

# **KONSULTATIONSPROZESS 2023 IM FORSCHUNGSNETZWERK ERNEUERBARE ENERGIEN – PHOTOVOLTAIK**

Ergebnisse der Arbeitsgruppen – Zusammengetragen durch die Mentoren

## IMPRESSUM

**Herausgeber:**

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich

**Redaktion und verantwortlich für den Inhalt:**

Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien

**Gestaltung und Produktion:**

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich

**Stand:**

März 2023



**ERNEUERBARE  
ENERGIEN**

FORSCHUNGSNETZWERKE  
ENERGIE

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## INHALT

<b>INHALT</b> .....	<b>3</b>
<b>1. KONSULTATIONSPROZESS</b> .....	<b>4</b>
1.1. ZEITPLAN DES KONSULTATIONSPROZESSES .....	4
1.2. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DES KONSULTATIONSPROZESSES.....	4
<b>2. ERGEBNISÜBERSICHTEN</b> .....	<b>6</b>
2.1. ARBEITSGRUPPE 1+2: KRISTALLINES SILIZIUM.....	6
2.2. ARBEITSGRUPPE 3: ALTERNATIVE KONZEPTE UND MATERIALIEN .....	9
2.3. ARBEITSGRUPPE 4: SYSTEME UND KOMPONENTEN .....	15
2.4. ARBEITSGRUPPE 5: ÖKONOMIE, METROLOGIE / CHARAKTERISIERUNG .....	18
2.5. ARBEITSGRUPPEN DER BEGLEITFORSCHUNG.....	24
2.5.1. ARBEITSGRUPPE 6A: PV BEGLEITFORSCHUNG – THEMA SOZIO-ÖKONOMISCHE BETRACHTUNGEN UND ANALYSEN, PARTIZIPATION UND AKZEPTANZ .....	24
2.5.2. ARBEITSGRUPPE 6B PV BEGLEITFORSCHUNG – ABSICHERUNG STROMVERSORGUNG AUS PV UND GESCHÄFTSMODELLE .....	27
2.5.3. ARBEITSGRUPPE 6C PV BEGLEITFORSCHUNG – AGRI- PHOTOVOLTAIK.....	30

## 1. KONSULTATIONSPROZESS

Im März 2023 wurde seitens BMWK ein Konsultationsprozess zur Mitgestaltung des 8. Energieforschungsprogramms im Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien – Photovoltaik (PV) initiiert. Hierzu wurden die Sprecher der fünf Arbeitsgruppen und der Begleitforschung des Forschungsnetzwerkes eingeladen, den aktuellen Stand zum Status Quo, zu zukünftigen Forschungsbedarfen sowie zu Verwertungspotenzialen zu diskutieren und darzustellen.

Das Fördervolumen des BMWK im Bereich der angewandten Energieforschung wird kontinuierlich fortgeschrieben werden. Inhaltlich geprägt wird die Entwicklung von aktuellen Notwendigkeiten, darunter die Wasserstoffwirtschaft, der Wärmesektor und die CO<sub>2</sub>-Kreislaufwirtschaft. In allen Fällen steht die wirtschaftliche Verwertung im Mittelpunkt; dabei muss der Nutzen der Forschungsförderung intensiviert überprüft und kommuniziert werden. Der Konsultationsprozess im Forschungsnetzwerk PV dient daher der Orientierung der Forschungsstrategie in diesem Technologiefeld sowie der Ausrichtung an den Notwendigkeiten der Branche in den kommenden Jahren.

Zuletzt wurden die Forschungsbedarfe im Konsultationsprozess 2020/21 abgefragt. Die dabei erzielten Ergebnisse dienten als Grundlage für die Aktualisierung und Fortschreibung der Forschungsbedarfe im 8. Energieforschungsprogramm. Der aktuelle Stand der Technologieentwicklung wurde nun durch die Sprecher der einzelnen Arbeitsgruppen überprüft und der Zeitplan für die zukünftigen Forschungsbedarfe und Verwertungsaussichten aktualisiert. Die überarbeiteten Expertenempfehlungen werden im Intranet des Forschungsnetzwerkes allen Mitgliedern zur Verfügung gestellt. Durch den parallel gestarteten öffentlichen Konsultationsprozess zur Programmausgestaltung haben zudem alle Interessierten die Möglichkeit, sich in die Neugestaltung des 8. EFP einzubringen.

### 1.1. ZEITPLAN DES KONSULTATIONSPROZESSES

15.03.2023    Auftaktworkshop mit den Mentoren und weiteren Industrievertretern des Forschungsnetzwerks PV, Diskussion der Zielsetzungen und Abstimmung des Zeitplans

31.03.2023    Einreichung der Ergebnisse der einzelnen Arbeitsgruppen

im Anschluss    Zusammenführung durch den Projektträger Jülich und Kommunikation an das BMWK

### 1.2. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DES KONSULTATIONSPROZESSES

Ein zentrales Thema in allen Arbeitsgruppen ist die Senkung der Kosten, die letztendlich in eine Senkung der Stromgestehungskosten münden soll. Die Arbeitsgruppen 1 und 2 stellen deutlich das Potenzial für weitere Verbesserungen der etablierten Prozesse dar. Im Vordergrund stehen dabei zum Beispiel Ausbeute, CO<sub>2</sub>-Footprint und Umweltauswirkungen aller Teilprozesse.

Es wird deutlich, dass neue Technologien, wie zum Beispiel Tandem-Konzepte, in Zukunft weitere Vorteile bringen werden. Neue Technologien bieten zudem die Möglichkeit, wichtige Teile der Wertschöpfungskette wieder in Deutschland und Europa anzusiedeln, da besonders bei innovativen Ansätzen deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen weiterhin in vielen Bereichen führend

sind. Grundsätzlich können die deutsche PV-Industrie und -Forschung die Energiewende nur zuverlässig vorantreiben, wenn alle Teile der Produktionskette verfügbar sind. Aktuell besteht in Teilbereichen eine hohe Abhängigkeit von asiatischen Zulieferern.

Eine weitere Notwendigkeit besteht darin, durch integrierte PV-Konzepte (xPV<sup>1</sup>) die für photovoltaische Anwendungen nutzbare Flächenkulisse zu erweitern. Die Möglichkeiten reichen von leichteren und flexiblen Modulen bis hin zu völlig neuen Bauteilen. Da hier oft individuell angepasste Lösungen benötigt werden, besteht ein besonders hohes Potenzial für mittelständische Unternehmen.

Die zur Erreichung der Klimaziele notwendigen Zuwächse erfordern eine nachhaltige und ressourcenorientierte Produktion, bei der bereits das EOL<sup>2</sup>-Management mit einbezogen werden muss. Durch die Nutzung von computergestützten Methoden (Künstliche Intelligenz, Machine Learning) können Prozesse besser verstanden werden, die die Ertragsentwicklung von PV-Anlagen beeinflussen.

Sinkende Modulpreise führen dazu, dass die Kosten für Systemkomponenten eine immer wichtigere Rolle einnehmen, weiterhin werden für die Integration in Netze mit 100 Prozent Anteil erneuerbarer Energien Funktionalitätserweiterungen nötig. Ziel ist daher eine Kostenhalbierung in Gerät und System, um die Spitzenposition der deutschen Industrie im Bereich der Systemtechnik zu sichern. Erreicht werden soll dies durch technologische Innovationen, insbesondere durch neue Materialien, Methoden, Betriebsweisen und Digitalisierung sowie neue Ansätze zur Systemintegration, Sektorenkopplung und PV-Direkt-Kopplung.

Die deutsche Forschungslandschaft ist durch langjährige kontinuierliche Förderung in der Lage, den Bedarf der Industrieunternehmen zu bedienen. Notwendig hierfür bleibt auch in Zukunft eine angemessene Förderung von Themen mit niedrigerem TRL.

Eine Sonderstellung im Konsultationsprozess nehmen die Arbeitsgruppen der AG Begleitforschung ein. Diese haben jeweils zu einem bestimmten Thema Thesenpapiere veröffentlicht, deren Ergebnisse nun erstmals in den Konsultationsprozess einfließen.

Die AG „Sozio-Ökonomische Betrachtungen und Analysen, Partizipation und Akzeptanz“ stellt dar, dass neben der betriebswirtschaftlichen Verwertung auch die volkswirtschaftliche Verwertung in die Bewertung von Projektanträgen einfließen sollte.

Ergänzend zur Forschung zu den technischen Notwendigkeiten, die sich aus einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien ergeben, betrachtet die AG „Absicherung der Stromversorgung aus PV und Geschäftsmodelle“ den organisatorischen und regulatorischen Rahmen für einen stabilen und energiewirtschaftlich effizienten Betrieb.

Die AG „Agri-Photovoltaik“ spricht verschiedene regulatorische Themen an, wie die Konsequenzen aus doppelter Flächennutzung oder die Konkurrenz zu Freiflächen-PV-Anlagen.

---

<sup>1</sup> xPV Sammelbegriff für integrierte Konzepte wie BIPV, VIPV, FPV, APV

<sup>2</sup> End of Life

## 2. ERGEBNISÜBERSICHTEN

### 2.1. ARBEITSGRUPPE 1+2: KRISTALLINES SILIZIUM

Zusammenfassung aus dem Konsultationsprozess durch Rolf Brendel (Mentor PV-AG2), Ralf Preu (Mentor PV-AG1) sowie durch die Industrievertreter Holger Kühnlein, Jutta Trube, Gunter Erfurt und Bianca Lim. Die Eingaben aus dem Netzwerk sind entsprechend den Fragestellungen sortiert und mit Beispielen (in blau) hinterlegt. Im Bereich der Verwertung zeigen diese exemplarisch auf, dass zahlreiche Unternehmen basierend auf einer geförderten Photovoltaik-Technologieentwicklung einen substantiellen Wertschöpfungshebel in Deutschland erzeugen und erzeugen werden.

AG 1+2	Themen für konkrete industrielle Verwertungen	wissenschaftliche Themen
<p>Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 5 Jahre:</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Produktionstechnologie und Materialien für aktuell verwertete Einzelprozesse hinsichtlich Verbesserung von Capex, Opex, Durchsatz, Waferformate (deutlich größer und dünner), Ausbeute, CO<sub>2</sub>-Footprint und Umweltauswirkungen von: Beschichtung, Metallisierung (weniger Ag), Reinigung, Ätzprozesse, Hochtemperaturprozesse, (Epi&amp;Direkt)-Wafer, Stringer, Lamination, Automatisierung, Reallabore für Maschinen- und Produktvaluation (TRL6-7)</li> <li>2. Europäische Herstellung von Zellen und Modulen für niedrigste Stromgestehungskosten: Gesamtprozessoptimierung für die groß-skalige Herstellung und Charakterisierung von Si-Materialien, Solarzellen und Module für heutige Investoren. HJT, passivierende poly-Si Kontakte, IBC, Verbesserung CTM, längere Lebensdauer, Materialeinsparung, Recycling / Kreislaufwirtschaft</li> <li>3. Produktentwicklung für integrierte Photovoltaik (XPV)-Produkte mit weitestgehend bekanntem Zusatznutzen: gebäudeintegrierte Photovoltaik, Fabrik-Parkplätze, Floating-PV, fahrzeugintegrierte PV, andere angepasste PV-Produkte (Formate, Formen), XPV-optimierte Solarzellen und Module</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>7. Neue Materialien und Prozesse sowie substantielle Reduktion des Materialeinsatzes: Reduktion/Ersatz von Ag, InBi/ insbesondere Pb, weniger Silicium insbesondere dünnere/größere Wafer, TMO, Perowskit-Abscheidung, Stabilität, Schichtstrukturierung, Nutzung von Digitaltechnik</li> <li>8. Gesamtprozessentwicklung und Demonstration in Reallaboren für kostengünstige und stabile Solarzellen und Module mit selektiven Kontakten (HJT, POLO, TOPCon, Zebra) für zukünftige Investoren. Si-Single-Junction-Zellen mit <math>\eta &gt; 25\%</math> und Modulkosten &lt; PERC+Modulen, großflächige Mehrfachjunctions mit Wirkungsgraden über 30 %, digital unterstützte Optimierung, Light-Soaking, 20 % längere Lebensdauer und kleinere Degradation, 95 % der Ausgangsleistung nach 30 Jahren.</li> <li>9. Labordemonstration neuer XPV-Produkte mit Zusatzfunktionen: BIPV, VIPV, APV, Entwicklung von innovativen Fertigungsprozessen, Zuverlässigkeitssicherung durch Analysen und Modellierung, Bifazialität, Digitale Optimierung (z. B. BIM)</li> </ol>

AG 1+2	Themen für konkrete industrielle Verwertungen	wissenschaftliche Themen
<p>Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 10 Jahre</p>	<p>4. Produktionstechnologie für die neuen Einzelprozesse und Materialien aus 7. bei deutlich gestiegenen Anforderungen: Poly-Si, TMO, PECVD, PVD, ortsselektive Prozesse, Durchsatzfaktor 2 bis 4 bei größerer Waferfläche, 50 % weniger nicht rezykliertes Material</p> <p>5. Industrielle Umsetzung neuer Solarzellen- und Modulproduktionstechniken für die EU: Konzeptentwicklung für Fertigungslinien, Pilotlinien/Reallabore (auch für Tandemzellen), Charakterisierung der Fertigungsprozesse und der Produkte</p> <p>6. Industrielle Vorbereitung neuer XPV-Produkte mit zusätzlichen Funktionalitäten: Kostengünstige mittelskalige und hochadaptive Produktion, Sensoren, neue Prozesse, innovative Charakterisierungstechniken, Industrie 4.0</p>	<p>10. Neue Materialien und Prozesse für Tandem- und Tripelzellen auf Silicium: Abscheidung Perowskit, Loch- und Elektronenleiter, SAM, Abscheidung selektiver Kontakte, Materialforschung für alternative direkte Halbleiter mit sehr hoher Absorption, Nicht-Toxizität, Stabilität, Verständnis von Degradationsmechanismen, digitale Optimierung</p> <p>11. Gesamtprozessentwicklung für kostengünstige großformatige Tandem- und Tripelzellen und -module: c-Si und Perowskit, c-Si und III/V, Integration neuer Materialien und Prozesse, Wirkungsgrade über 33 %, 30 Jahre Modullebensdauer, Recycling/Kreislaufwirtschaft</p> <p>12. (X)PV-Module mit Tandemzellen und Tripelzellen: Verständnis von Degradationsmechanismen, 2Terminal-, 3T- oder 4T- Konfiguration, Entwicklung angepasster Bill of Materials, Verschaltung und Elektronik</p>
<p>Wirtschaftliches Potenzial und industrielle Verwertung</p>	<p>1.+4. Verwertung durch den Maschinenbau und Materialhersteller (1. sofort, 4. mittelfristig) z. B. Aixtron, centrotherm, F-Solar, h.a.l.m., HighLine Technology, KOENEN, Krempel, NexWafe, RENA, Singulus, von Ardenne, Wacker, WAVELABS</p> <p>2.+3. Sofortige Verwertung durch aktuelle Produzenten und deren Finanz-Investoren: z. B. Meyer Burger, OxfordPV, Solarwatt, Heckert sowie Verwertung durch Fabrik-Anbieter und Technologieanbieter: exyte, RCT</p> <p>5. Verwertung durch zukünftige strategische Investoren, in Zell- und Modulherstellung z.B. Europäische Energieversorger und Systementwickler, welche sichere Modulversorgung benötigen, AstraSun, Aurinka, Enel, EnPV, GigaPV, SolarNord, Solitek, SveaSolar, ValisSolaris, Valoe, 1KOMMA5°</p> <p>6. Verwertung durch Hersteller von Produkten, die heute noch keine PV integriert haben Fassadenhersteller, Autohersteller bzw. Fahrzeug-Zulieferindustrie, z. B. Webasto, Landwirte, diverser Mittelstand</p>	<p>7.-12. Die wissenschaftlichen Ergebnisse bilden(e)n eine notwendige Voraussetzung für die wirtschaftliche Umsetzung und sind für das In- und Ausland eine Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende.</p> <p>Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden von Deutschland auch zur Profilierung als Hightech-Standort für eine Technologie von weltweit zentraler Bedeutung.</p>

AG 1+2	Themen für konkrete industrielle Verwertungen	wissenschaftliche Themen
<p>Einordnung der Entwicklungen im europäischen / internationalen Kontext – Alleinstellungsmerkmale</p>	<p>1.+4. Maschinenbau ist Innovationstreiber für technologisch erfolgreichen Status Quo und zukünftige Technologien: z. B. <a href="#">centrotherm</a>, <a href="#">RENA</a>, <a href="#">von Ardenne</a>, <a href="#">Meyer Burger</a>, <a href="#">Singulus</a>, <a href="#">ASYS</a>, <a href="#">Jonas+Redmann</a>, <a href="#">h.a.l.m.</a>, <a href="#">HighLine Technology</a>, <a href="#">Aixtron</a> Innovation bei Si-Materialherstellung: <a href="#">Wacker (Koppelprodukte)</a>, <a href="#">NexWafe</a> ist erster Akteur für CO2-arme sägeverlustfreie Si-Wafer</p> <p>2. Die Zellproduktion durch einen originären Maschinenbauer (<a href="#">Meyer Burger</a>) ist ein Alleinstellungsmerkmal. <a href="#">OxfordPV</a> erster Akteur für Si-Pk Tandems.</p> <p>2.+5. Eigene PV-Wafer-, Zell- und Modulhersteller sind für die Energie- und Technologieunabhängigkeit der EU wichtig und am Entstehen.</p> <p>3.+6. Integration spart Fläche und erhöht Akzeptanz der Energiewende, Integration schafft lokale Wertschöpfung.</p>	<p>7. + 10: Mit neuen Schichten und Ansätzen hat unsere Wissenschaft die PV weltweit wesentlich vorangebracht, z.B. <a href="#">SiNx</a>, <a href="#">AlOx</a>, <a href="#">Poly-Si</a>, <a href="#">Laserprozesse</a>, <a href="#">Druckpasten</a>, <a href="#">Regenerationsprozesse</a>.</p> <p>8.+11. Unsere Forschung lieferte internationale Rekorde, welche die weltweite Technologieentwicklung stark beeinflussten. Derzeitig: 35,9% <a href="#">c-Si-2xIII-V (ISE)</a> 32,5% <a href="#">c-Si-Pk Tandem (HZB)</a> 26,1% <a href="#">p-Typ c-Si (ISFH)</a> 26,0% <a href="#">c-Si beids. kontaktiert (ISE)</a></p> <p>9.+12. Der Bereich XPV bietet sehr großes Potential für Wertschöpfung im Mittelstand</p>
<p>Einfluss der Entwicklungen auf den Fertigungsstandort Deutschland</p>	<p>Durch die festgeschriebenen Ausbauziele der Bundesregierung und der EU gibt es eine zunehmende Sicherheit hinsichtlich Markt und Produktionsförderung. Der Net Zero Industry Plan der EC strebt an, dass die Produktionskapazität für strategisch wichtige CO<sub>2</sub>-neutrale Technologien bis 2030 auf mindestens annähernd 40 Prozent des Bedarfs der Union gesteigert wird. Bis 2030 wird ein Weltmarkt von 1 TW/Jahr für PV-Systeme und damit auch PV-Module erwartet. Davon 10 % Weltmarkt aus EU brächte 20 Mrd. €/a Umsatz allein für die Module sowie geschätzte 100.000 hochqualifizierte Arbeitsplätze. Die Produktion in Europa erzeugt weniger CO<sub>2</sub> als die Produktion an CN-Fertigungsstandorten.</p>	<p>Der wachsende Markt hat bereits eine Vielzahl neuer Investoren und VC hervorgebracht. Diese fordern für den Einstieg eine ausreichend breite Angebotspalette für innovative Produkte und Komplettprozesse, mit denen Differenzierung möglich ist, sowie eine klare Roadmap in Richtung Kostensenkung für hohe Effizienzen auch jenseits der Single-Junction-Technologie. Die F&amp;E-Ergebnisse der c-Si-PV aus 7.-9. sichern die kostengünstige Stromversorgung der Industrie von morgen und 10.-12. von übermorgen.</p>



## 2.2. ARBEITSGRUPPE 3: ALTERNATIVE KONZEPTE UND MATERIALIEN

### Kurzfassung: Zukünftige Ausrichtung der Forschung und Entwicklung<sup>3</sup>

Grundsätzlich muss sich die Entwicklung auch am Bedarf der Industrie orientieren. Dabei werden die Forschungsarbeiten der Industrie durch die Arbeiten der Forschungsinstitute unterstützt, die sich auch um langfristige Potenziale und Konzepte kümmern müssen. Neben der industrienahen Forschung muss in den Instituten auch Forschung auf TRL 1 bis TRL 4 für neue Materialien und Konzepte ermöglicht werden, zum Beispiel auch bleifreie Perowskite und unterschiedliche Verbindungshalbleiter.

Die Erfahrungen der Corona-Pandemie und die jüngsten geopolitischen Veränderungen haben die Dringlichkeit **heimischer PV-Produktionskapazitäten** sowie die Reflexion **internationaler Kooperationen** verdeutlicht. Die Kooperationsmöglichkeiten innerhalb europäischer Verbundforschung ist dabei ein Alleinstellungsmerkmal, welches weiterhin politisch und strategisch unterstützt werden muss. Der zügige Aufbau von PV-Produktionen in Europa ist essenziell. Allerdings wird sich die Welt bei der Versorgung mit wichtigen Komponenten für die Solarmodulproduktion bis 2025 fast vollständig auf China verlassen müssen. Deswegen muss die Strategie mit und nicht ohne China gemacht werden. Kostengünstiger und grüner Strom ist der Schlüssel für die Wettbewerbsfähigkeit in der PV-Wertschöpfungskette. Deshalb sind Technologien mit niedrigem (elektrischen) Energiebedarf mittel und langfristig wichtig. Dünnschichttechnik hat hier bei vergleichbaren Wirkungsgraden Vorteile. Ebenso müssen die bestehenden Technologien in Richtung energieeffizienter Produktion entwickelt werden. Die Anbindung von PV-Produktion an „low carbon“ Industriecluster (auch mit grünem H<sub>2</sub>) kann Vorteile von Skaleneffekten erschließen. Dies betrifft alle Produktionsmittel und Materialien sowie geschlossene Stoffkreisläufe. China hat in den vergangenen Jahren im einst von Europa, den USA und Japan dominierten Markt des **Anlagen- und Maschinenbaus** stark aufgeholt. Beim Equipment (Dünnschichtverfahren) für alternative Konzepte und Materialien (Perowskite, CIGS, CdTe, OPV, III/V) hat Deutschland jedoch weiterhin ein Alleinstellungsmerkmal, welches strategisch unterstützt und genutzt werden muss.

---

<sup>3</sup> Auf EU-Ebene wurde im Jahr 2021 die richtungsweisende [Strategic Research and Innovation Agenda on Photovoltaics](https://etip-pv.eu/publications/sria-pv/) (SRIA, <https://etip-pv.eu/publications/sria-pv/>) erstellt, welche detaillierte Empfehlungen für Forschungsaktivitäten im Themenfeld Photovoltaik aufzeigt. Die Ziele und Empfehlungen der AG3 sind in Übereinstimmung mit der SRIA und adressieren hier insbesondere die „Challenge 1: Performance enhancement and cost reduction“ und darin das „Objective 1: PV modules with higher efficiencies and lower costs“.

Entwicklungsthemen für die kurz-, mittel- und langfristige Wettbewerbsfähigkeit sind:

- › **Produktivität** (Durchsatz, Ausbeute) und **Produktqualität** (Wirkungsgrad und Stabilität) im Umfeld von relevanten Pilotlinien. Hierfür müssen vor allem die Maschinenbauer zusammen mit kompetenten Produzenten mindestens im Pilotmaßstab agieren. Ziel ist die Etablierung von wettbewerbsfähigen Produktionslinien bis in den Gigawatt-Maßstab.
- › Verstärkte Berücksichtigung der **Nachhaltigkeit der Technologien aus Lebenszyklusanalysen: Umweltverträglichkeit, Ressourcenverfügbarkeit, Recyclingfähigkeit, Energiebilanz**

PV muss in Zukunft überall installiert werden, wo dies möglich ist. **Flexible und leichtgewichtige Solarmodule** können hier die Flächenkulisse deutlich erweitern. Zusätzlich erfolgt eine teilweise Auflösung von Flächenkonflikten und Akzeptanzthemen durch Integration („Photovoltaic everywhere“).

AG 3

Themen für konkrete industrielle Verwertungen

wissenschaftliche Themen

Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 5 Jahre:

- › Entwicklung von Produktionsequipment für hohen Durchsatz, große Fläche und gute Ausbeute, incl. Qualitätssicherung bei der Prozessierung zur Erreichung von geringem CAPEX (Investition in große Produktionslinien)
  - › Produktionsprozesse für „MassCustomization“ z.B. für die integrierte PV, insbesondere BIPV
  - › Realisierung von Charakterisierungslösungen als Inline-Prozesskontrolle (closed-loop), incl. Digitalisierung der Herstellungsprozesse auch mittels künstlicher Intelligenz
  - › Übertragung von industriellen Dünnschichtverfahren aus CIGS und CdTe auf Perowskite, um kostengünstige Tandemzellen zu ermöglichen
  - › Aufbau deutscher/europäischer Produktionsstandorte mit einer GW-Perspektive
- › Umweltverträgliche und ressourcenschonende Materialien und Herstellungsprozesse, Fokus auf Energieverbrauch in allen Prozessschritten
- › Bereitstellung des gesamten Materialflusses zur Produktion von PV-Modulen

Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 10 Jahre:

- Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit auf dem Weltmarkt
- › Umsetzung von Industrie4.0 und Digitalisierung sowie künstlicher Intelligenz: Materialentwicklung vorantreiben, Herstellungsprozesse und Logistik optimieren und automatisieren, Qualitätssicherung garantieren sowie eine vollautomatisierte Fertigung mit leistungsfähiger inline-Analytik entwickeln
  - › Unabhängigkeit bei der kompletten Lieferkette, einschließlich aller Materialien (wie z.B. Solarglas, Kunststoffe, etc.)
  - › Lokale Wertschöpfung um die Entwicklungen voranzutreiben: Kosteneffiziente, stabile und hocheffiziente Perowskit- und Tandemzellen mit Wirkungsgraden deutlich über 30 % im GW Maßstab

- › Steigerung der Laborwirkungsgrade bei allen Dünnschichttechnologien (Perowskite, CIGS, CdTe, OPV, III-V) vor allem bei der Skalierung der Fläche und industriekompatiblen Prozessen
  - › Steigerung der Zellwirkungsgrade über 25 % für CIGS und CdTe mit skalierbaren Verfahren, neue Konzepte zur Verschaltung und Versiegelung
  - › Für Perowskite und OPV mit Laborwirkungsgraden bis 27 % und 24 %: Nachweis der Hochskalierbarkeit in der Fläche
  - › Bifazialität
- › Realisierung von Tandemkonzepten (2- und 3-fach Solarzellen) mit Wirkungsgraden bis 35 %
  - › Tandemzellen mit Silizium als Unterzelle
  - › Tandemzellen auf Dünnschichtbasis
- › Materialentwicklung und Materialforschung
  - › Entwicklung von OPV und Perowskit-Materialien, Bauelementarchitekturen und Solarmodul-Konzepten mit wettbewerbsfähiger Stabilität (min. 25 Jahre).
  - › Hochdurchsatz-Materialforschung unter Nutzung von Datenbank & KI-Technologien) zur Identifikation der aussichtsreichsten Perowskit-Materialien.
  - › Wirkungsgrad/stabilitätsneutrale bleifreie Perowskite
  - › Verwendung umweltfreundlicher Halbleiter aus nachhaltigen Ressourcen mit unbedenklicher Entsorgung oder problemlosem Recycling.

- › Entwicklung von neuen Materialien, Bauelementarchitekturen und Solarmodul-Konzepten mit hoher Stabilität für verschiedene Anwendungen (min. 30 Jahre). Begleitende indoor und outdoor Forschung zu Stabilitätsthemen, Anpassung der beschleunigten Alterungsverfahren und der Normung
- › Entwicklung von Modifikationen und weiteren PV-Technologien für Wirkungsgrade > 35 %

AG 3

Themen für konkrete industrielle Verwertungen

wissenschaftliche Themen

Wirtschaftliches Potenzial und  
industrielle Verwertung

- › Aktuell und fortlaufend: Bestehende und neue PV-Firmen stärken und erhalten
    - › Verwertung direkt (Modulverkauf) und indirekt (Knowhow-Entwicklung mit Maschinenbauern, Komponenten- und Materiallieferanten sowie in Richtung Systemintegration)
      - › deutsche Anlagenhersteller für alle Prozessschritte mit hoher technologischer Schwelle
      - › Automatisierer
      - › Messsystem-Hersteller
    - › Verwertung durch Verkauf von Maschinen, Engineering und Dienstleistungen zur Fabrikintegration, Wartung und Service
    - › Hersteller von high-tech Prozesskomponenten wie Beschichtungsquellen, Spezialmaterialien, Heizern, Pumpen etc.
    - › Verwertung durch Verkauf von Komponenten und Engineering
  
  - › Aktuell und stark wachsend in den kommenden fünf Jahren: Neue Produkte und Märkte der Dünnschicht PV (IoT-Anwendungen, mobile Energiebereitstellung)
    - › Bauindustrie und Architekturbüros (Anwendung BIPV)
    - › Mobilitätssektor
    - › Consumer-Markt
  
  - › Aktuell und sehr hohes Potenzial nach fünf Jahren und mehr  
Generelles Ziel: neue deutsche/europäische PV-Produktionsstandorte etablieren: Tandemzellen auf Dünnschichtbasis oder auch in Kombination mit Silizium Verwertung startet bereits  
Kommerzielle Verwerter kommen aus unterschiedlichen Branchen:
    - › Maschinenbau inkl. Komponentenhersteller
    - › IT Firmen für KI
    - › Materiallieferanten
    - › PV-Branche (entlang der gesamten Wertschöpfungskette)
    - › Energiewirtschaft
-

AG 3	Themen für konkrete industrielle Verwertungen	wissenschaftliche Themen
<p>Einordnung der Entwicklungen im europäischen/ internationalen Kontext - Alleinstellungsmerkmale</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Deutsche Anlagenhersteller derzeit im Bereich der Dünnschicht PV (CIGS, CdTe, III-V-Konzentrator) führend, sie können industrietaugliche und kostengünstige Dünnschichtprozesse weiterentwickeln und auf neue Absorbermaterialien und Bauelementstrukturen (Perowskite, OPV, Bifazialität) übertragen.</li> <li>› Alleinstellungsmerkmale beim Anlagenbau: Langjährige Erfahrung im Dünnschichtbereich, Synergien mit Displaytechnik, Nasschemischen Verfahren oder Glasveredelung nutzen, hohe Technologieschwelle und Eigenentwicklungen von prozessrelevanten Komponenten; gutes Netzwerk mit Zellherstellern, Instituten und Material- und Komponentenlieferanten</li> <li>› Erste Pilotlinie zur Perowskit-Tandem-PV entsteht in Brandenburg (Oxford PV). Weitere Firmen zeigen aktuell Interesse an einem Einstieg in die Tandemtechnologie.</li> <li>› Gut positionierte Hersteller aus der Organischen Photovoltaik existieren in Deutschland (Heliatek, ARMOR, Enerthing).</li> <li>› Insbesondere im Bereich BIPV ist eine lokale europäische Wertschöpfung möglich, da nur kleine Losgrößen gefertigt werden, diese aber schnell zum Anwender kommen müssen. Es gilt also dieses Marktsegment für urbane Siedlungsstrukturen mit begrenzten Landflächen und direkter lokaler Möglichkeit zur Sektorenkopplung weiter zu entwickeln.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Im Forschungsbereich Dünnschichttechnologien ist Deutschland nach wie vor exzellent. So stammen Weltrekordwirkungsgrade bei CIGS, III/V-Mehrfachsolarzellen und Perowskit-Tandem-Photovoltaik derzeit aus Deutschland.</li> <li>› Die Forschungsinfrastruktur ist in Deutschland mit den Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen (Fraunhofer, Helmholtz, Landesinstitute) hervorragend ausgestattet und muss weiter vernetzt und ausgebaut werden.</li> <li>› Innerhalb Europas gibt es eine gute Zusammenarbeit und Abstimmung, auch durch das europäische Förderprogramm.</li> <li>› International wird auf allen Kontinenten sehr intensiv an neuen PV-Technologien und Dünnschichttechnologien geforscht und Deutschland muss sich hier im Wettbewerb behaupten. Dazu ist auch ein internationaler Austausch von Forschungsergebnissen notwendig.</li> <li>› Ein Alleinstellungsmerkmal ist die langjährige Erfahrung und kontinuierliche Forschungsförderung in Deutschland. Die Kontinuität bei der Forschung ist hier entscheidend, um Know-How und Ressourcen kontinuierlich weiter zu entwickeln und auch zukünftig von Europa aus kommerziell zu verwerten.</li> <li>› Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist die gute Anbindung der anwendungsnahen Forschung an die Universitäten und Hochschulen über gemeinsame Berufungen. Die Unterstützung der Lehre durch industrieerfahrene Professoren und Dozenten einerseits und die Promotionsmöglichkeiten der Universitäten in den unterschiedlichen Fakultäten sorgen für eine exzellente wissenschaftliche Nachwuchsförderung. Hier könnten zusätzliche Programme helfen den Fachkräftemangel zu entschärfen.</li> </ul>

**AG 3**

**Themen für konkrete industrielle Verwertungen**

**wissenschaftliche Themen**

Einfluss der Entwicklungen  
auf den Fertigungsstandort  
Deutschland

- › Durch Einführung von Hocheffizienzprodukten z.B. Tandemsolarzellen und BIPV-Technologie besteht die Gelegenheit der Wiederansiedlung von PV-Produktionsstandorten in Deutschland/Europa
  - › Fast alle Anlagentechnik für Dünnschichtmodule kommt von deutschen Maschinenbauern; dies kann durch intensive Weiterentwicklungen abgesichert werden.
  - › Dünnschichttechniken sind nicht abhängig von den zurzeit und in den nächsten 5 bis 10 Jahren weiterhin bestehenden Abhängigkeiten insbesondere von Si Wafern.
  - › Die Transportkosten für Module nehmen einen immer größeren Anteil der Gesamtkosten einer PV-Anlage ein. Lokale Produktion wird zudem attraktiver, da die enge Zusammenarbeit von Maschinenbau und Produzenten beim time-to-market Aspekt unternehmerisch notwendig ist. Damit werden auch die Exportchancen deutscher Maschinenbauer ausgebaut.
  - › Der CO<sub>2</sub> Footprint von in Europa gefertigten Modulen ist deutlich geringer als der von in China gefertigten Modulen. Aspekte wie Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft spielen im Rahmen des europäischen Green Deals künftig eine größere Rolle. Hocheffizienzprodukte benötigen weniger Material. Der Anteil von sauberer elektrischer Energie für die Produktion wird für die Entscheidung für Produktionsstandorte mitentscheidend sein.
- › Die starke Forschungslandschaft mit den bestehenden und weiterzuentwickelnden Technologieplattformen in Deutschland ist attraktiv für neue Unternehmen (z.B. OxfordPV, NexWafe, Meyer-Burger, Tubesolar, Avancis).
- › Die neuen ehrgeizigen Klimaziele erfordern regionale PV-Produktion; diese ermöglicht schnellere Innovationszyklen bei Maschinenbau und Zulieferanten und umgekehrt. Insgesamt werden so Kosten gesenkt, Moduleffizienzen und Auswirkungen auf den Klimaschutz gesteigert und die Wettbewerbsfähigkeit von Deutschland und Europa gestärkt.
  - › BIPV: Bauprodukte erfordern in der Regel lokale Lösungen/Herstellung. Abhängigkeiten von globalen Lieferketten werden ersetzt durch Fertigung in D/EU.

## 2.3. ARBEITSGRUPPE 4: SYSTEME UND KOMPONENTEN

### Allgemeine Anmerkungen:

- › Die Expertenempfehlungen der AG PV-Systeme & Komponenten für das 7. Energieforschungsprogramm sind in ihrer wesentlichen Ausrichtung nach wie vor aktuell und gültig – jedoch kleine Akzentverschiebungen und Ergänzungen, wie in der Tabelle dargestellt.
- › Vertiefende fachliche Informationen zu den aktuellen Empfehlungen der AG PV-Systeme & Komponenten sind u.a. in den Workshop-Dokumentationen „Forschungsroadmap zur Digitalisierung in der Photovoltaik“ sowie „Systemdienstleistungen – stabile Stromversorgung durch PV- und Windenergie“ ausführlich dargestellt, deren Ergebnisse hier ebenfalls mit eingeflossen sind.
- › Die Energie-Systemtechnik ist eine Schlüsseltechnologie, in der Deutschland noch führend aber diese Position (vor allem aus China) gefährdet ist (insbesondere in der PV-Systemtechnik – ein großer Teil der weltweiten Wechselrichtertechnik und anderer systemtechnischer PV-Komponenten wird derzeit in Deutschland gefertigt): Diese Position gilt es, durch FuE abzusichern und weiter auszubauen.
- › Neue Systemlösungen & Kostenreduktion (siehe Tabelle) steigern PV-Stromerzeugung und eröffnen weltweite Alleinstellungsmerkmale und Exportmärkte für die deutsche Industrie (PV-Systemtechnik Weltmarkt mit zukünftig 10 Mrd. Euro/Jahr) – die Chancen sind insbesondere auch im industriepolitisch-technischen Kontext mit Sektorkopplung, E-Mobility, Elektrolyse und der Stärkung der deutschen elektrotechnischen Industrie insgesamt zu sehen.
- › Mit ganzheitlicher Energie-Systemtechnik Made in Germany kann Deutschland ein Zukunftsfeld besetzen – die PV ist dabei eine tragende Säule mit vielen technologischen Synergien.
- › Für den Erhalt der PV-Branche in Deutschland und ihrer Expertise spielt die kontinuierliche und agile Forschungsförderung eine unverzichtbare Rolle. Öffentlich geförderte Verbundprojekte helfen, das Know-How der Forschungsstandorte mit der Industrie zu bündeln.

Bei der Erstellung des Statements haben neben den Forschungsinstituten unter anderem die Unternehmen SMA, Infineon und Semikron aktiv mitgewirkt, welche alle in diesem Marktsegment ein großes Umsatzvolumen haben. Eine Aktualisierung erfolgte im März 2023.

### Resümee und Zusammenfassung der drei wichtigsten Forschungsbedarfe

Die Weiterentwicklung der PV-Systemtechnik im Hinblick auf:

- › Kostenhalbierung in Gerät und System,
- › Funktionalitätserweiterung für 100 % EE-Netze und resiliente sichere PV-Stromversorgung und
- › effizientere verträglichere Solargenerator-Integration in Landschaft und Gebäude

werden die deutsche Spitzenposition der PV-Systemtechnik auf dem Weltmarkt sichern, ausbauen und um neue Geschäftsfelder im Bereich vernetzte und anwendungsoptimierte PV-Systemlösungen erweitern.

Erreicht werden soll dies durch technologische Innovationen, insbesondere durch neue Materialien, Methoden, Betriebsweisen und Digitalisierung sowie neue Ansätze zur Systemintegration, Sektorenkopplung und PV-Direkt-Kopplung.

AG 4	Themen für konkrete industrielle Verwertungen	wissenschaftliche Themen
<p>Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 5 Jahre:</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Netzsystemdienstleistungen durch PV für 100 % EE Netze (grid forming, negative Momentanreserve etc.)</li> <li>2. Verbrauchsnahes Energiemanagement, Sektorkopplung und Prognose für optimale PV-Netz- &amp; -Marktintegration und Nutzerkomfort</li> <li>3. PV-Direktkopplung: applikations-optimierte Systemlösungen (DC-Netze für Fabriken, Ladeparks, H2-Elektrolyse, ...)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kostenreduktion der PV-Stromrichter und PV-Anlagen z. B. durch neue Materialien, hochfrequente Taktung und erweiterte Spannungsniveaus (Hochspannung &gt; 1500 V DC)</li> <li>2. Netzdienliches Verhalten von PV-Systemen durch zusätzliche Systemdienstleistungen Netzbildung und Momentanreserve auch in Kombination mit Lasten und neue Schutztechnik-Konzepte</li> <li>3. Modellierung und Bewertung des Einflusses von PV-Anlagen auf die Systemstabilität für die Netzsicherheitsrechnung online und offline)</li> <li>4. Resilienz durch und in PV-Systemen durch erhöhte Zuverlässigkeit von PV-Systemen und optimierte Wartungs- und Betriebskonzepte</li> </ol>
<p>Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 10 Jahre:</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Kostenhalbierung der PV-Systemtechnik durch neue Materialien, Methoden, Betriebsweisen und Digitalisierung (z.B. GaN, Magnetics, Reliability-Design, Predictive-Maintenance, Digitalisierung)</li> <li>5. Sichere PV-Stromversorgung: resiliente Systemlösungen, lokale unabhängige Energie und sichere IKT</li> <li>6. Umgebungs-Integration Solargenerator in Gebäude &amp; Landschaft für effizientere Flächennutzung und Akzeptanz</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. Kopplung bzw. Integration von PV-Systemen mit weiteren Energiesystemen wie z.B. Wasserstoff-Systemtechnik, DC-Netze (Industrie/Consumer), Ladeinfrastruktur, Gebäude, Agri-PV, schwimmende PV und PVT</li> <li>6. Digitalisierung und Standardisierung der PV-Systemtechnik als Treiber für Innovationen in verschiedenen Ebenen wie z.B. Anlagenbetrieb, Netzintegration und Stromhandel (Vernetzte Systeme, Digitale Zwillinge, künstliche Intelligenz)</li> <li>7. PV-Mittelspannungsanwendungen für großskalige und industrielle Anwendungen (z.B. im Untertage-Bergbau, Versorgung starker Antriebe ...)</li> </ol>
<p>Wirtschaftliches Potential und industrielle Verwertung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; In 5 Jahren werden alle großen neuen PV-Systeme Netzsystemdienstleistungs-Beiträge leisten müssen und 10 % netzbildende Wechselrichter im Netz sein (Verwerter: Systemtechnikhersteller)</li> <li>&gt; Direkt-gekoppelte PV-Elektrolyse-Anlagen und -E-Mobility-Ladeparks könnten bereits in 5-8 Jahren weltweit &gt; 10 GW/Jahr erreichen (1 Mrd. Euro Systemtechnik zzgl. Solarmodule und Anwendungstechnik)</li> <li>&gt; Kostenhalbierung der deutschen Wertschöpfungskette in 8-10 Jahren erlaubt den deutschen Systemtechnikherstellern inkl. ihren Zulieferern Steigerung ihres Welt-Marktanteils auf mehrere Mrd. €/Jahr (Gerätehersteller sowie Zulieferer und Dienstleister)</li> <li>&gt; bessere Lösungen für Energiemanagement, Sektorenkopplung &amp; Solargenerator-Integration in Gebäude &amp; Landschaft steigern</li> </ul>	<p>zu 1: Kostenreduzierung für den Wettbewerb im globalen PV-Markt ist notwendig. Verwertung durch Hersteller und Systemanbieter</p> <p>zu 2 und 3: Netzintegration des wachsenden PV-Anteils erfordert zusätzliche Funktionen der Systeme. Verwertung durch Gerätehersteller und Netzbetreiber</p> <p>zu 4: Resilienz der Stromversorgung kann durch PV-Systeme unterstützt werden. Einsparungen entstehen durch Vermeidung von Backup-Systemen, Vorratshaltung von Treibstoff, Netzausbau, Wartung.</p>



## AG 4

## Themen für konkrete industrielle Verwertungen

## wissenschaftliche Themen

	<p>PV-Verbreitung und Umsatz (in 5-10 Jahren; Verwerter: EPC &amp; Systemtechnikhersteller, Anbieter von Betriebsführungs- und Monitoringsystemen, Direktvermarkter)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>› Beitrag der PV für eine krisensichere Energieversorgung: neue Lösungen aus Deutschland finden in 3-8 Jahren generell Eingang in die Systemgestaltung (Verwerter: Systemtechnikhersteller, EPC &amp; Anlagenbetreiber)</li> </ul>	<p>zu 5: Technische Lösungen und Kostenreduktion für grünen Wasserstoff erhöht Wettbewerbsfähigkeit von Systemanbietern und Geräteherstellern im int. Zukunftsmarkt</p> <p>zu 6: Digitalisierung und Standardisierung sind Treiber für Innovation und Verwertung in unterschiedlichen Ebenen (Anlagenbetrieb, Netzbetrieb, Markt, Stromhandel, Smart-Home) (Verwertung: Gerätehersteller, Dienstleister)</p> <p>zu 7: Durch Materialeinsparungen und Effizienzgewinn in PV-MS Systemen können Kosten für industrielle Anwendungen weiter gesenkt werden. (Verwerter: Systemtechnikhersteller, Halbleiterhersteller, Materialzulieferer)</p>
Einordnung der Entwicklungen im europäischen/ internationalen Kontext - Alleinstellungsmerkmale	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Chance, hier für die deutschen Hersteller Alleinstellungsmerkmale zu entwickeln (Netzsystemdienstleistungen, Energiemanagement, PV-Direkt-Kopplung, sichere PV-Stromversorgung und Integrationslösungen) – schon jetzt sind deutsche Hersteller hier führende Vorreiter – sowie die Energieversorgung krisensicher zu machen und die PV-Verbreitung zu steigern</li> <li>› Technologische Innovationen im Gerät und im System erlauben es deutschen Herstellern im internationalen Preiswettbewerb standzuhalten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Die deutsche Forschung zur PV- Systemintegration sollte weiter Spitzenposition halten, um Hersteller dabei zu unterstützen Notwendigkeiten in der Anpassung der Gerätetechnik rechtzeitig zu erkennen und geeignet zu priorisieren.</li> <li>› Innovation in der Systemtechnik und zur stabilisierenden Netzintegration schafft Vertrauen bei Anlagenherstellern und Netzbetreibern. Erfahrungsgemäß werden seitens der Netzbetreiber international möglichst systemkonforme Anlagen gefordert.</li> </ul>
Einfluss der Entwicklungen auf den Fertigungsstandort Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> <li>› FuE-Ergebnisse werden in der deutschen Gerätefertigung vorhandene industrielle Arbeitsplätze sichern (insbesondere auch bei Zulieferern) sowie Zuwachs an neuen Arbeitsplätzen im System- &amp; Dienstleistungsbereich (Datendienste, O&amp;M) und für die PV-Direkt-Kopplung ermöglichen.</li> <li>› Sichere Energieversorgung für Fertigungsstätten in DE</li> <li>› sofern die o.g. FuE-Ziele erreicht werden, kann dadurch der PV-Ausbau beschleunigt und deutlich kostengünstiger und zukunftsfähiger umgesetzt werden</li> <li>› dezentrale, resiliente PV-Systemlösungen in DE können die entscheidende Säule für eine robuste, unabhängige Energieversorgung im Krisenfall sein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Die deutsche PV-Branche unterliegt einem sehr starken Preisdruck. Durch innovative Produkte und Lösungen als Ergebnis koordinierter Forschung kann der Fertigungsstandort Deutschland gestärkt werden u.a. auch durch die Qualifizierung von Personal für die deutsche PV-Industrie und ihre Fertigungsstätten.</li> </ul>
Einfluss auf die Umsetzung der Energiewende und die Energiesicherheit		<ul style="list-style-type: none"> <li>› Lösungen für sehr hohe Anteile von PV-Systemen im Verbundnetz ohne die Systemstabilität zu gefährden. Durch neue PV-Anlagen und System-Modelle muss der Einfluss der Photovoltaik-Einspeisung auf den Netzbetrieb orts- und wetterabhängig beurteilt werden können.</li> <li>› Ohne geeignete Integrationskonzepte in Fläche und Gebäude können die PV-Ausbauziele nicht erreicht werden.</li> </ul>

## 2.4. ARBEITSGRUPPE 5: ÖKONOMIE, METROLOGIE / CHARAKTERISIERUNG

Themenschwerpunkt: Neue Messtechniken /-methoden und Messgeräte für die gesamte Wertschöpfungskette, Digitalisierung

Exekutive Zusammenfassung

Die zentralen und übergreifenden Herausforderungen in der Metrologie lassen sich in folgende Kategorien aufteilen:

1. Um die Kostenziele für PV Anlagen langfristig zu gewährleisten, müssen Generationsprofil und die Kinetik der Alterung bekannt sein. Beide Größen hängen von Qualitätskontrollen (QC) bei der Materialherstellung und der Prozesskontrolle bei Zell- und Modulfertigung ab. Langfristig wird angestrebt, die Metrologie über alle Bereiche zusammenzuführen. QC Daten müssen aggregiert werden, um eine lückenlose Vorhersage auf der Freifläche zu gewährleisten. Zusätzliche Anstrengungen sind nötig, um von der gebräuchlichen Erfassung und Analyse des Ist-Zustandes hin zu einer prädiktiven Vorhersage zu gelangen.
2. Als vielversprechend zur Beschreibung verschiedener Prozesse wird der digitale Zwilling eingeschätzt. Der Entwicklungsaufwand für einen digitalen Zwilling, der die gesamte Wertschöpfungskette abbildet, ist enorm. Um die Entwicklung voranzutreiben, sollten Aufgaben über alle Arbeitsgruppen bei vorheriger Definition der Schnittstellen verteilt werden.
3. ML und KI basierte Methoden sind eine Schlüsseltechnik zur schnellen, kostengünstigen und zuverlässigen Bewertung von Charakterisierungsmethoden. Im Vordergrund stehen Verfahren, welche die Datenanalysen prädiktiv mit statistischen oder physikalischen Modellen erweitern. Insbesondere relevant ist hierbei die Auswahl der Messgrößen. Diese müssen sowohl aktive (Solarzellen) als auch passive (u.a. Polymere, Verpackungsmaterialien, Elektronik) Komponenten der Solaranlage abbilden. Von Interesse sind Methoden, die mit geringen Probengrößen auskommen. Das Potenzial der theoriegestützten Datenanalyse zur autonomen Prozess-/Produktionsoptimierung muss möglichst rasch besser verstanden werden und wird als wertvolle Methodik zur Entwicklung von digitalen Zwillingen gesehen.
4. Das Schicksal der Solarmodule am Lebensende (end of life) spielt eine wichtige Rolle in der ökonomischen Bewertung von Solaranlagen, welche langsam in den Fokus der Forschung rückt. Die Bewertung von Materialqualitäten aller Komponenten einer Solaranlage ist erheblich für den end-of-life Entscheidungsprozess, sowohl in Fragen des Recyclings, als auch für einen möglichen zweiten Lebensweg (Second life). Zu diesem Zweck müssen erweiterte und neue Charakterisierungsverfahren entwickelt und in den digitalen Zwilling integriert werden.

5. Ein wichtiger Aspekt der Labor- als auch Freiflächenmetrologie bleibt das Kosten- / Nutzenprinzip. Fortschrittlichen Metrologie- und Charakterisierungskonzepten steht der Imperativ eines wirtschaftlichen Mehrwertes gegenüber. Da Schäden auf der Freifläche teils erst nach Jahren auftreten, ist die Kausalität zwischen Kosten und Nutzen einer Messmethode nicht immer vermittelbar. Zusätzlich zur High End Messanalytik existiert ein Bedarf an robusten und maßgeschneiderten Verfahren, die spezifische Anforderungen präzise, zuverlässig und kostengünstig erfüllen und die die Fähigkeit haben, mitzulernen. Unterschiedliche Fragestellungen werden unterschiedliche Strategien benötigen, die insgesamt von einer größeren Bandbreite an Messmethoden profitieren und sowohl schnelle und kostengünstige Messungen als auch detaillierte und aufwendige Analysemethoden benötigen.

#### Metrologie im Labor

Zentrale Anliegen der Labormetrologie sind die Entwicklung und Weiterentwicklung von schnellen, zuverlässigen und kostengünstigen Mess- und Analysemethoden, die bereits bestehende Expertenmethoden ergänzen. Dies betrifft insbesondere neue Materialien (z.B. Perowskite), neue Zelltechnologien (z.B. multi-junction Zellen), neue Produktionsverfahren (z.B. IBC, TOPCon, HJ, Tandem) und innovative Modularchitekturen (VIPV / BIPV – gekrümmte oder irreguläre Oberflächen bei Verformung oder Additive Manufacturing Verfahren für die PV). In-situ Messverfahren sind bei der Prozessentwicklung und Prozesskontrolle relevant, nicht jedoch in der Laboranalytik. Da es sich hier oft um die Entwicklung von Messverfahren für aktuelle Materialien, Bauelemente und Prozesse handelt bzw. um die Weiterentwicklung und Verbesserung bestehender Messvorrichtungen, ist der Zeitfaktor besonders kritisch und der Wettbewerb erheblich. Die jeweiligen Messverfahren sollten idealerweise ab sofort zur Verfügung stehen um Arbeitsplätze zu sichern.

#### Metrologie in der Produktion

Um in der Prozessmetrologie wettbewerbsfähig zu bleiben, existieren drei Handlungsstränge, die parallel bearbeitet werden sollen. Zentrale Anliegen der Prozessmetrologie sind die Taktzeiterhöhung, die Messkostenreduzierung und die Erhaltung der führenden Marktstellung in der Charakterisierung. Die einzelnen Forschungsthemen sind die Weiterentwicklung bestehender Produkte, Industrie 4.0, KI, ML, Digital Twin, Fab Software für Zell – und Modulfertigung, sowie neue Messtechnologien und Analysemethoden für die Fertigung. Kontaktlosen in-situ Messverfahren und inline Auswertemethoden wird ein hohes Potenzial zur Erhöhung der Taktzahlen und zur Erniedrigung der Messkosten zugeschrieben und müssen mit datenbasierten Methoden ergänzt werden. Prädiktive analytische Verfahren in der Prozessentwicklung können den Entwicklungsaufwand drastisch reduzieren, indem sie Produktperformanceparameter anhand von Messungen in einem frühen Prozessschritt vorhersagen. Die Weiterentwicklung von Messverfahren muss rasch erfolgen, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

#### Metrologie in der Freifläche

Die Metrologie in der Freifläche steht unter dem größten Kostendruck, da Versagensmechanismen erst nach einigen Jahren auftreten. Ein systematisches Vorgehen zur lückenlosen Qualitätskontrolle von Freiflächenanlagen, oder gar Methoden zur prädiktiven Vorhersage des

Anlagenzustandes, existieren nicht. Notwendig wären Verfahren, welche die Vorhersage der Einspeiseleistung, die Bestimmung des Zustands des PV-Felds, die durchschnittliche Alterung, das prädiktive Auftreten von Versagensmechanismen einzelner Module / Strings erlauben. Zusätzlich werden Verfahren benötigt, welche in der Lage sind, Materialien und Materialverbünde eindeutig zu identifizieren sowie deren Zustand bewerten zu können. Weitere wesentliche Aspekte sind die Cybersecurity und die Sicherheit gegen Vandalismus, die für systemrelevante Technologien wie die PV unabdingbar werden. Essenziell für den Erfolg all dieser Methoden ist die Auswahl der bestmöglichen Datensätze. Die empfohlenen Handlungsweisen lassen sich in drei Gruppen aufteilen: i) in das Modul integrierte Analysekapazität, ii) Metrologie, Analyse, Modellierung und Zustandserfassung von PV Kraftwerken, iii) die technoökonomische Bewertung und den sicheren Anlagenbetrieb von PV Kraftwerken.

## AG 5

Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 5 Jahre:

A – Metrologie im Labor: Messtechnik / Analysemethoden werden für Multi-Junction Zellen/Module, neue Materialklassen (z.B. epitaktische Wafer, Perowskite) und deren Prozesskontrolle, sowie für die Prozesskontrolle neuer, sensitiverer Hocheffizienz-Zellkonzepte (z.B. PERC, TOPCon, Hetero-Junction, Multi-Junction) benötigt. Dies setzt zudem die Verfügbarkeit von Insitu-Messverfahren für eine Echtzeit-Prozesskontrolle voraus. Des Weiteren müssen Verfahren entwickelt werden, um die Leistung von Zellen und Modulen unter realen Betriebsbedingungen möglichst genau zu reproduzieren und schlussendlich vorherzusagen.

B – Metrologie in der Produktion: Der Erhöhung des Taktes bei gleichzeitiger Implementierung neuer Messmethodik sowie der Weiterentwicklung der Messtechnik (optisch und elektrisch) und Transportsysteme für die Anforderungen variabler Waferformate (bis M12 und darüber hinaus) und Zellgrößen (z.B. Homogenität über Fläche, Durchbiegung von Wafern) wird eine hohe Priorität eingeräumt. Kosten der Charakterisierungsmethoden müssen sinken, ihre Zuverlässigkeit erhöht werden. Verfahren müssen robuster sein, aber nicht over-engineered. Kostengünstige, robuste Messtechnik ist die Voraussetzung für einen breiteren Einsatz entlang der Prozesskette (Echtzeit-Prozesskontrolle) und damit eine Voraussetzung für die Verbreiterung der Datenbasis für maschinelles Lernen in der Produktion. Eine Herausforderung ist die automatische, quantitative Datenanalyse und -korrelation innerhalb bzw. über mehrere Wertschöpfungsstufen (Inter-Fab MES), ggf. mit Sensitivitäts- / Potentialanalyse. Eine weitere Herausforderung ist die Weiterentwicklung der Maschinenmodellierung, z.B. von Verschleißteilen zur KI-basierten, möglichst umfangreichen Implementierung einer Predictive Maintenance, die nicht mehr auf Zeitplänen, sondern auf dem aktuellen Anlagenzustand basiert.

C – Metrologie in der Freifläche: Die Entwicklung smarterer PV-Module mit integrierter elektrischer und chemischer Sensorik für verbesserte Leistungsprognose unter realen Bedingungen und basierend auf den aktuellen Zustandsdaten der Anlage kann rechtzeitig Hinweise für Veränderungen der Komponenten (Module) geben und somit frühzeitig auf Fehler aufmerksam machen. Dies ist auch wichtig um Reklamationsprozesse durchführen zu können und für damit zusammenhängende gerichtliche Auseinandersetzungen. Zudem wird eine lebensdauerrelevante Metrologie von Komponenten und Daten entlang der Wertschöpfungskette benötigt. Feldbetreiber sollen QC-Daten

## AG 5

der Zulieferer lückenlos abfragen können. Systematische Abstimmungen sind erforderlich bei der Mess- und Regeltechnik von PV-Anlagen in Bezug auf Netz-Abschaltungen und Netz-Regelungen. Aktuelle Vorgaben zu erfüllen, wird für Anlagenbetreiber immer teurer. Es besteht daher dringender Bedarf an Optimierung. Darüber hinaus müssen zusätzliche Verfahren zur Materialidentifizierung und Zustandsbewertung für alle Komponenten von Solarmodulen sowie weiteren Bauteilen von PV-Anlagen entwickelt werden.

Zahlen der Systemdegradationsanalyse des NREL aus einer 20+ GWp Analyse ergaben, dass der Median in der Systemdegradation 1%/a ist, der Durchschnitt der Systemdegradation ist 1,4%/a. Dies steht in Relation zu einer garantierten Leistungsdegradation für Module von weniger als 0,7%/a und der Annahme in finanziellen Vorhersagen einer Degradation von weniger als 0,5%. Bessere techno-ökonomische Modelle werden benötigt, um Handlungsempfehlungen abgeben zu können. Die effiziente Nutzung der Netzkapazitäten, etwa durch die Bundesregierung diesbezüglich vorgesehene Maßnahmen (Redispatch 2.0), benötigen eine möglichst genaue Einschätzung der zukünftigen Produktion aus PV-Anlagen. Hierzu ist die bestehende Technologie für genauere Prognosen auch unter Berücksichtigung von Speichermöglichkeiten weiterzuentwickeln.

## AG 5

A – Metrologie im Labor: Spezialisierte Messtechnik für VIPV / BIPV (gekrümmte Module, Licht/Schatten, sicherheitsrelevante Prüfverfahren) wird benötigt.

B – Metrologie in der Produktion: Die Entwicklung der KI-basierten Datenanalyse stellt eine der Kernherausforderungen dar. Datenmengen während der Produktion sollen automatisch nach Zusammenhängen, Korrelationen und Effekten analysiert werden (Data Mining von Messdaten, Bildanalyseverfahren). Hierzu werden Methoden zur schnellen Anpassung von erlernten Bewertungsmodellen (Transfer-Lernen, Few-Shot Lernen) benötigt. Zur Machine Learning- oder KI-basierten Datenanalyse bzw. Entwicklung statistischer Modelle und Verknüpfung mit physikalischen Modellen soll eine theoriegestützte Datenanalyse zur Prozess-/Produktionsoptimierung entwickelt werden. Langfristiges Ziel ist die Selbstoptimierung. Hierzu sollen insbesondere Digitale Zwillinge für Werkstücke, Prozesse und für die Produktion erstellt werden.

Ferner sollen eine an lokale Umweltbedingungen angepasste Produktion der Solarzellen (niedrigerer TK vs. angepasste EQE) sowie eine kundenspezifische Produktion der Zellen und Module vorangetrieben werden. Messtechnik muss hierzu begleitend entwickelt werden, um die relevanten Parameter inline charakterisieren bzw. dokumentieren zu können.

Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 10 Jahre:

C – Metrologie in der Freifläche: Unter diesen Themenkomplex fallen Metrologie, Analyse, Modellierung und die Zustandserfassung von PV-Kraftwerken und deren Beurteilung. Hierzu müssen Technologien entwickelt werden, um schnell, kostengünstig und modulgenau beurteilen zu können, wie der Zustand einer Anlage ist. Entwicklungsbedarf gibt es bei Hard- und Software, optischen Messmethoden und bei Datenstandards. Um Transferlernen von Ergebnissen gewährleisten zu können, sind langfristige Projekte für Feldbeobachtungen und Alterungsanalysen notwendig, die gemeinsam mit den geographischen, wetter- und klima-spezifischen Charakteristika von einer repräsentativen Ansammlung von Anlagen in eine Datenbank eingepflegt werden. Um Instandhaltung und Repowering ökonomisch vorteilhaft zu gestalten, bedarf es fortschrittlicher techno-ökonomischer Modelle. Für eine Beurteilung werden insbesondere Daten zur Degradation von Polymerkomponenten und elektrischen Bauteilen benötigt. Hier existiert Entwicklungsbedarf. Für einen sicheren Anlagenbetrieb ist eine stark verbesserte Cyber-Security von PV-Anlagen nötig. Dies beinhaltet Sicherheitstests existierender Anlagen und die Entwicklung von Abwehrmechanismen für mögliche Attacken.

Für ein technisch verbessertes sowie ökonomisch vorteilhaftes Recycling werden hochpräzise Methoden zur Materialsortierung und Zustandsbewertung dringend benötigt. In zehn Jahren wird eine erhebliche Anzahl jetzt installierter Module ihr Lebensende erreichen, so dass eine massentaugliche und günstige Technologie dann bereits zur Verfügung stehen muss.

## AG 5

Wirtschaftliches Potenzial und industrielle Verwertung	<p>Im Wesentlichen sind die genannten Technologien und Methoden im Stadium der Erforschung oder Entwicklung. Um diese bis 2030 in die Produktion überführt zu haben, bedarf es großer Anstrengungen, die sofort beginnen sollten und keinen Aufschub erlauben. Die Überführung neuer Technologien vom Prototyp zur Massenfertigung hat häufig Zeithorizonte von mehr als 10 Jahren. Digitale Methoden aus dem Bereich KI und ML werden benötigt, um diese Zeiträume zu verkürzen. Die Erstellung maßgeschneiderter Datensätze steht im Mittelpunkt dieser Anstrengungen.</p>
Einordnung der Entwicklungen im europäischen / internationalen Kontext – Alleinstellungsmerkmale	<p>Im Bereich der Weiterentwicklung bestehender Messgeräte zum Erhalt der führenden globalen Stellung ist eine Verwertung in den nächsten 5 Jahren erzielbar. Verwerter sind existierende deutsche Hersteller. Recycling stellt sowohl eine Herausforderung als auch eine ökonomische Chance für deutsche Unternehmen dar. Eine effiziente Materialsortierung wird über Meteorologie ermöglicht, und sie ist der Schlüssel zum ökonomischen Erfolg einer echten Kreislaufwirtschaft.</p>
Einfluss der Entwicklungen auf den Fertigungsstandort Deutschland	<p>Viele der genannten Entwicklungen, insbesondere solche, die lückenlose Daten aus integrierter Sensorik in der Wertschöpfungskette beinhalten, sind im produktiven Umfeld nicht vorhanden und wären ein Alleinstellungsmerkmal. Bei neuen Technologien steht der Wettbewerbsdruck chinesischer, amerikanischer oder anderer europäischer Hersteller oft im Vordergrund. Neue Technologien und Methoden sind unabdingbar, um existierende Vorteile zu erhalten oder auszubauen.</p>
	<p>Die Weiterentwicklung bestehender Produkte in allen Themen wird als wichtiger Schritt zum Erhalt und Ausbau von Arbeitsplätzen am Wirtschaftsstandort Deutschland gesehen. Zudem wird die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber ausländischen Produkten gestärkt. Einige Entwicklungen (etwa Cybersecurity) sind Nischenmärkte, die aber in Zukunft von großer Relevanz sein werden.</p>

---

## 2.5. ARBEITSGRUPPEN DER BEGLEITFORSCHUNG

Die 3 Themenpapiere zu PV Begleitforschung

- › Sozio-Ökonomische Betrachtungen und Analysen, Partizipation und Akzeptanz
- › Absicherung der Stromversorgung aus PV und Geschäftsmodelle, sowie
- › Agri-Photovoltaik

wurden im Januar 2022 im Forschungsnetzwerk veröffentlicht und sind hier zu finden:

[https://intern.forschungsnetzwerke-energie.de/gruppen/view/begleitforschung-photovoltaik.forum?0%5B\\_p%5D=show&0%5B\\_c%5D=t,78&0%5B\\_sk%5D=gruppen\\_forum.forum](https://intern.forschungsnetzwerke-energie.de/gruppen/view/begleitforschung-photovoltaik.forum?0%5B_p%5D=show&0%5B_c%5D=t,78&0%5B_sk%5D=gruppen_forum.forum)

Jedes der Themenpapiere enthält eine zweiseitige Kurzzusammenfassung und eine etwa 20-seitige kompakte Darstellung der Zusammenhänge, inklusive der daraus gezogenen Schlüsse für den Forschungs- und Handlungsbedarf im Themengebiet. Die Themenvorschläge für den Forschungsbedarf, die beschriebene ökonomische Wirkung und der Handlungsbedarf bezüglich Regulierung und politischer Rahmensetzung sind nach wie vor aktuell und haben an Dringlichkeit zugenommen. In der folgenden Tabelle werden die wesentlichen Punkte aus den jeweiligen Themenpapieren eingeordnet.

### 2.5.1. ARBEITSGRUPPE 6A: PV BEGLEITFORSCHUNG – THEMA SOZIO-ÖKONOMISCHE BETRACHTUNGEN UND ANALYSEN, PARTIZIPATION UND AKZEPTANZ

Photovoltaik und Windkraft sind die Hauptträger des zukünftigen Energiesystems; wobei der Strombedarf von derzeit 600 TWh nach bestem Kenntnisstand auf geschätzte 1017 TWh steigen wird, um die Dekarbonisierung der Sektoren Wärme und Verkehr zu unterstützen. Im Zielszenario tragen Photovoltaik und Windkraft rund 35 % bzw. 55 % zur direkten Stromversorgung in Deutschland bei. Dazu ist ein Aufwuchs der installierten Leistung an Photovoltaik von derzeit 54 GW<sub>p</sub> auf 355 bis 450 GW<sub>p</sub> notwendig – mit einem Investitionsvolumen von 240 bis 400 Mrd. €, je nach Anlagenmix. Soll das Zielszenario bis 2045 erreicht werden, so ist kurzfristig eine Verdreifachung der jährlichen Installationszahlen von derzeit 5 auf 15 GW<sub>p</sub> pro Jahr erforderlich. Aus den derzeit 2 Mio. dezentralen PV-Anlagen werden nach dieser Kalkulation bis 2045 rund 15 Mio. Anlagen. Mit einer entsprechenden Digitalisierung des Energiesystems (Smart Grid) sind die notwendigen Steuerungen von Erzeugern und Verbrauchern gut umsetzbar – es bestehen jedoch noch große Herausforderungen, um geeignete technische, regulatorische und organisatorische Rahmenbedingungen für einen stabilen sowie energiewirtschaftlich effizienten Betrieb bei hoher



Kundenakzeptanz zu schaffen. Hierzu werden in diesem Steckbrief das **Thema „Sozio- und techno-ökonomische Betrachtung und Analysen sowie die Themen Partizipation und Akzeptanz“** als ein wichtiger Schwerpunkt der PV-Begleitforschung vorgeschlagen.

Ziel der Begleitforschung ist es, die Stromgestehungskosten zu senken. Installation, Betriebsführung, Wartung und Finanzierung von Anlagen tragen mehr zu den Stromgestehungskosten bei als jede einzelne Komponente, auch das Modul. Darüber hinaus sind dies Tätigkeiten mit überwiegend nationaler Wertschöpfung und somit von doppelter Bedeutung für Deutschland als Wirtschaftsstandort sowie auch für die Energiewende im Allgemeinen.

Themen im sozio-techno-ökonomischen Umfeld werden benötigt, um einen nachhaltigen Beitrag der Photovoltaik zur Energiewende sicherzustellen. Im Nachfolgenden sind diese in wirtschaftliche, ökologische und soziale Aspekte gegliedert. All diese Themen zeichnen aus, dass Ansätze nicht nur für einzelne Unternehmen von Interesse sind, sondern dass sie industrieübergreifend und nicht-proprietär gelöst werden sollten, um den größtmöglichen Beitrag für die deutsche Industrie zu erzielen.

Der wirtschaftliche Vorteil der Begleitforschung liegt oftmals in der volkswirtschaftlichen und weniger in der betriebswirtschaftlichen Verwertung. Des Weiteren werden hier Forschungsprojekte benötigt, die eher industrieübergreifend, teilweise sogar mit Zusammenarbeit von konkurrierenden Unternehmen um branchenübergreifende Lösungen zu finden, den Energiestandort Deutschland fördern. Dies betrifft Aspekte der ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Nachhaltigkeit. Die Marktteilnehmer in diesem Bereich sind oftmals im KMU oder öffentlichen Bereich zu finden, so dass der wirtschaftliche Beitrag zu Forschungsprojekten geringer ausfällt als in Bereichen mit produzierenden Betrieben. Zum Erreichen der Energiewende sind die hier diskutierten Beiträge jedoch zwingend notwendig. Dies bedeutet in den Augen der Autoren dieses Papiers, dass die Bewertung von Forschungsprojekten auch nach volkswirtschaftlichen Kriterien geschehen sollte und auch geringere wirtschaftliche Beteiligung nicht notwendigerweise als Nachteil gesehen werden sollte, solange eine klare Verwertungsstrategie demonstriert werden kann.

Es wird auch angeregt, die notwendigen, interdisziplinären Grundlagen in einem gesonderten Programm beim BMBF zu erarbeiten, um einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten zu können.

AG 6A Ökonomie, Partizipation und Akzeptanz	Themen für konkrete industrielle Verwertungen	wissenschaftliche Themen
Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 5 Jahre:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sicherstellen des Flächenbedarfs</li> <li>2. Demonstration innovativer Installationsmethoden wie z.B. standardisierte BiPV, kostenreduzierte FPV oder APV (gesondertes Themenpapier)</li> <li>3. Risikobewertung von Technologien und Prozessen für erfolgreiche Installationen</li> <li>4. Integrierte Digitalisierung über die gesamte Wertschöpfungskette hinsichtlich Nachhaltigkeit und Zuverlässigkeit</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interdisziplinäre Forschung welche technologische, soziale, wirtschaftliche und ökologische Aspekte simultan bewertet.</li> <li>2. Tools für die Bewertung neuer Formen der PV</li> <li>3. Bewertung von Felddaten und wissenschaftliche Auswertung</li> <li>4. Entwicklung nutzbarer Datenstrukturen und Methoden künstlicher Intelligenz zur Förderung der Digitalisierung</li> </ol>
Hauptsächliche technische Herausforderungen / Fragestellungen für die PV-Branche für die nächsten 10 Jahre:	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. Identifikation sozialverträglicher Betriebsmethoden</li> <li>6. Bewertung im Bereich Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Ökologie</li> <li>7. Schließen der Lücke in Komponentenbewertung zu anderen Technologien</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. Entwicklung einer Material- und Prozessbasierten Garantiebewertung, welche eine Spezifikation anhand von Funktionalitäten erlaubt und den derzeitigen ,erfahrungsbasierten Ansatz ablöst.</li> <li>6. Entwicklung ökologisch und ökonomisch attraktiver Recyclingverfahren</li> </ol>
Wirtschaftliches Potenzial und industrielle Verwertung	<ul style="list-style-type: none"> <li>› <b>Reduktion der Energiegestehungskosten von in Deutschland installierten Systemen</b></li> <li>› Erhöhung des Flächenpotentials</li> <li>› Wareneingangskontrolle entlang der Wertschöpfungskette</li> <li>› Problemreduktion entlang der Wertschöpfungskette</li> <li>› Sektorübergreifende Reduktion der Qualitätskosten</li> <li>› Sektorübergreifende Reduktion der Betriebskosten</li> </ul> <p>Risikominimierung macht diese Branche für Investoren interessanter, was zu einer Beschleunigung der Entwicklungen im Allgemeinen führt.</p>	
Einordnung der Entwicklungen im europäischen / internationalen Kontext – Alleinstellungsmerkmale	<p>Entwicklung darf kein nationaler Alleingang sein, benötigt zur Risikominimierung alle Marktteilnehmer Dies unterstützt Installateure, Betreiber, Finanzierer und Versicherungen, in diese Branche zu investieren.</p>	
Einfluss der Entwicklungen auf den Fertigungsstandort Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Unterstützung der Qualität von Produkten ‚made in Germany‘</li> <li>› Reduktion von Installationsprodukten</li> <li>› Positive Grundeinstellung der Bevölkerung zu der Technologie</li> <li>› Verbesserte CO<sub>2</sub> Bilanz des Sektors</li> </ul> <p>Erhöhung der Attraktivität des Energiestandortes Deutschland</p>	

## 2.5.2. ARBEITSGRUPPE 6B PV BEGLEITFORSCHUNG – ABSICHERUNG STROMVERSORGUNG AUS PV UND GESCHÄFTSMODELLE

Im Zielszenario der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ stammen 35 % der Stromerzeugung in Deutschland aus Photovoltaik und 55 % aus Windenergie. Dazu ist ein Aufwuchs der installierten Leistung an Photovoltaik von derzeit 54 GWp auf 355 bis 450 GWp notwendig, mit einem Investitionsvolumen von 240 bis 400 Mrd. €, je nach Anlagenmix. Aus den derzeit 2 Mio. dezentralen PV Anlagen werden in 2045 rund 15 Mio. Anlagen. Mit einer entsprechenden Digitalisierung des Energiesystems sind die notwendigen Steuerungen von Erzeugern und Verbrauchern umsetzbar. Notwendige Forschung für den technischen Rahmen ist von der AG 4 „Komponenten und System“ adressiert.

Es bestehen jedoch darüber hinaus große Herausforderungen, um einen geeigneten regulatorischen und organisatorischen Rahmen für einen stabilen sowie energiewirtschaftlich effizienten Betrieb bei hoher Kundenakzeptanz zu schaffen. Komplex ist die Erarbeitung des neuen regulatorischen Rahmens, da sehr verschiedene Akteure auf dem Energiemarkt und im Netzbetrieb mitgenommen werden müssen, welche aus dem derzeitigen Rahmen in einen neuen Rahmen geführt werden müssen, bei dem sie wieder ihren Platz und ihre Geschäftsmodelle finden. Neben dem neuen Zielsystem muss ein Pfad erarbeitet werden, dieses Zielsystem zu erreichen.

Ein dezentral gespeistes Energiesystem mit hoch variablen Stromerzeugungskosten (je nach aktueller Verfügbarkeit von Solar und Windenergie bzw. alternativer Lieferung von zwischengespeicherter Energie über Batteriespeicher oder grünem Wasserstoff) kann nicht mit denselben finanziellen Instrumenten und demselben regulatorischen Rahmen aufgebaut und betrieben werden, wie ein System basierend auf zentralen Kraftwerken. PV-Begleitforschung eignet sich in besonderem Maße, um die Herausforderung zu benennen und entwickelte regulatorische Lösungswege auf ihre Eignung zu prüfen. Denn die Photovoltaik hat sich schon in der Vergangenheit als ein besonderer Kristallisationspunkt für Verwerfungen hervorgetan. Dies ist nicht zuletzt auf die Kleinteiligkeit und Dezentralität der Photovoltaik-Stromerzeugung, die häufig private, nicht institutionelle Finanzierung, die lokale Nutzung von Solarstrom und die unterschiedlichen Motivationen der Investoren zurückzuführen, was letztlich zu einer (teilweisen) Abspaltung vom Energiehandel und bestehenden Finanzierungsstrukturen der Energiewirtschaft (Netzentgelte) führt.

Schließlich gilt es, alle geeigneten Flächen für die Installation von Photovoltaikanlagen zu mobilisieren. Weitgehend ungenutzt sind bislang die Fassaden, obwohl allein im Neubau Fassadenflächen mit einem technischen Potenzial von rund 20 GWp pro Jahr entstehen. Es bedarf einer beherzten Anschubförderung für zum Beispiel 1.000 Fassaden pro Jahr bis 2030, ggf. zusätzlicher Baupflichten und einer intensiven, gut ausgestatteten Begleitforschung, die Hersteller von PV-Modulen und Montagesystemen, Hersteller von Fassadenmaterialien und -systemen, Forschungsinstitute für Modultechnologie & Bautechnik, das Deutsche Institut für Bautechnik, Architektenkammern, Planungsbüros und Energieberater zusammenführt. Es muss ein initialer Markt für die Entwicklung von technischen Lösungen bei genügend Volumen erzeugt werden, in dem Bauartzulassung und Standardisierung stattfinden kann und in dem die Bauwirtschaft und Architekten optimierte Abläufe für die Planung und Implementierung von Fassadenanlagen entwickeln.

Im Folgenden sind einige der oben genannten Themen stichpunktartig eingeordnet – soweit sie nicht die AG 4 „Komponenten und System“ betreffen

AG 6B Stromversorg. aus PV und Geschäfts- modelle	Themen für konkrete industrielle Verwertungen bzw. für die breite Anwendung der Photovoltaik	wissenschaftliche Themen
<p>Hauptsächliche technische, organisatorische und regulatorische Herausforderungen / Fragestellungen für die Anwendung der Photovoltaik für die nächsten 5 Jahre:</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. Bezahlmodelle und Finanzierungsoptionen</b> für hohe Bereitschaft von verschiedensten Akteuren zur Beteiligung am beschleunigten PV Ausbau stehen zur Verfügung.</li> <li>Verbesserung der Regulierung der BNetzA durch wissenschaftliches Begleitgremium (ähnlich wie bei AMEO, Australien – Integrated System Plan = roadmap for efficient development of the National Electricity Market) – siehe <a href="https://aemo.com.au/energy-systems/major-publications/integrated-system-plan-isp">https://aemo.com.au/energy-systems/major-publications/integrated-system-plan-isp</a></li> <li>Systematische Nutzung aller Potenziale (Dächer, Parkplätze, Freiflächen, Gewässer, Moore, Fassaden, ...) für den PV Ausbau</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. Erarbeitung angepasste Förderinstrumente / Bezahlmodelle / Vorschriften</b> für die systematische Nutzung aller Potenziale für PV-Ausbau. Insbesondere auch <b>Bezahlmodelle</b> entwickeln mit Kompensation der Kanibalisierung des Marktwerts von PV bei erhöhtem PV-Ausbau. Mehrwerte vorschlagen jenseits direkte Bezahlung für PV-Strom, etwa durch Anrechnung im Rahmen der EU-Taxonomie für Unternehmen, durch Verlässlichkeit der Stromkosten, etc. Für alle Märkte (beachte Akteursvielfalt ! Eigentümer, Mieter, Quartiere, PPAs ..) aufarbeiten und Lösungen erarbeiten.</li> <li><b>2. Erarbeitung eine Roadmap für den Nationalen Energiemarkt</b>, um den Ausbau der Erneuerbaren Energien voranzubringen, den Betreibern Verlässlichkeit bzgl. Ihrer Einnahmen zu bieten und Anlagen effizient ins Netz zu bringen ..... Begleiten der BNetzA mit einem langfristig finanzierten, stabilen wissenschaftlichen Gremium – welches die Interessen und technischen Herausforderungen (Netzbetrieb) der der Marktakteure moderiert bzw. einbezieht.</li> <li>Hersteller von PV-Modulen und Montagesystemen, Fassadenmaterialien und -systemen, Forschungsinstitute für Modultechnologie &amp; Bautechnik, das Deutsche Institut für Bautechnik, Architektenkammern, Planungsbüros und Energieberater zusammenführt, um Gebäudeintegrierte PV voranzubringen. Ebenso Spezialisten zusammenführen und Lösungen erarbeiten für die spezielle Freiflächensegmente, wie Gewässer, Moore (Wiedervernässung der Moore reduziert CO2-Ausstoß signifikant, Beschattung durch PV ermöglicht Wiederansiedlung von Moorpflanzen), Agri-PV, etc.</li> </ol>

AG 6B Stromversorg. aus PV und Geschäfts- modelle	Themen für konkrete industrielle Verwertungen bzw. für die breite Anwendung der Photovoltaik	wissenschaftliche Themen
<p>Hauptsächliche technische, organisatorische und regulatorische Herausforderungen / Fragestellungen für die Anwendung der Photovoltaik für die nächsten 10 Jahre:</p>	<p>4. Weitere Beschleunigung bzw. Verstetigung des PV Ausbaus auch unter dem Druck einer bereits hohen Installationsbasis; dadurch zunehmende Kopplung an Speicher und Flexibilität notwendig, um finanziell lohnende Routen zur Verwertung von temporärem / regional vorhandenem Überschuss an PV-Strom zu ermöglichen</p> <p>5. Planungssicherheit für die Umstellung von industriellen Prozessen auf Erneuerbare Energien</p> <p>6. ...</p>	<p>4 Finanziellen, regulatorischen und organisatorischen Rahmen schaffen für die Verwertung von zeitlich / regional entstehendem „Überschuss“ an PV-Strom.</p> <p>5. Regelmäßige Evaluation des Zielszenarios, des Fortschritts auf dem Weg zum Zielszenario und Nachjustierung – alle Themen von oben</p> <p>6. ...</p>
<p>Wirtschaftliches Potenzial und industrielle Verwertung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Der Ausbau von 400 GW an zusätzlichen PV-Anlagen über 20 Jahre (d.h. 20 GW pro Jahr) entsprechend den Plänen der Bundesregierung ergibt ein Investitionsvolumen von rund 12-20 Mrd. € pro Jahr (je nach Mischung aus PV-Anlagen auf Freiflächen, Aufdach, an den Fassaden, über Parkplätzen etc.) und erzeugt rund 120.000 Arbeitsplätze im Bereich Planung, Logistik und Aufbau. Weitere Arbeitsplätze werden geschaffen, wenn die Solarmodule und Wechselrichter regional hergestellt werden.</li> <li>› Konsequenter PV-Ausbau reduziert den Importbedarfe an treibhausgasneutral erzeugten chemischen Energieträgern und damit auch die Abhängigkeit von einer Verfügbarkeit großer Mengen an grünem Wasserstoff, die aufgrund einer fehlenden politischen und ökonomischen Stabilität in vielen potentiellen Herkunftsländern unsicher scheint.</li> </ul>	<p>Begründung liefern und volkswirtschaftlichen Nutzen quantifizieren für die notwendige Grundsatzentscheidung für einen schnellen PV-Ausbau</p> <p>Begründung liefern und volkswirtschaftlichen Nutzen quantifizieren für PV Modulproduktion in Deutschland und Europa.</p>
<p>Einordnung der Entwicklungen im europäischen / internationalen Kontext – Alleinstellungsmerkmale</p>	<p>Verfügbarkeit von nachhaltigem Strom</p>	<p>Mitarbeit in europäischen Gremien und ENTSOE mit dem Ziel einheitliche Regeln, Regulierung und Geschäftsmodelle zu erarbeiten. Lernen aus Ansätzen in anderen europäischen und außereuropäischen Ländern.</p>
<p>Einfluss der Entwicklungen auf den Fertigungsstandort Deutschland</p>	<p>Verfügbarkeit von nachhaltigem Strom wird zunehmend zum Wettbewerbsfaktor für alle Industrien, insbesondere energieintensiver, hoch-automatisierte Fertigung (Batterien, PV-Module, Chemieindustrie, ...).</p>	<p>Begründung liefern und volkswirtschaftlichen Nutzen quantifizieren für die notwendige Grundsatzentscheidung für einen schnellen PV-Ausbau und lokale Produktion von PV-Modulen.</p>

### 2.5.3. ARBEITSGRUPPE 6C PV BEGLEITFORSCHUNG – AGRI-PHOTOVOLTAIK

AG 6C: Agri-Photovoltaik	Themen für konkrete industrielle Verwertungen bzw. für die breite Anwendung der Photovoltaik	wissenschaftliche Themen
<p>Hauptsächliche technische, organisatorische und regulatorische Herausforderungen / Fragestellungen für die Anwendung der Photovoltaik für die nächsten 5 Jahre:</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wie kann mit den derzeit verfügbaren PV-Technologien das Design von Agri-PV-Anlagen hinsichtlich Kosten und PV- und Agrarerträge verbessert werden? Grundverständnis der Interaktion zwischen der PV-Technik mit dem Agrarsystem schaffen und Verschneidung agrar- und PV-technischer Ansätze. Zentral: Verfügbarkeit von Informationen und Daten.</li> <li>2. Optimierung der Unterkonstruktion v.a. für hoch aufgeständerte Agri-PV-Systeme hinsichtlich Kosten, CO2-Bilanz, Statik, bodenschonende Installation und Ästhetik.</li> <li>3. Intelligente Steuerung nachgeführter PV-Systemen zur Optimierung der Agrar- und PV-Erträge hinsichtlich Licht- und Wasserverfügbarkeit sowie eines optimierten Mikroklimas.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Besseres Verständnis hinsichtlich der Auswirkungen des Einsatzes verschiedener PV-Technologien auf das Mikroklima und damit auf den Ertrag und die Qualität verschiedener Kulturen und Sorten. Auswertung und Aufbereitung vorhandener Erfahrungen und Daten.</li> <li>2. Datengrundlage für Weiterentwicklungen schaffen: Digitales Monitoring Pflanzenwachstum und Vernetzung von Forschungsaktivitäten zu verschiedenen Kulturen und Klimazonen.</li> <li>3. Entwicklung neuer Zell- und Modultechnologien zur Beibehaltung oder Steigerung des landwirtschaftlichen Ertrags, z. B. durch spektralselektive Optimierung und Steigerung des Transparenzgrads organischer PV-Folien.</li> </ol>
<p>Hauptsächliche technische, organisatorische und regulatorische Herausforderungen / Fragestellungen für die Anwendung der Photovoltaik für die nächsten 10 Jahre:</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Erprobung und Produktion neuer Zell- und Modultechnologien zur Beibehaltung oder Steigerung des landwirtschaftlichen Ertrags.</li> <li>5. Auslegungssoftware zur standardisierten Anpassung von Agri-PV-Anlagen an die jeweiligen Kulturen und Klimazonen.</li> <li>6. Steigerung der Stabilität organischer PV-Folien und Optimierung der Fertigungsprozesse.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Integration von Smart-Farming-Ansätzen (z. B. automatisches Laden elektrischer Landmaschinen, Robotik, Präzisions-Pflanzenschutz)</li> <li>5. Untersuchung der technischen Einflussfaktoren auf die gesellschaftliche Akzeptanz, u. a. hinsichtlich einer Abgrenzung von Agri-PV-Anlagen und herkömmlichen PV-FFA.</li> <li>6. Entwicklung neuer, landwirtschaftszentrierter Geschäftsmodelle.</li> </ol>

AG 6C: Agri-Photovoltaik	Themen für konkrete industrielle Verwertungen bzw. für die breite Anwendung der Photovoltaik	wissenschaftliche Themen
<p>Wie und wann sehen Sie das wirtschaftliche Potenzial und die industrielle Verwertung für diese Technologien? Wer sind die Verwerter?</p>	<p>Das wirtschaftliche Potenzial neuer Agri-PV-Designs, welche auf aktuell verfügbare PV-Technologien basieren, kann voraussichtlich sehr zeitnah gehoben werden. Der Wettbewerbsvorteil einer industriellen Verwertung für PV-Projektierer ist vermutlich auf einen eher kurzen Zeitraum (3-5 Jahre) beschränkt, da die technischen Ansätze möglicherweise leicht kopierbar sind.</p> <p>Das wirtschaftliche Potenzial optimierter der Unterkonstruktionen kann aufgrund der notwendigen Vorentwicklung vermutlich etwas weniger zeitnah (2-3 Jahre) gehoben werden, sichert den Komponentenherstellern aber möglicherweise längerfristige Wettbewerbsvorteile.</p> <p>Die intelligente Steuerung nachgeführter PV-Systemen basiert hingegen auf Ertragsmodellen der PV- und Agrarproduktion und kann für Projektierer und Technologieentwickler daher voraussichtlich erst in 2-4 Jahren im größeren Maßstab zum Einsatz kommen. Dafür bestehen hier längerfristige Alleinstellungsmerkmale, welche die Stellung im Markt stärken können.</p>	<p>Die Verfügbarkeit von Informationen und Daten zu Auswirkungen des Einsatzes verschiedener PV-Technologien erscheinen zentral für den bevorstehenden Markthochlauf. Die Qualität und Quantität der Daten werden ausschlaggebend sein, wie zielgenau technische Komponenten von Agri-PV-Systemen optimiert werden können. Umfangreiche Mess- und Auswerteprogramme können zu diesem Ziel beitragen. Zeitnahe internationale Kooperationen sind dabei von zentraler Bedeutung v. a. mit China, Japan, Israel, Frankreich und Italien).</p> <p>Entwicklungen zu neuen Zell- und Modultechnologien können langfristige Wettbewerbsvorteile generieren (5-10 Jahre), stecken aber aktuell meist noch in den Kinderschuhen. Erste Erfahrungen zu spektralselektiven PV-Technologien liegen aktuell vorwiegend in China und Israel vor.</p>
<p>Einordnung der Entwicklungen im europäischen / internationalen Kontext – Alleinstellungsmerkmale</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Zwar haben Länder im asiatischen Raum (v. a. Japan und China) bezüglich der Verschneidung agrar- und PV-technischer Ansätze einen Wissensvorsprung bei der praktischen Umsetzung der Agri-PV, hinsichtlich neuer Zell-, Modul- und Anlagen-Technologien erscheinen europäische und deutsche Unternehmen gut aufgestellt. Eine dynamische Entwicklung neuer Technologien ist in Israel zu erwarten. Wie sich der Wettbewerb im Detail ausgestaltet, ist aufgrund der hohen Dynamik des Sektors und der Abhängigkeit der jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen der Regionen schwer abschätzbar.</li> </ul>	<p>Für die Integration von Smart-Farming-Ansätzen in Agri-PV-Systemen hat Deutschland gute Voraussetzungen, um eine wichtige Rolle bei der globalen Entwicklung zu spielen. Weltweit steht die Agri-PV noch am Anfang, und neue Entwicklungen und rechtliche Rahmenbedingungen können möglicherweise schnelle und unvorhersehbare Technologiesprünge ermöglichen. Eine Abschätzung zu Alleinstellungsmerkmalen ist deshalb schwierig und hängt auch von der Wettbewerbsfähigkeit hoch aufgeständerter Agri-PV-Anlagen ab.</p>
<p>Einfluss der Entwicklungen auf den Fertigungsstandort Deutschland</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Vor dem Hintergrund des politischen Ziels neuer PV-Produktionen in Deutschland können spezifische und wissensbasierte Agri-PV-Technologien aus Deutschland möglicherweise den Fertigungsstandort Deutschland stärken und neue Märkte erschließen.</li> </ul>	<p>Welche Agri-PV-Technologien besonders relevant für eine Verwertung deutscher Unternehmen sind, lässt sich zum heutigen Stand schwer abschätzen, da u. a. noch wenig Erkenntnisse zu deren Lern- und Skalierungseffekten vorliegen.</p>

<b>AG 6C: Agri- Photovoltaik</b>	<b>Themen für konkrete industrielle Verwertungen bzw. für die breite Anwendung der Photovoltaik</b>	<b>wissenschaftliche Themen</b>
<p>Welchen konkreten Einfluss auf die Umsetzung der Energiewende und die Energiesicherheit sehen Sie?</p>	<p>› Entscheidend für den konkreten Einfluss der Agri-PV auf die Energiewende wird die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber dem Bau von PV-FFA und Agri-PV-Anlagen sein. Die genannten Technologien können helfen, die Agrarerträge ausreichend zu berücksichtigen und damit die Akzeptanz gegenüber Agri-PV zu erhalten/zu stärken.</p>	<p>In der Vergangenheit haben Forschungsergebnisse in Deutschland wesentlich dazu beigetragen, weltweit ein Bewusstsein für das hohe Potenzial der Agri-PV zur Umsetzung der Energiewende zu schaffen. Durch Wissens- und Technologietransfer könnten zukünftig auch wichtige Zielländer des globalen Südens, in welchen das technische Potenzial besonders hoch ist, von einem Ausbau der Agri-PV profitieren.</p>