Kommerziell erhältliche Dünnschichtmodule haben Wirkungsgrade von bis zu 16 % (CdTe).

Auch bei der Photovoltaik als Gesamtsystem (Module, Wechselrichter usw.) wurden in den letzten Jahrzehnten massive Fortschritte erzielt. Als Mass hierfür kann die Entwicklung des sogenannten «Performance Ratio» (Qualitätsfaktor) von Photovoltaikanlagen herangezogen werden. Dieser Wert vergleicht den tatsächlichen Nutzertrag einer Photovoltaikanlage mit dem auf Basis der eingestrahlten Energie auf die Modulfläche zu erwartenden Sollertrag und berücksichtigt damit Einflüsse wie Umwandlungsverluste (Wechselrichter), Ausfälle oder Verschmutzung. Während dieser Wert vor 10 bis 15 Jahren durchschnittlich noch bei 70 % lag, ist er heute auf 80 bis 90 % angestiegen, gleichbedeutend mit einer deutlichen Verbesserung der Photovoltaik als Gesamtsystem [12].

Verschiedene Studien und Publikationen geben eine detaillierte und aktuelle Übersicht zu künftig möglichen technischen Innovationen im Bereich Photovoltaik und den damit verknüpften Kostenreduktionspotenzialen [2, 13, 14] (Abb. 2.5).

<sup>10</sup> Der Wirkungsgrad einer Solarzelle entspricht dem Verhältnis von erzeugter elektrischer Leistung zur Leistung der einfallenden Solarstrahlung. Dieser wird unter standardisierten Testbedingungen ermittelt.

<sup>11</sup> Diese Rekordwirkungsgrade liegen nahe am theoretischen Maximum für Silizium von 29,4 %.

<sup>12</sup> Die besten mono-kristallinen Siliziummodule haben Wirkungsgrade von nahezu 23 % (Sunpower/Panasonic).

## 2 Photovoltaik in der Schweiz

### 2.1 Rolle der Photovoltaik in der Energiestrategie 2050

Wirtschaftliche und technologische Entwicklungen sowie politische Entscheide im In- und Ausland führen zu grundlegenden Veränderungen der Energiemärkte. Die vom Bundesrat entwickelte Energiestrategie 2050 soll diese neue Ausgangslage für die Schweiz vorteilhaft nutzen. Gleichzeitig trägt die Strategie dazu bei, die energiebedingte Umweltbelastung der Schweiz zu reduzieren [15, 16, 17]. Hierfür sollen vorhandene Energieeffizienzpotenziale konsequent erschlossen und die Potenziale der Wasserkraft und der neuen erneuerbaren Energien (Sonne, Wind, Geothermie, Biomasse) ausgeschöpft werden.

Der Photovoltaik kommt mit einem vorgesehenen Beitrag von mindestens 11,1 TWh/a in der Stromproduktion im Jahr 2050 (Gesamtproduktion 60 TWh) eine grosse Bedeutung zu, zusammen mit essentiellen Beiträgen aus der Geothermie (4,3 TWh/a), der Windkraft (4,3 TWh/a), aus Biogas (1,6 TWh/a) und Holzenergie (1,3 TWh/a). Die aktuelle Entwicklung des Zubaus mit einem Photovoltaikanteil in der Stromproduktion 2015 von mehr als 2 % [18] zeigt, dass dieser Anteil als realistisch betrachtet, und dass das gesetzte Ziel für den Photovoltaikanteil möglicherweise bereits vor 2050 erreicht werden könnte.

### 2.2 Marktentwicklung in der Schweiz

Ausgelöst durch die kostendeckende Einspeisevergütung, weitere Fördermechanismen und Massnahmen («Muster-Vorschriften der Kantone im Energiebereich 2014») [19] auf kantonaler Ebene, die Einführung der Eigenverbrauchsregelung [20] und Direktvermarktung, und nicht zuletzt begünstigt durch eine allgemeine Kostenreduktion von Pho-

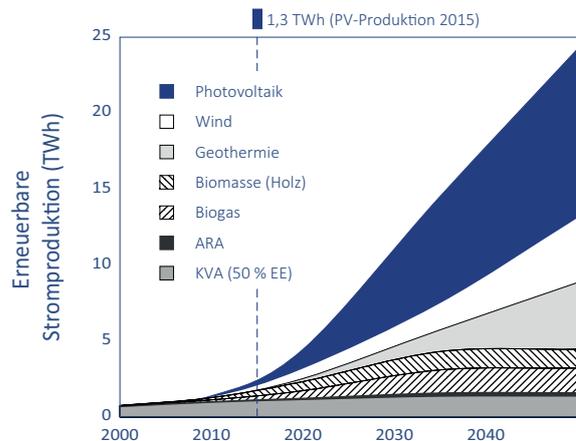


Abbildung 2.2 Erneuerbare Stromproduktion in der Schweiz mit einem nachhaltig nutzbaren Potenzial (ohne Wasserkraft) von geschätzten 24,2 TWh bis 2050.

tovoltaiksystemen hat sich in den letzten Jahren ein stabiler heimischer Photovoltaikmarkt von rund 300 MW pro Jahr entwickelt (Abb. 2.2). Bezogen auf die jährlich neu installierte Leistung liegt die Schweiz im europäischen Vergleich aktuell im vorderen Mittelfeld.

Die kumulierte installierte Leistung Ende 2015 lag bei rund 1,3 GW [18]. Pro Kopf sind das rund 160 W<sup>13</sup>. Damit konnten 2015 rund zwei Prozent des nationalen Stromverbrauchs durch heimische Stromproduktion aus Photovoltaikanlagen gedeckt werden. Insbesondere wurden in den letzten Jahren vermehrt grössere Anlagen mit bis zu 5 MW installiert. Rund 50 % aller Anlagen liegen in einer Leistungsklasse von mehr als 100 kW.

13 Im Vergleich lag die installierte Leistung pro Kopf (Juni 2015) in Deutschland bei 473 W und in Italien bei 303 W.

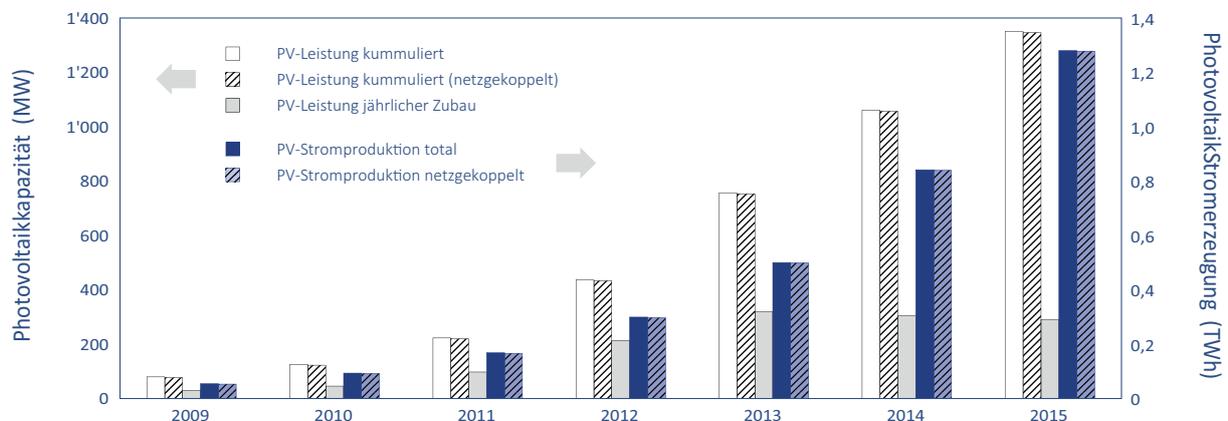


Abbildung 2.1 Kumulierte Photovoltaikleistung (MW) und jährliche Stromproduktion (GWh) aus Photovoltaikanlagen in der Schweiz. In den letzten Jahren hat sich ein stabiler Markt von rund 300 MW entwickelt. Die allermeisten Anlagen sind netzgekoppelt. Mit einer Stromproduktion von rund 1,3 TWh im Jahr 2015, was etwa 2 % des nationalen Stromverbrauchs entspricht, ist die Photovoltaik nach der Wasserkraft die zweitbedeutendste erneuerbare Stromressource der Schweiz.

### 3 Photovoltaik im Kontext «Cleantech»

Die grosse Bedeutung von «Cleantech» als Wirtschaftssegment in der ökologischen und ökonomischen Weiterentwicklung der Schweiz wurde bereits vor der Energiestrategie 2050 in mehreren Publikationen hervorgehoben [21–25]. Insbesondere stellt die Photovoltaik mit ihrer breiten Abstützung über sämtliche Stufen der Wertschöpfungskette ein wesentliches Segment der Schweizer «Cleantech»-Branche dar. Mit jährlichen Umsätzen in der Grössenordnung von bis zu einer Milliarde Franken und mehreren Tausend Arbeitsstellen erzielt die Photovoltaik einen wesentlichen volkswirtschaftlichen Nutzen.

Der Masterplan Cleantech Schweiz [21, 22] hebt die Bedeutung dieser Branche für die Schweiz aus technologischer, industrieller und volkswirtschaftlicher Sicht hervor. Im Bericht von 2010 hatte der Bundesrat die Stärken und Schwächen des Forschungs- und Industriestandorts Schweiz im Bereich «Cleantech» analysiert und zentrale Handlungsfelder und Massnahmen aufgezeigt.

In der Forschung und Entwicklung gibt es eine breite Wissensbasis. Insbesondere in der Photovoltaik sind Schweizer Forschungsinstitute in verschiedensten Bereichen weltweit führend.

Als Schwächen wurden damals hauptsächlich die starke Fragmentierung der Forschungslandschaft mit einer grossen Anzahl kleinerer Institute und Forschergruppen, die Vielzahl verschiedener Förderinstrumenten und die damals insgesamt zu geringen Fördermittel für technologieorientierte Forschung, sowie der zu passive Wissens- und Technologietransfer gesehen. Als zentrale Handlungsfelder wurden die Stärkung der Wettbewerbsposition von Schweizer «Cleantech»-Unternehmen im internationalen Umfeld, sowie die Förderung von Bildung und Weiterbildung aufgeführt.

Für die Photovoltaik bestanden und bestehen auf Grund der vielen verschiedenen Schnittstellen zur in der Schweiz stark verankerten Maschinen- und Werkzeugindustrie ausgezeichnete Ausgangsbedingungen. Die Bedeutung eines

Heimmarkts für «Cleantech»-Technologien mit der damit verbundenen Sichtbarkeit und Wahrnehmung war und ist dabei von zentraler Bedeutung für die weitere Entwicklung von Innovationen.

Gemessen am Anteil der im «Cleantech»-Bereich «Erneuerbare Energien» angemeldeten Patente nimmt die Photovoltaik zusammen mit der Solarthermie eine Spitzenposition ein: diese beiden Technologiefelder machen zusammen rund 70 % aller Patentanmeldungen aus [26]. Im Export erneuerbarer Energietechnologien ist der Anteil der Photovoltaik relativ zur Gesamtheit, welche durch Wasserkraftanlagen dominiert wird, seit Jahren angestiegen.

Eine 2015 vom Europäischen Patentamt (EPO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) veröffentlichte Studie zu Innovationen im Bereich der Klimaschutztechnologien zeigt auf, dass weltweit in diesem Bereich zwischen 1995 und 2011 eine fünffache Zunahme an Patentanmeldungen zu beobachten war [27]. Europa gehört hinsichtlich der Erfindung neuer Technologien für den Klimaschutz zu den weltweit führenden Regionen mit einem Fünftel aller Patentanmeldungen. Bei der Photovoltaik stellt Japan die Weltregion mit den meisten Patentanmeldungen dar (Abb. 3.1).

Speziell in der Schweiz wird die Integration der Photovoltaik in den Gebäudepark und das Stromnetz, sowie das Zusammenspiel mit Energiespeicherung oder Elektromobilität zusätzlich Synergien mit anderen Wirtschaftszweigen erlauben. Die Photovoltaik kann dabei als Katalysator für andere neue Energietechnologien und -systeme und die damit verbundene Wertschöpfung wirken. Solarstrom muss optimal ins zukünftige Elektrizitätsnetz integriert werden, was in Kombination mit einer intelligenten Steuerung der Verbraucher zur Netzstabilisierung beiträgt («Smart grids»). Insgesamt ergeben sich bei Umsetzung von «Cleantech»-Anwendungen im Energiebereich «Win-Win»-Situationen für einzelne Technologien, deren Stärke in der Kombination weit über die Möglichkeiten der einzelnen Technologien hinausgeht.

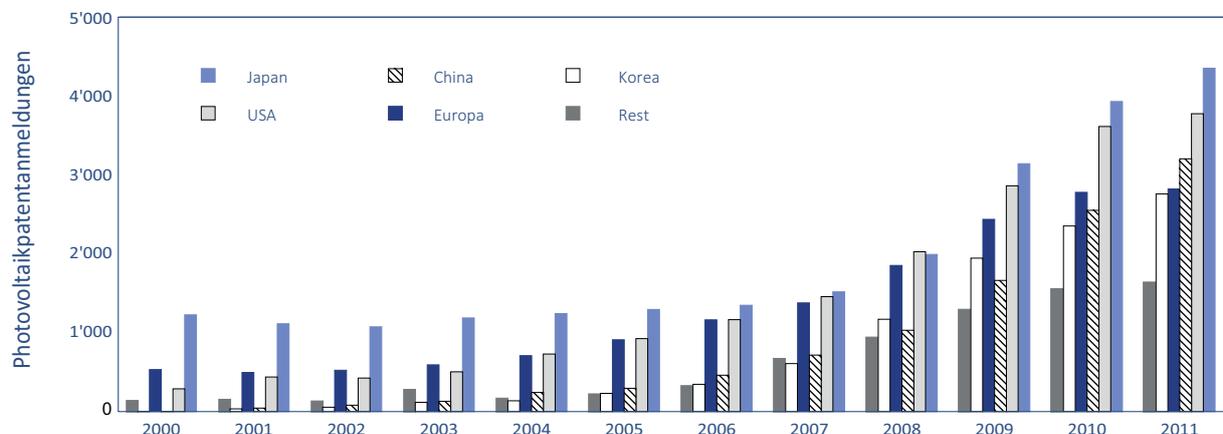
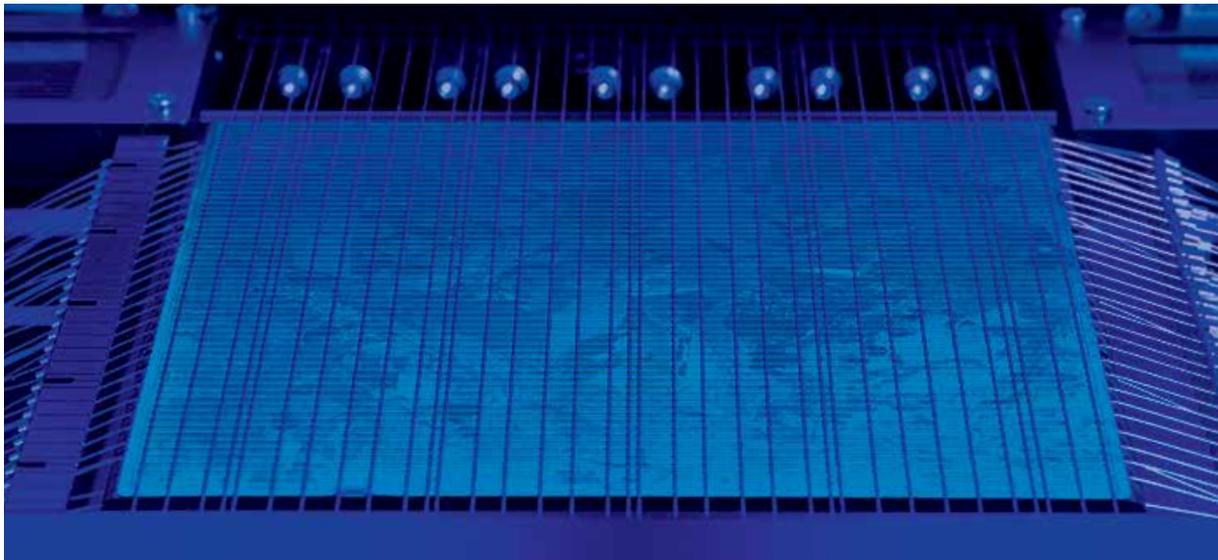


Abbildung 3.1 Patentanmeldungen im Bereich Photovoltaik von 1995 bis 2011 nach Regionen (nach [27]).

Im Verbund mit der Photovoltaik entwickelt sich insgesamt eine Industrie, die in der Schweiz eine tragende Rolle übernehmen und exportfähige Produkte und Dienstleistungen entwickeln kann. Beispiele dazu finden sich insbesondere im Bereich des Maschinenbaus und der Elektronik, weiter auch im Bereich der elektrischen Netze mit neuen Netzleit- und Energieverteilungssystemen («Smart grids»), im Bereich der (Solar-)Architektur und energieeffizienter oder energieerzeugender Gebäudeelemente (integrierte Photovoltaik), in der Kombination von Photovoltaik mit anderen Energietechnologien wie Wärmepumpen, Brennstoffzellen und Elektrolysesystemen («Power-to-Gas»), bei der Gesamtsteuerung von Gebäuden und Quartieren («Smart

cities»), sowie im Zusammenspiel von Photovoltaik mit Energiespeichersystemen und Regeldienstleistungen.

Parallel zum Masterplan «Cleantech» des Bundes hatte vor einiger Zeit der Wirtschaftsverband «swisscleantech» der Schweizer «Cleantech»-Unternehmen in einer Publikation seine Ideen vorgestellt, wie sich die Schweiz künftig noch stärker als Land mit starker Industrieentwicklung im Bereich nachhaltiger Energieversorgung positionieren und von den global stark wachsenden Märkten in diesem Bereich profitieren kann [23]. Dabei decken sich die dort genannten Ziele im Wesentlichen mit denjenigen aus dem «Masterplan Cleantech» des Bundes.



**Abbildung 3.2** Schweizer Photovoltaikinnovation: Oben: An einer Fassade am CSEM in Neuchâtel mit in der Schweiz entwickelten hochleistungsfähigen bifazialen Solarmodulen der Firma Meyer Burger. Diese basieren auf der innovativen Heterojunctiontechnologie (HJT), erforscht und entwickelt am Photovoltaiklabor des IMT Neuchâtel und am PV-Center des CSEM (Bildquelle: CSEM). Unten: Im Bereich des Kontaktierens kristalliner Siliziumsolarzellen. Das Kontaktsystem ist speziell ausgelegt zur Charakterisierung (Strom-Spannungskennlinien und Elektrolumineszenzmessungen) sogenannter «Busbar»-freier Solarzellen. Unter «Busbars» versteht man die auf konventionellen Photovoltaikzellen gut sichtbaren Kontaktierungen in Form von Silberstreifen, meistens zwei oder drei. Eine innovative Technologie von Meyer Burger ersetzt diese durch ein feinmaschiges Netz, welches ein einheitlicheres Erscheinungsbild ergibt, und womit Materialkosten eingespart werden können. So kontaktierte Zellen sind weniger anfällig auf Beschädigungen (Risse) (Quelle: Pasan SA/Meyer Burger).

## 4 Schweizer Technologieentwicklung und Forschung im Bereich Photovoltaik

Die Schweiz zeigt im Verhältnis zur Grösse des Landes eine hohe Vielfalt an verschiedenen Akteuren im Bereich Photovoltaikforschung und -technologieentwicklung (Abb. 4.1). Basis hierfür bilden jahrzehntelange und qualitativ hochstehende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, sowohl an Hochschulen als auch in einzelnen Unternehmungen. Frühe Erfahrungen mit der Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen haben ebenfalls dazu beigetragen, Wissen und Entwicklungen in industrielle Produkte umzusetzen.

Eine allgemein gut aufgestellte Schweizer Forschung und Technologieentwicklung im Bereich Photovoltaik geht bedingt auf eine strategische Förderausrichtung zurück, ist aber teilweise auf glückliche Umstände zurückzuführen. Das Forschungsprogramm des Bundesamts für Energie ([www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch), [www.photovoltaiik.ch](http://www.photovoltaiik.ch)) hat hier versucht, über 30 Jahre hinweg kontinuierlich Kompetenzen und Schwerpunkte aufzubauen, welche bis heute positive Wirkungen erzielen.

Die Photovoltaikforschungslandschaft an Schweizer Hochschulen ist relativ stark fragmentiert (Abb. 5.1) (siehe auch [21, 22]). Für verschiedene Institute und Labors ist es nicht einfach, eine kritische Masse und eine kontinuierliche Finanzierung sicherzustellen. Dies trifft insbesondere für die Fachhochschulen zu, wo ein grosser Teil der Aktivitäten über Drittmittel finanziert werden muss.

Ein Teil der Forschungsaktivitäten sind nicht an spezifisch auf die Photovoltaik ausgerichtete Institute oder an entsprechende Programmbudgets gebunden, sondern allgemeiner mit Professoren- oder Gruppenleiterstellen im Bereich Technik und Energie verbunden. Ausnahmen bilden hier Einrichtungen wie das Photovoltaikzentrum des CSEM (PV-center) in Neuchâtel. So stammen die für die Forschung eingesetzten Mittel vielfach nicht aus spezifischen Budgets für die Photovoltaik, sondern stehen in Konkurrenz zu anderen Technologiebereichen mit projektspezifischen Entscheiden.

### 4.1 Akteure in der Industrie

Trotz des internationalen Wettbewerbs und der weltweit schwierigen Phase für die Photovoltaikindustrie (siehe auch Abschnitt 1.4 «Industrieentwicklung») sind Schweizer Unternehmen entlang der Photovoltaikwertschöpfungskette heute generell gut aufgestellt (Abb. 4.2). Sie stellen

Werkstoffe und Komponenten bereit, bauen Wechselrichter, liefern Installationssysteme, Produktionsanlagen und branchenspezifische Softwaretools. Ein wichtiger Erfolgsfaktor bildet – wie erwähnt – die enge Vernetzung zwischen Industrie und Forschungsinstitutionen an Hoch- und Fachhochschulen.

Abbildung 4.1 stellt Akteure der Schweizer Photovoltaikindustrie auf der Schweizerkarte dar, klassifiziert nach Hauptaktivitäten im Bereich «Solarzellen» (■), im Bereich «Module und Gebäudeintegration» (■), sowie im Bereich «Systemtechnologie und Montage» (■).

Bei der Solarzellen- und Modulentwicklung hat sich die Schweizer Industrie bereits früh eine weltweit führende Position im Bereich des Sägens von Siliziumwafern erarbeitet. Durch ein stetiges Wachstum und die Übernahme von wichtigen Marktakteuren avancierte die Meyer Burger Gruppe im kristallinen Bereich heute zu einem der weltweiten Marktführer im Bereich Produktionsanlagen zur Herstellung von kristallinen Siliziummodulen und bietet Prozessanlagen über einen grossen Teil der Wertschöpfungskette an. Durch eine Kombination verschiedener innovativer Ansätze – (1) der Reduktion des Materialeinsatzes durch das dünnere Sägen von Siliziumwafern, (2) die Entwicklung neuartiger Hocheffizienzmodulen (Heterojunctionstechnologie<sup>14</sup>) sowie (3) eine verbesserte Zellverbindungstechnologie<sup>15</sup> («SmartWire»-Technologie) – wurde hier in den letzten Jahren eine zukunftsorientierten hocheffiziente Solarzellentechnologie entwickelt, welche das Potenzial besitzt, die Kosten von Solarstrom weiter zu senken. Von starker Bedeutung war und ist hier die enge Zusammenarbeit mit dem Photovoltaiklabor am IMT der EPFL in Neuchâtel und dem PV-Center am CSEM, wo ein grosser Teil dieser Technologie entwickelt wurde und wird, verbunden mit einem erfolgreichen Wissens- und Technologietransfer zum Umsetzungspartner Meyer Burger.<sup>16</sup>

Weitere Firmen haben sich industriell im Bereich der Bearbeitung von Silizium als Ressourcenmaterial (Recycling) und in der Abscheidetechnik von dünnen Filmen für kristalline Solarzellen positioniert.

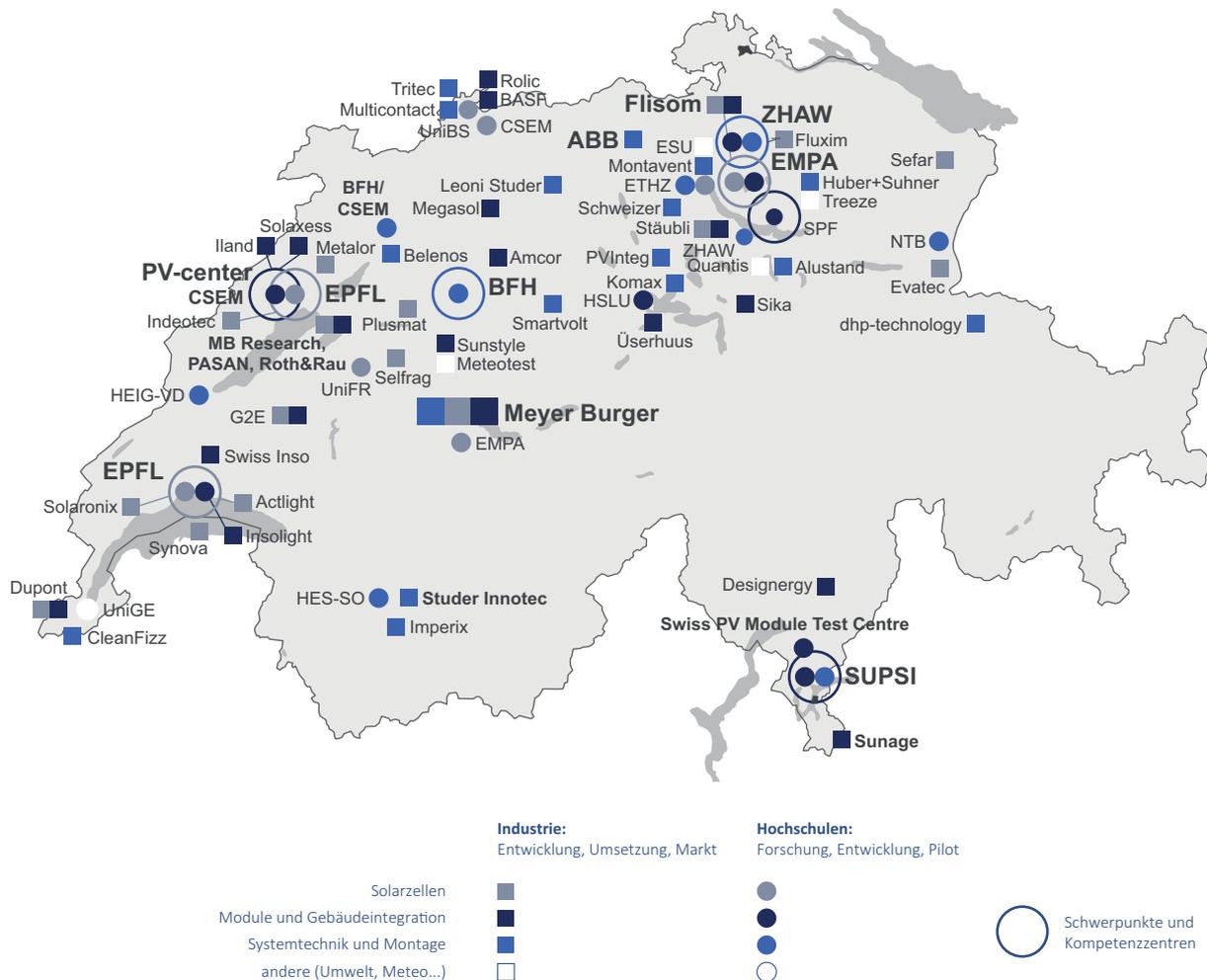
Im Bereich der Dünnschichtsolarmodule entwickelt die Schweizer Firma Flisom innovative Technologien zur Produktion flexibler und leistungsstarker Dünnschichtsolarmodule auf Basis von CIGS<sup>17</sup>. In einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren können hier dünne «Solarfolien» produziert werden mit dem Potenzial, grossflächige Module auf flexiblen Substraten mit einer Effizienz im Bereich der heute gängigen polykristallinen Siliziumsolarmodule (17 %) mit gerin-

14 Mit der Heterojunctionstechnologie (Heteroübergänge) lassen sich auf industriellem Massstab Modulwirkungsgrade von 21 % und mehr erreichen, welche deutlich höher liegen als bei durchschnittlichen kristallinen Siliziummodulen. Hierzu werden die Vorteile von kristallinen Siliziumsolarmodulen mit den guten Lichtabsorptions- und Passivierungseigenschaften von amorphem Silizium kombiniert, in dem eine dünne (wenige Nanometer dicke) Lage von amorphem Silizium auf einem monokristallinen Siliziumwafer abgeschieden wird. Basis zur erfolgreichen Entwicklung dieser Technologie in der Schweiz bilden jahrzehntelange Erfahrungen an der Universität Neuchâtel (heute EPFL Neuchâtel) aus Forschungsaktivitäten im Bereich der amorphen Dünnschichtsiliziumzellen. Die auf diesen Forschungsaktivitäten aufbauende Heterojunctionstechnologie von Meyer Burger zeichnet sich neben einem hohen Wirkungsgrad insbesondere durch einen geringeren Energieaufwand bei der Produktion, eine kleinere Anzahl an Prozessschritten, sowie durch einen besonders hohen Energieertrag (kWh/kW) aus.

15 Mit der sogenannten «Smart Wire»-Technologie kann der Einsatz von Silber für das Kontaktieren um bis zu 80 % verringert werden. Zudem sind die Solarzellen robuster gegenüber Beschädigungen (Mikrorisse) und es lassen sich bifaziale (doppelseitige) Solarmodule mit Heterojunctionsolarmodulen realisieren, welche einen höheren Energieertrag aufweisen.

16 Nach schwierigen Jahren konnte das Unternehmen Meyer Burger im ersten Halbjahr 2016 erstmals wieder einen positiven «Cashflow» erzielen. Dazu beigetragen hat ein um 75 % markant angestiegener Umsatz von CHF 217,8 Millionen [28].

17 CIGS = Kupfer-Indium-Gallium-(Di-)Selenid.



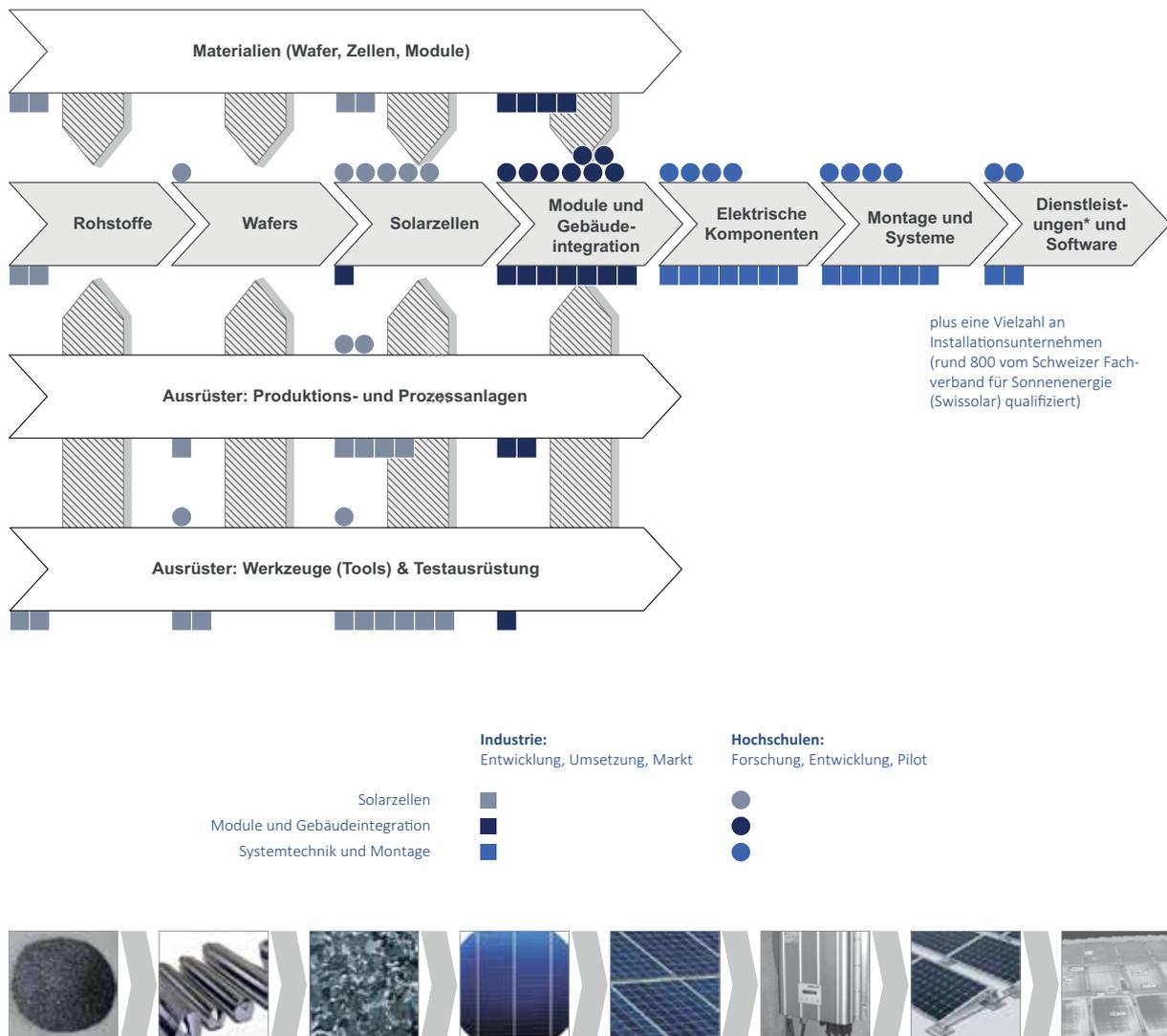
**Abbildung 4.1** Photovoltaiktechnologielandschaft Schweiz: Übersicht über Akteure im Bereich Photovoltaiktechnologieentwicklung aus Hochschule (●) und Industrie (■) (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Nicht aufgeführt sind hier die vielen Planungs- und Ingenieurbüros, Installationsunternehmen<sup>18</sup>, sowie Betreiber von Photovoltaikanlagen. Während ein Teil der Unternehmen mehrheitlich im Photovoltaikbereich aktiv sind, stellt die Photovoltaik für andere Unternehmen einen Teilbereich des Geschäftsfeldes dar. Unternehmen und Forschungseinrichtungen sind klassifiziert nach «Solarzellen» mit Aktivitäten rund um die Entwicklung von Solarzellen (Forschung und Entwicklung, Materialbereitstellung, Prozessanlagen usw.), nach «Module und Gebäudeintegration» mit Arbeiten um das Thema Photovoltaikmodule (Produktion, Materialien, Prozessanlagen, Photovoltaikgebäudeelemente und Solararchitektur, Qualitätssicherung im Modulbereich usw.), sowie nach «Systemtechnik und Montage» zum Thema Photovoltaik als Gesamtsystem (Wechselrichter, elektrische Komponenten Qualitätssicherung, Netzintegration, Speicherung usw.). Weiter sind einige Akteure im Bereich Umweltbetrachtungen und Ertragsmodellierung (Meteo) aufgeführt. An einzelnen Hochschulen bestehen von Zeit zu Zeit für die Photovoltaik relevante Forschungsprojekte, ohne dass eine kontinuierliche Aktivität existiert.

gem Energie- und Personalaufwand zu produzieren. In den letzten zwei Jahren wurde hier eine grössere (15 MW) Pilotproduktionsanlage realisiert, um die Aufskalierung dieser komplexen Technologie voranzutreiben. Die Entwicklung der Firma Flisom basiert auf einem erfolgreichen Wissens- und Technologietransfer aus dem Labor für dünne Filme und Photovoltaik der Empa, wo eine langjährige enge Forschungskoopeation besteht.

Neben Firmen, die hauptsächlich als Hersteller von Produktions- und Prozessanlagen aktiv sind, existiert eine Vielzahl industrieller Akteure in den Bereichen Zulieferer für Photovoltaikkomponenten, Photovoltaikgebäudeintegration, sowie Systemtechnik (Wechselrichter<sup>19</sup>, Stecker, Dosen, Montagesysteme usw.). Weitere industrielle Akteure bilden spezialisierte Unternehmen im Bereich Planung,

Anlagenauslegung und Überwachung. Wie Abbildung 4.2 aufzeigt, verteilt sich die Gesamtheit der Schweizer Photovoltaikindustrie über die gesamte Wertschöpfungskette der Photovoltaiktechnologieentwicklung. Die Produktion von Photovoltaikmodulen in der Schweiz ist relativ klein im Verhältnis zum Gesamtmarkt von rund 300 MW und beträgt ungefähr 50 MW (2015) (Tab. 5.1).

Die Gesamtheit der Photovoltaikbranche (inklusive Installateure und Planer) machte im Jahr 2015 rund 6 000 Arbeitsplätze aus mit einem totalen Umsatz von rund CHF 800 Millionen [29]. Die Exportrate liegt dabei bei rund 50 %. Betrachtet man die technologieentwickelnde Branche allein, liegt diese deutlich höher.



**Abbildung 4.2** Schweizer Akteure entlang der Photovoltaikwertschöpfungskette. Akteure aus Hochschule (●) und Industrie (■) decken die Gesamtheit der Photovoltaikwertschöpfungskette ab. Neben der zentralen Wertschöpfungskette von der Bereitstellung von Rohstoffen (Silizium) bis hin zu einer Solaranlage sind hier die für die Schweiz bedeutenden Bereiche der Zulieferer («Materialien»), «Produktions- und Prozessanlagen», «Ausrüster») aufgeführt. Die Verteilung gibt die Anzahl Akteure wieder und entspricht nicht der Gesamtgrösse der Aktivität in einem Teilbereich der Wertschöpfungskette. Im Bereich der Modulentwicklung und -produktion besteht ein Schwerpunkt bei der gebäudeintegrierten Photovoltaik, auch mit dem Fokus für die Anwendung in der Schweiz.

\*Ergänzend gehört zur Photovoltaikwertschöpfung die grosse Branche der Planer, Installateure und Betreiber von Photovoltaikanlagen in der Schweiz, welche hier nicht abgebildet ist ([www.swissolar.ch](http://www.swissolar.ch)).

18 Rund 800 vom Fachverband für Sonnenenergie Swissolar ([www.swissolar.ch](http://www.swissolar.ch)) qualifizierte Installationsunternehmen: [www.solarprofis.ch/solarprofisuche](http://www.solarprofis.ch/solarprofisuche).

19 Im Bereich Wechselrichter gehörte die Anfang der 1990er-Jahre aus der Ingenieursschule Biel (BFH-TI) hervorgegangene Sputnik Engineering ehemals zu den grössten Anbietern von Solarwechselrichtern, speziell auf dem europäischen Markt, und brachte über Jahre technische Innovationen (trafofreier Wechselrichter) auf den Markt. Auf Grund ausbleibenden Wachstums ging die Firma 2014 in Konkurs. Das Produkt Solarmax wird heute über eine deutsche Firma produziert und vertrieben. Im Jahr 2013 hat der Energietechnikkonzern ABB den Solarwechselrichterproduzenten Power One übernommen und gehört damit heute zu den führenden Anbietern von Solarwechselrichtern.

Der im Wallis ansässige Wechselrichterhersteller Studer Innotec SA entwickelt und produziert Produkte, welche speziell auch für netzferne Installationen ausgelegt sind.

**Tabelle 4.1** Photovoltaikmodulproduktion in der Schweiz in den Jahren 2014 und 2015 [29, 30]. Eine Solarzellenproduktion existiert nur im Rahmen von Pilotproduktionslinien (HJT/SmartWire-Technologie von Meyer Burger, CIGS-Technologie von Flisom). Die Modulproduktion ist spezialisiert auf Anwendungen im Bereich der Gebäudeintegration mit einem starken Fokus auf den Schweizer Markt (abgesehen von Sunage mit 19 MW für den Exportbereich). Die Firma Megasol hat die Produktionskapazitäten am Standort in Deitingen (SO) auf 80 MW stark ausgebaut und gehört damit zu den grössten Modulproduzenten in Europa. Der Schwerpunkt liegt auf Photovoltaikmodulen (Glas-Glas-Module) für die Gebäudeintegration (in Form und Farbgebung flexible Dach- und Fassadenelemente), wobei der Automatisierungsgrad deutlich erhöht wurde.

Nationale Hersteller	Technologie	Modulproduktion (MW)	
		2014	2015
Sunage	mono c-Si / poly c-Si*	25	17
Meyer Burger	mono c-Si / poly c-Si	10	13
Megasol	mono c-Si / poly c-Si	3	15
weitere	-	2	5
<b>Total</b>		<b>40</b>	<b>50</b>

\* mono c-Si = mono-kristalline Siliziumsolarzellen, poly c-Si = polykristalline Siliziumsolarzellen.

\*\* Die 50 MW entsprechen einem Millionstel der 2015 weltweit installierten Leistung.

## 4.2 Akteure an Hochschulen

Im Bereich der Solarzellenentwicklung gehören verschiedene Forschungseinrichtungen – an der Empa, an der EPFL in Neuchâtel (IMT) und Lausanne (LPI), am Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) – zu den weltweit führenden Labors, dies auf unterschiedlichen Zelltechnologien. Während in der Vergangenheit sogenannte Dünnschichttechnologien im Vordergrund standen (amorphes Dünnschichtsilizium, CIGS), hat sich dies in den letzten Jahren auf neue Solarzellenkonzepte im Bereich kristalliner Siliziumsolarzellen (Heterojunctionstechnologie, PERC) erweitert. Auch auf anderen Forschungsfeldern der Photovoltaik wie im Bereich der Photovoltaikintegration in Gebäuden und Netzen oder im Bereich der Qualitätssicherung und der elektrischen Systemtechnik laufen an verschiedenen Schweizer Forschungseinrichtungen hochqualitative und weltweit anerkannte Aktivitäten. Generell haben diese insgesamt deutlich zugenommen und die Forschungsinfrastrukturen wurden ausgebaut.

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Forschungskompetenzzentren an Schweizer Hoch- und Fachhochschulen kurz beschrieben.

### Empa: Abteilungen «Dünne Filme und Photovoltaik» und «Funktionspolymere»<sup>20</sup>

Am Labor für «Dünne Filme und Photovoltaik» der Empa in Dübendorf werden seit vielen Jahren Dünnschichtsolarzellen auf Basis von Verbindungshalbleitern (CdTe und CIGS) erforscht und weiterentwickelt<sup>21</sup>. Das Labor gehört zu den weltweit führenden Forschungseinrichtungen auf dieser Technologie, speziell im Bereich CIGS. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf Prozesstechniken bei niedrigerer Temperatur, was die Realisierung von CIGS-Solarzellen auf flexiblen Polymer substraten ermöglicht<sup>22</sup>. Weiter werden zusammen

mit anderen Schweizer Hochschulpartnern (EPFL) viel versprechende Ansätze zur Kombination von CIGS- mit anderen Technologien (Perowskit) in sogenannten Tandemzellen mit dem Potenzial für Wirkungsgrade von 30 % und mehr verfolgt. Sowohl Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, als auch die pilotmässige Umsetzung auf industrieller Skala mit dem Partner Flisom werden in verschiedensten Projekten durch die EU, die KTI, das BFE und dem SNF unterstützt.

### EPFL-PV-Lab in Neuchâtel / CSEM-PV-Center

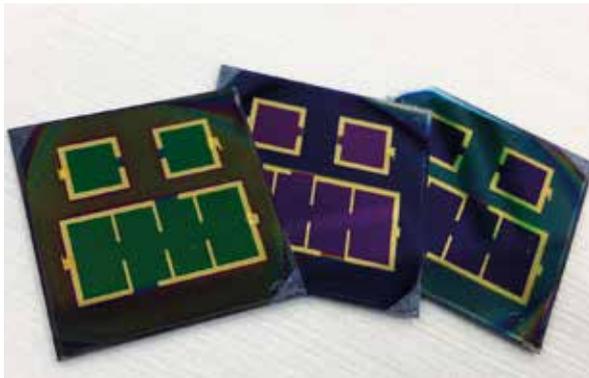
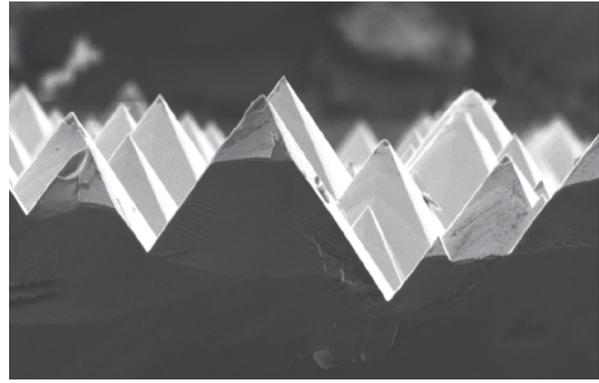
Das Photovoltaiklabor (PV-Lab) des Institut de Microtechnique (IMT) in Neuchâtel existiert seit 1984 und hat verschiedene Pionierleistungen bei der Entwicklung neuer Prozesse insbesondere zur Herstellung von Dünnschicht-Siliziumsolarzellen geleistet. Der Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten verlagerte sich in den letzten Jahren auf den Bereich von hocheffizienten kristallinen Siliziumsolarzellen, insbesondere auf die Entwicklung von Siliziumheteroübergängen (Heterojunction), wo langjährige Erfahrungen im Bereich der Plasmaabscheidung dünner Filme zum Tragen kommen. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte befassen sich mit Materialeigenschaften, der Weiterentwicklung verschiedener Zwischenschichten von Solarzellen (elektrisch leitfähige und optisch transparente Fensterschichten), mit der Strukturierung von Zellen zum verbesserten Lichteinfang oder neuen Methoden zur Kontaktierung. Im Bereich der Entwicklung von sogenannten Tandem-Zellen aus zwei übereinander geschichteten Solarzellen besteht auch eine enge Zusammenarbeit mit weiteren Partnern aus dem ETH-Bereich.

Neben Forschungsaktivitäten im Bereich Solarzellen werden auch die Themen Verpackung von Photovoltaikmodulen sowie neue Photovoltaikmodulkonzepte für die Gebäudeintegration bearbeitet. So konnte hier in den letzten

20 Neben den grösseren Photovoltaikaktivitäten in diesen beiden Abteilungen existieren in Einzelprojekten immer wieder weitere Forschungsaktivitäten am Empa Standort in Thun im Bereich des Sägens von Siliziumwafern, sowie bei der Entwicklung neuartiger Solarzellenkonzepte (Extremely thin absorber solar cell, ETA).

21 Diese Solarzellen nutzen dünne lichtabsorbierende Schichten aus Verbindungshalbleitern, entweder Kupfer-Indium-Gallium-(Di)selenid (CIGS), oder Cadmiumtellurid CdTe. Im Gegensatz zu kristallinen Siliziumsolarzellen ist die lichtabsorbierende Schicht um ein Vielfaches dünner, sodass weniger Material eingesetzt werden muss, was eine kostengünstigere und energieärmere Produktion erlaubt (kleinste Energierücklaufzeit). Unter den verschiedenen Dünnschichttechnologien machen diese beiden Technologien etwa 86 % der gesamten Dünnschichtsolarzellenproduktion aus. Bezogen auf die gesamte Solarzellenproduktion machen alle Dünnschichttechnologien zusammen etwa 7 % aus (2015).

22 Die Empa erzielte hier verschiedene Weltrekorde für den Wirkungsgrad von CIGS-Solarzellen auf flexiblen Substraten (20,4 % im Jahr 2013).



**Abbildung 4.3** Schweizer Innovationen im Bereich Solarzellen. Links oben: Die Empa gehört weltweit zu den führenden Labors im Bereich effizienter CIGS-Dünnschicht-Solarzellen. Seit 1999 konnte der Wirkungsgrad in verschiedenen Entwicklungsschritten von rund 13 auf über 20 % angehoben werden, wobei jeder Schritt einen weltweiten Rekordwert darstellt. Rechts oben: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberflächenstruktur einer Siliziumheterojunctionsolarzelle (Quelle: CSEM). Links unten: Monolithische Tandemsolarzelle aus einer Perowskit- in Kombination mit einer Siliziumsolarzelle. Diese Kombination hat das Potenzial, den Wirkungsgrad von Solarzellen deutlich zu erhöhen (PV-Lab) [32]. Rechts unten: Tandemsolarzelle basierend auf einer Kombination aus einer Gallium-Indiumphosphid- mit einer kristallinen Siliziumsolarzelle (Heterojunctionszelle), an welcher ein Rekordwirkungsgrad von 29,8 % gemessen werden konnte (Quelle: CSEM)..

Jahren eine Technologie entwickelt werden, welche es den Herstellern von kristallinen Silizium-Modulen erlaubt, diese farblich anzupassen, um damit die Integration von Photovoltaik in Gebäuden, insbesondere auch an Fassaden, voranzutreiben. Im Bereich des Energiemanagements für Photovoltaikspeichersysteme besteht eine Kollaboration in dem gemeinsam vom CSEM und der Berner Fachhochschule (BFH) getragenen Zentrum für Energiespeicherung (ESReC) in Biel.

Beide Institutionen, das PV-Lab der EPFL und das CSEM, arbeiten eng zusammen, wobei am PV-Lab eher grundlegendere Forschungsthemen behandelt werden, während das CSEM stark im Bereich der Umsetzung in Zusammenarbeit mit verschiedenen industriellen Partnern aktiv ist.

#### EPFL: Labor für Photonik und Grenzflächen (ISIC-LPI)

Das Labor für Photonik und Grenzflächen (LPI) an der EPFL in Lausanne ist weltweit bekannt für seine grundlegenden Arbeiten im Bereich der Farbstoffsolarzellen (Grätzel-Zellen), welche dort seit den 1990er-Jahren erforscht und weiterentwickelt werden. Aktuell werden von Schweizer

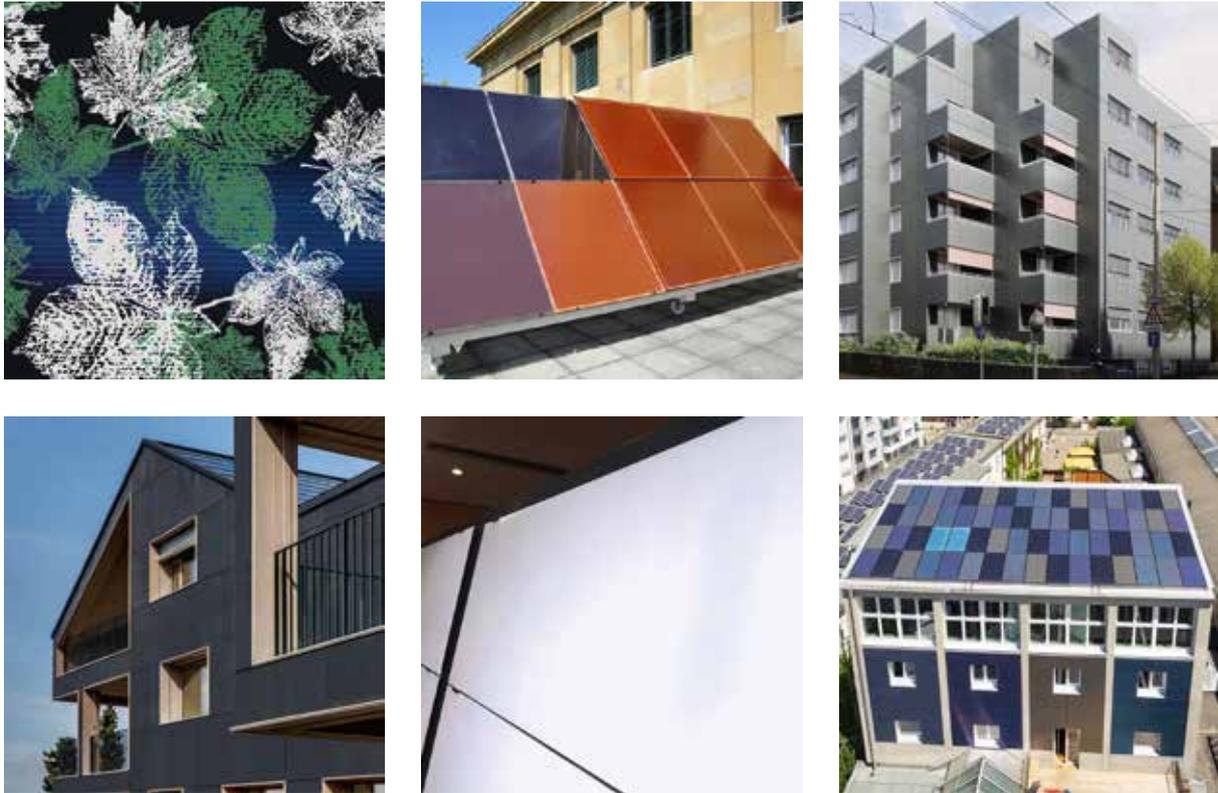
Firmen (Solaronix, Glass2Energy) hier grössere Anstrengungen unternommen, diese Technologie industriell weiter umzusetzen, wobei eine Zusammenarbeit mit der EPFL besteht.

Eine vielversprechende Weiterentwicklung der Farbstoff-solarzellen stellen die erst in den letzten Jahren intensiv erforschten Perowskitsolarzellen<sup>23</sup> dar. Die Effizienz solcher Zellen konnte im Labor innerhalb von nur sechs Jahren von unter 4 auf über 20 % erhöht werden, was im Bereich der Solarzellenentwicklung einmalig ist (siehe Abb. 1.4). Das LPI gehört hier zu den weltweit führenden Labors mit einem Laborrekordwert von 21 %. Grosse Herausforderungen für die weitere Umsetzung dieser Ansätze bilden die Langzeitstabilität solcher Zellen sowie die für Perowskit-Zellen eingesetzten Materialien.

#### Verschiedene Fachhochschulen:

**SUPSI-ISAAC:** Das Institut für angewandte Nachhaltigkeit an der bebauten Umwelt (ISAAC) an der Tessiner Fachhochschule SUPSI besitzt eine lange Tradition in der Qualitätssicherung von Photovoltaikmodulen und stellt ein

<sup>23</sup> Diese Solarzellen nutzen als lichtabsorbierendes Material Metall-Halogenide mit einer Perowskit-Kristallstruktur. Das Standardmaterial: ist CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>.



**Abbildung 4.4** Beispiele für innovative Photovoltaikmodule zur Gebäudeintegration aus der Schweiz: von links oben nach rechts unten: (1) Glasbearbeitung auf normalen Solarpanels mit verschiedenartigen Strukturen und Farben (Quelle: Raumweg GmbH und Projektpartner); (2) Terracottafarbene Photovoltaikmodule, entwickelt am CSEM und am PV-Lab in Neuchâtel (Quelle: CSEM, ÜserHuus AG); (3) Hinterlüftete Photovoltaikfassade in Zürich (Quelle: Viridén + Partner AG); (4) Energieautarkes Mehrfamilienhaus in Brütten mit nicht spiegelnden Photovoltaikplatten als Fassadenelemente (Quelle: Umwelt Arena Spreitenbach); (5) Am CSEM entwickelte Technologie, welche durch eine zusätzliche Folie (Streufilter) konventionellen Siliziummodulen ein weisses oder farbiges Erscheinungsbild gibt. Die Entwicklung wird von der Firma Solaxess SA weiterverfolgt (Quelle: CSEM); (6) Farblich gestaltete Photovoltaikmodule an einem Gebäude in Basel. Die hier eingesetzten Module wurden von der EPFL und der Firma Swisins SA entwickelt (Quelle: Solvatec AG)..

Kompetenzzentrum im Bereich der Photovoltaikgebäudeintegration dar ([www.bipv.ch](http://www.bipv.ch)). Zentrale Aktivitäten bilden Langzeitmessungen<sup>24</sup> und Dienstleistungen (Energy rating) von Photovoltaikmodulen, die Zertifizierungen von Photovoltaikmodulen gemäss IEC-Normen<sup>25</sup> sowie Untersuchungen zum Thema Netzintegration von Photovoltaik.

**HSR-SPF:** Das Institut für Solartechnik (SPF) der Hochschule Rapperswil (HSR) ist ein etabliertes Testzentrum im Solarwärmebereich mit verstärkten Aktivitäten auch im Bereich Photovoltaik. Speziell wird hier an der Qualitätssicherung von Photovoltaikanlagen im Betrieb (mobiles Testlabor) gearbeitet. Weiter laufen hier auch Untersuchungen zu Hybridkollektoren (Solarwärme und Photovoltaik). Mit dem SUPSI-ISAAC besteht seit einiger Zeit eine Zusammenarbeit.

**ZHAW:** An der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften besteht am Standort Winterthur seit einigen Jahren ein Schwerpunkt im Bereich Photovoltaiksystemtechnik. Weiter werden hier neue Modul- und Anlagenkonzepte (Leichtbau) entwickelt. Am Standort Wädenswil ste-

hen anlagentechnische und umweltbezogenen Fragestellungen im Vordergrund.

**BFH:** An der Berner Fachhochschule (BFH) existiert am Standort Burgdorf ein Kompetenzzentrum im Bereich der Qualitätssicherung von Wechselrichter mit entsprechender Mess- und Testinfrastruktur. Weiter ist das Labor spezialisiert auf Langzeitmessungen von Photovoltaikanlagen an ausgewählten Standorten und beschäftigt sich intensiv mit sicherheitstechnisch relevanten Fragen. Am Standort Biel wird am gemeinsam mit dem CSEM getragenen Zentrum für Energiespeicherung (**ESReC**) im Bereich des Energiemanagements für Photovoltaikspeichersysteme gearbeitet.

Weitere für die Photovoltaik relevante Forschungsaktivitäten bestehen an der Hochschule Luzern (**HSLU**) zum Thema Gebäudeintegration und Architektur, an der Hochschule für Technik Buchs (**NTB**) sowie an der Fachhochschule Westschweiz (**HES-SO**), insbesondere an den Standorten Sion (**HES-SO Valais**) und Yverdon (**HEIG-VD**).

<sup>24</sup> Am ISAAC wird die älteste netzgekoppelte Photovoltaikanlage Europas betrieben, welche 1982 realisiert wurde.

<sup>25</sup> Das SUPSI betreibt seit 2009 das SWISS PV module test centre in Lamone als akkreditiertes Testzentrum für Photovoltaikmodule gemäss ISO-17025.

### 4.3 Themenfelder in Forschung, Umsetzung und Industrie

Schweizer Akteure aus Forschung und Industrie sind in verschiedensten Bereichen der Photovoltaik aktiv und decken

einen grossen Bereich der Wertschöpfungskette ab. In Tabelle 4.2 sind dazu verschiedene Themenfelder aufgelistet.

**Tabelle 4.2 Photovoltaiktechnologien und -themenfelder: ●●● = grosse Aktivität, ●● = mittlere Aktivität, ● = kleine Aktivität.**

<b>Produktions- und Prozessanlagen / Materialien</b>	Forschung	Umsetzung (Pilot)	Industrie
Silizium: Aufbereitung und Recycling	●	●●	●●
Silizium: Waferherstellung	●	●●	●●●
Silizium: Beschichtung, Texturierung	●●●	●●	●●●
Silizium: Thermische Prozesse (firing)	●●●	●	●●●
Silizium: Verschalten von Si-Zellen (Tabber, Stringer)	●	●●	●●●
Silizium: Verkapselung, Modullaminatoren	●	●	●●●
Silizium: Zellen- und Modullinien (PERC, HJT)	●●	●●●	●●
CIGS*: Rolle-zu-Rolle Produktionslinien	●●	●●●	●●
Prozesskontrolle, Testen (in- und offline)	●	●●	●●
Materialien für Verkapselung / Chemikalien / Klebstoffe	●	●●	●●
<b>Solarzellen und -module</b>	Forschung	Umsetzung (Pilot)	Industrie
CIGS (CIGS-Dünnschicht)	●●●	●●●	●●
CdTe (Cadmiumtellurid-Dünnschicht)	●●	●	
c-Si (kristallines Silizium / PERC)	●●●	●	●●
HJT (Heterojunction)	●●●	●●	●●
a-Si:H (amorphes Dünnschichtsilizium)	●		
DSC (dye-sensitized solar cell / Farbstoffsolarzelle)	●●	●●	●
Perovskitsolarzellen	●●	●	
OPV (organische Photovoltaik)	●●	●	
ETA (extremely thin absorber)-Solarzellen	●		
Tandemsolarzellen	●●		
Hybridkollektoren (Photovoltaik und Solarthermie)	●	●●	●
andere**	●		
<b>Photovoltaikgebäudeintegration</b>	Forschung	Umsetzung (Pilot)	Industrie
Photovoltaikgebäudeelemente, Solararchitektur	●●	●	●●
Integrationsysteme	●	●●	●●
Spezialmodule (Oberfläche, Farbgebung)	●●	●●	●●
<b>System: Wechselrichter, elektrische Verbindung, Montage</b>	Forschung	Umsetzung (Pilot)	Industrie
Solarwechselrichter, MPP-Tracker***	●	●	●●**
Kabel und Stecker, Anschlussdosen	●	●●	●●●
Montagesysteme	●	●●	●●
Netzintegration	●●	●	
Speicherung	●●	●●	●
<b>Qualitätssicherung</b>	Forschung	Umsetzung (Pilot)	Industrie
Wechselrichter	●●●	●●	
Module (Gebäudeintegration)	●●●	●●	●●
Photovoltaikgesamtsystem	●●	●●	
<b>Software, Planung, Umwelt</b>	Forschung	Umsetzung (Pilot)	Industrie
Produktionsvorhersage (Meteo)	●	●●	●●●
Anlagenplanung und -auslegung	●	●	●●●
Anlagenmonitoring		●	●●
Umweltanalysen (Lebenszyklusanalysen, Blendung)	●●	●	

\* CIGS = Kupfer-Indium-Gallium-(Di-)Selenid.

\*\* Z. B. Systeme mit konzentrierender Photovoltaik (CPV).

\*\*\* Die Firma Power One als einer der weltweit grössten Anbieter für Solarwechselrichter gehört seit 2013 zur ABB-Gruppe, Entwicklung und Produktion erfolgt aber mehrheitlich nicht in der Schweiz.

\*\*\*\* MPP = Maximum Power Point Tracking (Gerät zur Maximal-Leistungspunkt-Suche).

## 5 Wissens- und Technologietransfer

Der Wissens- und Technologietransfer von der Forschung in die Industrie wird regional durch verschiedene Technologietransferstellen unterschiedlich stark unterstützt. In der Regel ist dieser an die Hochschulen und Forschungsinstitute angegliedert.

Spezifisches Fachwissen oder Erfindungen und Innovationen aus dem Hochschulbereich führen oft zur Gründung von neuen Firmen (Start-ups) oder zu neuen Geschäftsbereichen in bereits bestehenden Firmen. Erfolgreiche Beispiele hierfür sind unter anderen die Firmen Flisom mit Technologietransfer aus der Empa, Solaronix und Glass2Energy mit Technologietransfer aus der EPFL Lausanne oder Roth&Rau (Meyer Burger), Indeotec, Swissino, Evatec mit Technologietransfer aus der EPFL Neuchâtel.

In den meisten Fällen laufen die Forschungsaktivitäten an den beteiligten Hochschulen parallel zur Firmenentwicklung weiter, was einen kontinuierlichen langfristigen Wissenstransfer zwischen Hochschulpartnern und Industrie ermöglicht.

Weiter sind in den vergangenen Jahren bestehende Firmen, welche vorab nicht in der Photovoltaik aktiv waren, Partnerschaften mit Hochschulen eingegangen, um eigene Forschungsideen oder Produktentwicklungen fundiert abklären zu lassen. Solche Entwicklungsarbeiten können im Rahmen von Projekten gefördert durch die Kommission für Technologie und Innovation KTI stattfinden. Zwischen Forschungsinstituten an Hochschulen und einzelnen Firmen existiert eine Vielzahl solcher Projekte.

## 6 Förderung im Bereich Photovoltaikforschung

Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte werden von verschiedenen öffentlichen Agenturen unterstützt (Abb. 6.1), wobei diese Projekte mit unterschiedlichem Technologiereifegrad fördern. Die Projektförderung erfolgt dabei in den meisten Fällen nach dem «Bottom-up»-Prinzip, d. h. die Projektpartner definieren das Projektthema und reichen es bei der entsprechenden Förderstelle ein.

Das Bundesamt für Energie (BFE) setzt seine Fördermittel nach einem programmatischen Ansatz ein und versucht, damit die nationale Energieforschung zu koordinieren. Die Mittel werden subsidiär zu den Anstrengungen der privaten und übrigen öffentlichen Forschungsstellen genutzt. Insbesondere wird dort gefördert, wo Lücken in der Förderlandschaft Schweiz bestehen.

### Forschungsprogramm Photovoltaik des BFE

Das BFE-Forschungsprogramm Photovoltaik beschäftigt sich seit drei Jahrzehnten mit der direkten Umwandlung von Solarenergie in Strom. Es umfasst dabei Schweizer Aktivitäten aus Forschung- und Entwicklung, sowie aus dem Bereich Pilot und Demonstration. Der Fokus liegt dabei auf anwendungs- und industrieorientierten Projekten ([www.bfe.admin.ch/forschungphotovoltaik](http://www.bfe.admin.ch/forschungphotovoltaik)).

Im Bereich Solarzellen besteht neben der Forschungsförderung von mittel- und langfristig anwendbaren Technologien («advanced» PERC, Perowskitesolarzellen, Tandemsolarzellen) ein Schwerpunkt in industrienahen und pilotmässigen Aktivitäten im Bereich flexibler CIGS-Solarzellen und im Bereich von Siliziumsolarzellen (Heterojunctionstechnologie).

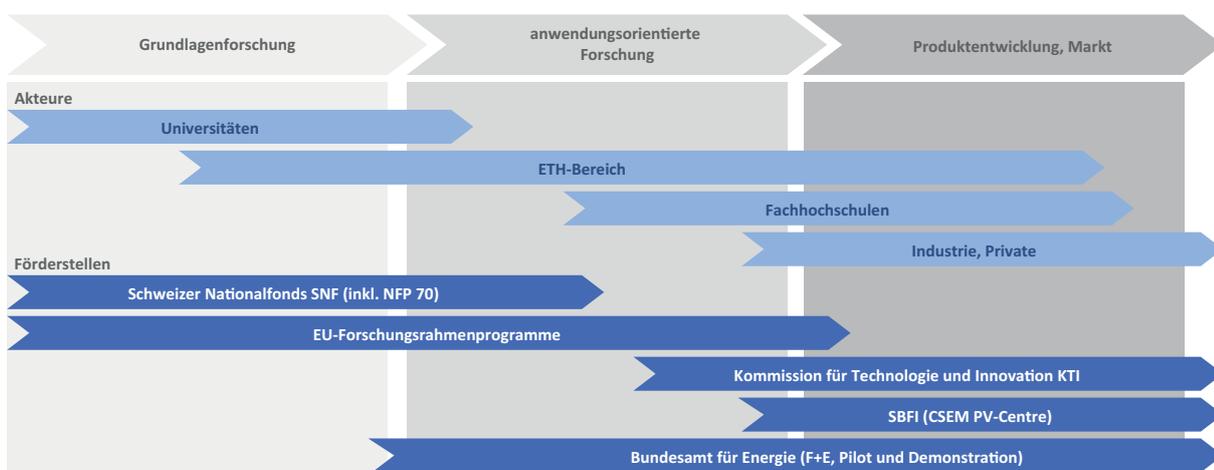


Abbildung 6.1 Verschiedene Förderstellen im Bereich der Photovoltaikforschung von Grundlagenforschung bis hin zur Produktentwicklung. Über die spezifisch für die Photovoltaik zur Verfügung stehenden Mittel des Bundesamts für Energie (BFE) wird durch einen gezielten Einsatz im Bereich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung eine Brücke geschlagen zwischen Grundlagenforschung und industrienaher Forschung und Produktentwicklung.

Die Photovoltaikgebäudeintegration stellt ein langjähriges Thema dar, wo dank neuer Optionen im Bereich oberflächenstrukturierter und farbiger Photovoltaikmodule eine Vielzahl neuer Projekte entstanden ist, speziell auch mit Beteiligung von verschiedenen Spin-off-Unternehmen. Weitere Schwerpunkte bilden die Qualitätssicherung, sowie die Themen Netzintegration und Modelle zur Produktionsvorhersage.

Neben der subsidiären Förderung von Photovoltaikprojekten stellt das BFE-Forschungsprogramm Photovoltaik auch die Zusammenarbeit mit internationalen Organisationen sicher, z. B. durch die Vertretung der Schweiz im Technologieprogramm der IEA zum Thema Photovoltaik ([www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)) oder durch die Beteiligung an europäischen Netzwerken zur Technologieförderung (European Research Area Networks).

### Nationales Photovoltaikkompetenzzentrum

Anfang 2013 startete am Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) in Neuchâtel das Zentrum für Photovoltaiksysteme (PV-center), welches über einen Zeitraum von vier Jahren vom Bund mit 19 Millionen Franken unterstützt wird. Das Zentrum baut auf einer über 25-jährigen Erfahrung im Bereich der Photovoltaikforschung des PV-Labors am Institut de Microtechnique der EPFL-Neuchâtel sowie des CSEM Muttenz auf. Als industrie- und anwendungsorientiertes Programm hat das PV-Center zum Ziel, die industrielle Umsetzung von Resultaten aus Forschung und Entwicklung zu beschleunigen, die Entwicklung von neuen Photovoltaikzell- und Modultechnologien voranzutreiben, sowie allgemein Beiträge zu leisten für die Integration von Photovoltaik als wesentliches Element einer nationalen Energieversorgung.

## 7 Beispiele für Zusammenarbeit von Hochschule und Industrie

### Pilotlinie für innovative Hochleistungssolarzellen

Seit 2013 wird im Projekt «Swiss-Inno HJT» der Industrie-gruppe Meyer Burger zusammen mit dem PV-Center am CSEM in Neuchâtel eine Pilotlinie für Hochleistungssolarzellen basierend auf der Heterojunctionstechnologie aufgebaut. Das Bundesamt für Energie und der Kanton Neuchâtel fördern dieses Projekt. Die eingesetzte Zelltechnologie wurde während mehrerer Jahre in einer engen Kooperation zwischen dem PV-Lab der EPFL in Neuchâtel und Roth&Rau Research entwickelt. Es handelt sich dabei um mono-kristalline Siliziumwafer, welche mit wenigen Nanometern amorphem Silizium beschichtet werden. Damit lassen sich Modulwirkungsgrade von 21 % erreichen, welche deutlich höher liegen als bei durchschnittlichen kristallinen Siliziummodulen (16 %). Der Aufbau dieser Pilotlinie mit einer anvisierten Produktionskapazität von 600 kW<sub>p</sub>/Jahr soll das Potenzial für niedrige Herstellungskosten (weniger

als 0.65 CHF/W) demonstrieren. Das Projekt trägt dazu bei, eine Markteinführung dieser Technologie vorzubereiten, und damit insgesamt den Technologiestandort Schweiz im Bereich Photovoltaik zu stärken ([www.swissinno-hjt.ch](http://www.swissinno-hjt.ch)).

### Pilotproduktionslinie für flexible Dünnschicht-solarzellen

Das Unternehmen Flisom hat im Sommer 2015 eine Pilotlinie für flexible CIGS-Dünnschichtmodule in der Nähe von Zürich in Betrieb genommen. Die Produktionskapazität der Anlage, welche Solarzellen im Rolle-zu-Rolle-Verfahren herstellt, liegt bei 15 MW. Die Investitionen durch grösstenteils ausländische Geldgeber erfolgten aufgrund eines erfolgreichen Wissens- und Technologietransfers von der Empa Dübendorf zur Firma Flisom. Technologie- und Prototypenentwicklung wurden massgeblich durch Bundesmittel (BFE, KTI) und Projekte der europäischen Union unterstützt.

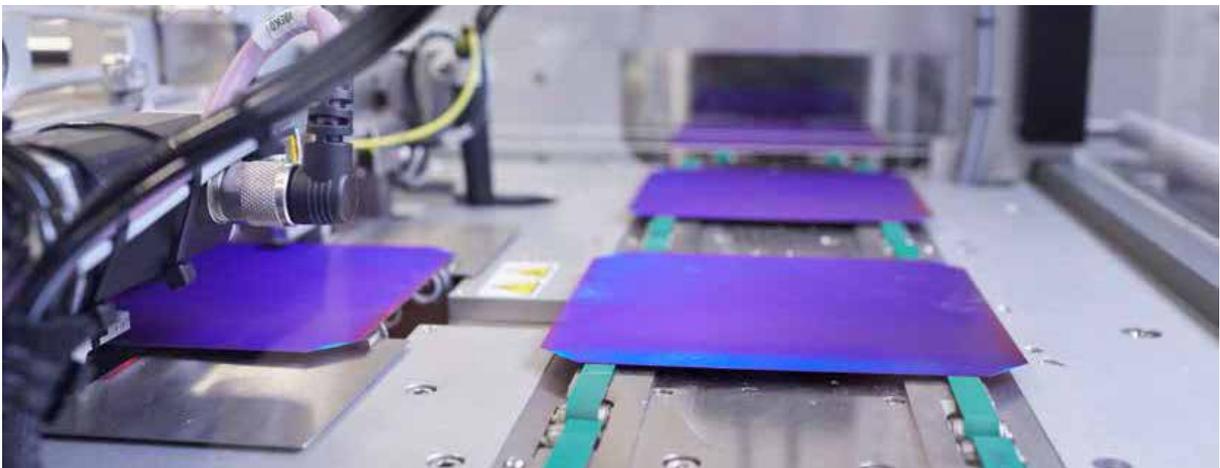


Abbildung 7.1 Schweizer Pilotlinie für innovative Hochleistungssolarzellen. Das Projekt «Swiss-Inno HJT» ([www.swissinno-hjt.ch](http://www.swissinno-hjt.ch)) der Meyer Burger Gruppe zusammen mit dem CSEM Neuchâtel dient dazu, die technologische Innovation in der Schweiz im Bereich Photovoltaik voranzutreiben. Das Projekt wird unterstützt durch die Industrie, das CSEM, den Kanton Neuenburg und als grösseres Pilotprojekt (durch das Bundesamt für Energie). (Quelle: Meyer Burger Research AG)

## 8 Referenzen

- [1] Medium Term Renewable Energy Market Report (MTRMR), Internationale Energieagentur IEA (2015)
- [2] Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy - 2014 edition, Internationale Energieagentur IEA (2014)
- [3] Global Trends in Renewable Energy Investment, Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF (2016)
- [4] Trends 2015 in Photovoltaic applications, IEA-PVPS (2015) ([www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org))
- [5] Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2015, IEA-PVPS (2016) ([www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org))
- [6] Recent Facts about Photovoltaics in Germany, Fraunhofer ISE (2016)
- [7] The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025, International Renewable Energy Agency IRENA (2016)
- [8] Photovoltaics Report 2016, Fraunhofer ISE und PSE AG (2016)
- [9] The Price of Solar – Benchmarking PV Module Manufacturing Cost, Solar Alliance for Europe (2016)
- [10] Current and Future Cost of Photovoltaics: Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Fraunhofer ISE (Auftraggeber Agora Energiewende) (2015)
- [11] National Center for Photovoltaics (NCPV) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL) ([www.nrel.gov/ncpv](http://www.nrel.gov/ncpv))
- [12] Analysis of Long-Term Performance of PV Systems, IEA PVPS, Task 13 (2014) (<http://iea-pvps.org>)
- [13] How technology innovation is anticipated to reduce the cost of energy from European photovoltaic installations, KIC InnoEnergy (2015)
- [14] A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, European Technology and Innovation Platform Photovoltaics (2011)
- [15] Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 und zur Volksinitiative «Für den geordneten Ausstieg aus der Atomenergie» vom 4. September 2013 ([www.admin.ch](http://www.admin.ch))
- [16] Energieperspektiven 2050, Bundesamt für Energie, Prognos AG, Basel (2012) und Ecoplan AG, Bern (2012) ([www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch))
- [17] Das Potenzial der erneuerbaren Energien bei der Elektrizitätsproduktion 2050, Bundesamt für Energie (2012) ([www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch))
- [18] Markterhebung Sonnenenergie 2014. Teilstatistik der Schweizerischen Statistik der erneuerbaren Energien, Swissolar im Auftrag BFE, Swissolar (2016) ([www.swissolar.ch](http://www.swissolar.ch))
- [19] Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEEn), Konferenz Kantonaler Energiedirektoren (2014) ([www.endk.ch](http://www.endk.ch))
- [20] Vollzugshilfe für die Umsetzung des Eigenverbrauchs nach Art. 7 Abs. 2bis und Art. 7a Abs. 4bis des Energiegesetzes (EnG; SR 730.0), Bundesamt für Energie BFE (2014)
- [21] Masterplan Cleantech, EVD/UVEK (2011) ([www.cleantech.admin.ch](http://www.cleantech.admin.ch))
- [22] Masterplan Cleantech, UVEK (2015) ([www.cleantech.admin.ch](http://www.cleantech.admin.ch))
- [23] Cleantech Energiestrategie, Swissscleantech (2010)
- [24] Swiss Cleantech Report 2011, Empa, BBT, CleantechAlps, CSEM, IGE, Osec, PSI, SIX Swiss Exchange und swissscleantech (März 2011) ([www.empa.ch](http://www.empa.ch))
- [25] Energie Strategie 2050: Impulse für die schweizerische Energiepolitik, Energie Trialog Schweiz (ETS) (Oktober 2009) ([www.energetrialog.ch](http://www.energetrialog.ch))
- [26] Optimierung der Wertschöpfungskette Forschung-Innovation-Markt im Cleantech-Bereich, K. Ostertag et al., Bericht Fraunhofer ISE (März 2011)
- [27] Klimaschutztechnologien in Europa – Folgerungen aus Patent- und Wirtschaftsdaten, EPO und UNEP (2015) ([www.epo.org](http://www.epo.org))
- [28] Meyer Burger, Halbjahresergebnis 2016 (2016) ([www.meyerburger.com/fr/medien/ad-hoc-commercial-news](http://www.meyerburger.com/fr/medien/ad-hoc-commercial-news))
- [29] National Survey Report of PV Power Applications in Switzerland, IEA-PVPS (2016) ([www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org))
- [30] National Survey Report of PV Power Applications in Switzerland, IEA-PVPS (2014) ([www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org))
- [31] National Survey Report of PV Power Applications in Switzerland, IEA-PVPS (2015) ([www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org))
- [32] Efficient Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell with Cell Area >1 cm<sup>2</sup>, J. Werner et al., J. Phys. Chem. Lett 7, 161–166 (2016)

### Bildquellen:

- Titel: Meyer Burger Research AG (Hauterive NE) / CSEM Neuchâtel  
Seite 0: Meyer Burger Research AG (Hauterive NE) / CSEM Neuchâtel  
Seite 21: Swiss PV Module Test Center, SUPSI (Renato Quadroni)

