



Positionspapier

Energieforschung für industrielle Wertschöpfung in Deutschland

Warum kristalline Silizium-Photovoltaik auch im 8. Energieforschungsprogramm weiterhin ein zentraler Forschungsschwerpunkt bleiben muss

Breite Unterstützung aus Industrie, Forschung und Region

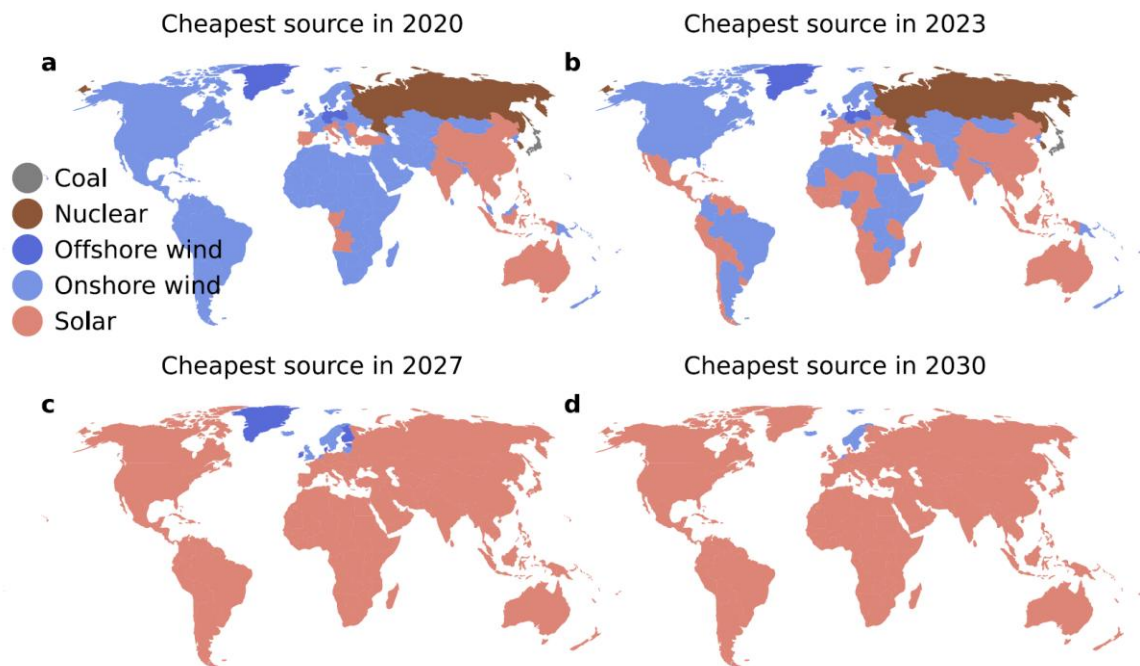
Die Kernaussagen und Handlungsempfehlungen dieses Positionspapiers werden von folgenden Unternehmen und Institutionen ausdrücklich unterstützt:

Unternehmen / Institution	Sitz
centrotherm international AG	Blaubeuren
Energy Depot EU GmbH	Konstanz
FuturaSun Holding S.r.l.	Cittadella, Italien
HTWG Konstanz – Hochschule Konstanz Technik, Wirtschaft und Gestaltung	Konstanz
Kontron AIS GmbH	Dresden
Next2Sun Technology GmbH	Dillingen
RCT Solutions GmbH	Konstanz
RENA Technologies GmbH	Gütenbach / Freiburg
SoliTek R&D	Vilnius, Litauen
SOLYCO Solar AG	Berlin
Stadt Konstanz – Wirtschaftsförderung	Konstanz
VON ARDENNE GmbH	Dresden

Diese breite Unterstützung unterstreicht die industrielle Relevanz des Anliegens, kristalline Siliziumtechnologien und ihre Weiterentwicklung auch zukünftig als tragende Säule der deutschen Energieforschungsförderung zu erhalten. Die entsprechenden Unterstützungsschreiben liegen dem Projektträger Jülich (PtJ) vor.

Deutschland verfügt trotz des weitgehenden Verlustes eigener Zell- und Modulproduktion weiterhin über international führende Kompetenzen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der auf kristallinem Silizium basierten Photovoltaik. Besonders stark sind deutsche und europäische Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau, bei Produktionsprozessen, Automatisierung, Messtechnik, Materialien sowie industrieller Forschung.

Nach allen internationalen Roadmaps wird kristallines Silizium (c-Si) auch in den kommenden zehn Jahren die dominierende Photovoltaiktechnologie bleiben und deutlich über 90 % der weltweit produzierten Solarzellen stellen. Diese technologische Dominanz ist kein Zufall. Sie beruht auf der außergewöhnlich hohen Wettbewerbsfähigkeit der kristallinen Silizium-Photovoltaik. Wie die folgende Abbildung zeigt, entwickelt sich Solarenergie mit Speichertechnologie weltweit zur günstigsten Form der Stromerzeugung.



Stromerzeugungstechnologien mit Batteriespeicher mit den niedrigsten LCOE nach Jahr und Region.

(Quelle: Nijssse, F.J.M.M., Mercure, J.F., Ameli, N. et al. The momentum of the solar energy transition.

Nature Communications 14, 6542 (2023))

Der Grund dafür liegt auf der Hand: Die heutige c-Si-Technologie hat bei Effizienz und Kosten ein Niveau erreicht, das extrem niedrige Stromgestehungskosten (LCOE) von nur 1 bis 6 Cent pro Kilowattstunde¹ ermöglicht und damit günstiger als Kohle und meist auch Windenergie. Selbst wenn das Steigerungspotenzial bei Wirkungsgraden und Kostenreduktionen auf Zell- und Modulebene langsam an physikalische und wirtschaftliche Grenzen stößt, bleibt c-Si der verlässliche Motor der globalen Energiewende. Sie ist unangefochten die günstigste Form der Stromerzeugung und wird von Investoren durch ihr hervorragendes Risikoprofil sowie jahrzehntelange Erfahrung (Bankability) gewählt. Der Fokus der Weiterentwicklung verlagert sich daher zusehends. Schwerpunkte auf Zell- und Modulebene bilden in den nächsten Jahren:

- Restpotenziale heben: Maximale Ausschöpfung des verbleibenden Effizienzpotenzials ohne Steigerung der Herstellungskosten.

¹ je nach Standort

- Nachhaltigkeit & Ressourcenschutz: Einsatz sparsamerer, umweltfreundlicher Prozesse und Reduktion kritischer Rohstoffe in der Produktion.

Damit entscheidet die Wettbewerbsfähigkeit der c-Si-Produktion wesentlich darüber,

- ob deutsche Unternehmen künftig am weltweiten Ausbau der Photovoltaik partizipieren,
- ob europäische Produktionsanlagen international wettbewerbsfähig bleiben,
- ob neue Zellgenerationen erfolgreich industrialisiert werden können,
- und ob zukünftige Technologien wie Silizium-Perowskit-Tandemzellen überhaupt wirtschaftlich umgesetzt werden können.

Der Anteil der Forschungsförderung für kristalline Siliziumtechnologien² sollte im 8. Energieforschungsprogramm nicht weiter sinken, sondern entsprechend ihrer langfristigen industriellen Bedeutung weiterhin gestärkt werden.

1. ENERGIEFORSCHUNG MUSS INDUSTRIELLE WERTSCHÖPFUNG ERMÖGLICHEN

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie verfolgt mit seiner Forschungsförderung nicht ausschließlich wissenschaftliche Exzellenz. Vielmehr soll Forschung Innovationen hervorbringen, die

- industrielle Wertschöpfung schaffen,
- internationale Wettbewerbsfähigkeit sichern,
- hochwertige Arbeitsplätze erhalten,
- technologische Souveränität stärken
- und private Investitionen ermöglichen.

Das bestehende Energieforschungsprogramm enthält bereits wichtige Leitlinien, die ausdrücklich auf eine enge Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie abzielen. Insbesondere die Einbindung von Maschinen- und Anlagenbau, Produktionsunternehmen, Materialherstellern sowie Forschungseinrichtungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor der deutschen Energieforschung. Dieser industrieorientierte Ansatz hat wesentlich dazu beigetragen, dass Deutschland trotz des Rückgangs der heimischen Zellproduktion weiterhin über international anerkannte Kompetenzen in Produktionsanlagen, Prozesstechnologien und industrieller Forschung verfügt. Diese Ausrichtung sollte im 8. Energieforschungsprogramm konsequent beibehalten und weiter gestärkt werden.

Gerade im Bereich Photovoltaik besitzt Deutschland trotz des Verlustes großer Teile der Zellproduktion weiterhin außergewöhnlich starke industrielle Kompetenzen.

Diese liegen insbesondere in

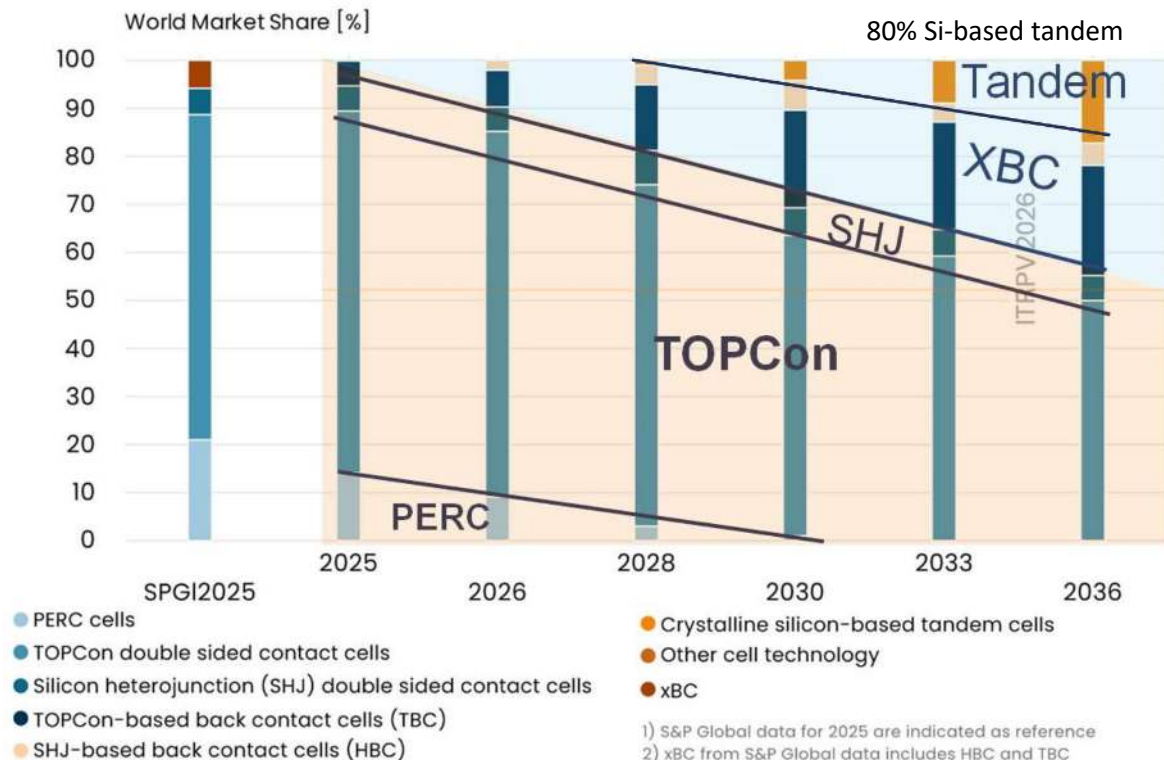
- Produktionsanlagen,
- Automatisierung,
- Messtechnik,
- Prozessentwicklung,
- Spezialmaterialien,
- Produktionssoftware,

² einschließlich ihrer Weiterentwicklung (TOPCon, HJT, BC, Tandem-Bottom-Zellen)

- Qualitätskontrolle
- und industriellen Forschungsdienstleistungen.

Diese Kompetenzen sind weltweit gefragt. Der Weltmarkt bleibt auf absehbare Zeit ein c-Si dominierter Markt.

2. WARUM KRISTALLINES SILIZIUM DAS FUNDAMENT DER ZUKÜNFTIGEN PHOTOVOLTAIK BLEIBT



Erwartete Marktanteile unterschiedlicher Zelltechnologien bis 2035 (ITRPV, 17th Edition, 2026).

Auch unter Einbeziehung siliziumbasierter Tandemzellen bleibt kristallines Silizium über den gesamten Betrachtungszeitraum die technologische Grundlage des weit überwiegenden Teils des PV-Marktes. Der zunehmende Marktanteil von Back-Contact-Technologien (BC) erhöht zugleich die Relevanz von 3- und 4-Terminal-Architekturen für zukünftige Tandemkonzepte. Diese Ansätze sollten daher neben 2-Terminal-Tandemtechnologien in Forschung und Entwicklung berücksichtigt werden.

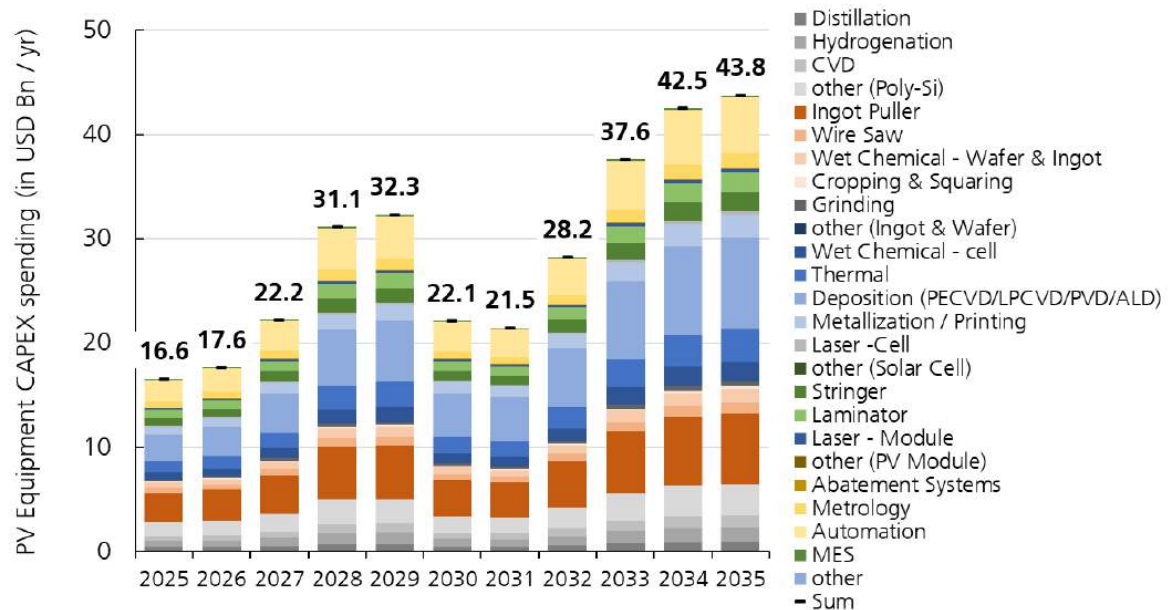
Die aktuelle ITRPV bestätigt, dass kristallines Silizium auch in den kommenden zehn Jahren die technologische Grundlage des weit überwiegenden Teils der weltweiten Solarzellenproduktion bildet. Dies gilt für etablierte Single-Junction-Technologien ebenso wie für zukünftige siliziumbasierte Tandemzellen. Unter Berücksichtigung der in der ITRPV erwarteten c-Si-basierten Tandemtechnologien werden auch 2036 rund 95 % der prognostizierten Solarzellenproduktion auf kristallinem Silizium basieren.³

³ ITRPV, Results 2025, 17th Edition, June 2026. Für 2036 wird bei rund 80 % der Tandemzellen eine c-Si-Bottomzelle erwartet (ITRPV Presentation, S. 14).

3. WARUM DEUTSCHLAND JETZT PROFITIEREN KANN

Die gemeinsam von VDMA, Fraunhofer ISE und ISC erarbeitete Equipment-Studie prognostiziert einen Anstieg der jährlichen globalen Investitionen in PV-Produktionsequipment von 16,6 Mrd. US-Dollar im Jahr 2025 auf 43,8 Mrd. US-Dollar im Jahr 2035. Daraus ergibt sich für das kommende Jahrzehnt ein kumuliertes Marktvolumen von rund 250 bis 300 Mrd. US-Dollar. Die Aufschlüsselung nach Produktionsschritten verdeutlicht, dass dieses Wachstum zahlreiche Kompetenzfelder des deutschen und europäischen Maschinen- und Anlagenbaus betrifft.

Projected avg. Annual Global PV Equipment CAPEX per Technology (USD Bn)



Prognostizierte jährliche globale Investitionen in PV-Produktionsequipment nach Prozess- und Technologiebereichen. Quelle: VDMA Equipment Study, erstellt unter Mitwirkung von Fraunhofer ISE und ISC Konstanz.

4. FORSCHUNG UND INDUSTRIELLE UMSETZUNG GEHÖREN ZUSAMMEN

Deutschland verfügt über hervorragende Grundlagenforschung. Der internationale Wettbewerb entscheidet sich jedoch zunehmend bei der industriellen Umsetzung. Für Wettbewerbsvorteile sollte das Energieforschungsprogramm weiterhin insbesondere Forschung fördern, die

- Produktionsprozesse verbessert,
- Ausbeute steigert,
- Kosten senkt,
- Zuverlässigkeit erhöht,
- Automatisierung ermöglicht,
- Digitalisierung integriert,
- KI in Produktionsprozesse überführt,
- Materialverbrauch reduziert,
- Recycling ermöglicht
- und Produktionslinien schneller industrialisiert.

5. AUSGEWOGENE FÖRDERUNG ENTLANG DES TECHNOLOGIE-REIFEGRADES

Die Energiewende erfordert sowohl visionäre Zukunftstechnologien als auch die kontinuierliche Weiterentwicklung bereits industriell etablierter Technologien. Eine ausgewogene Forschungsförderung sollte daher den gesamten Innovationspfad abdecken – von der Grundlagenforschung über Pilotierung und Demonstration bis hin zur industriellen Umsetzung.

Aus Sicht der industriellen Wertschöpfung ist dabei entscheidend, dass Förderentscheidungen ein ausgewogenes Portfolio verschiedener Technologiepfade unterstützen. Ein ausschließlich auf zukünftige Technologien ausgerichteter Förderschwerpunkt birgt das Risiko, bestehende industrielle Stärken Deutschlands und Europas nicht ausreichend weiterzuentwickeln.

Dies wurde aus Sicht der Unterzeichner beispielhaft im Förderaufruf „Testinfrastrukturen“ deutlich. Dort wurden Forschungsinfrastrukturen gefördert, die auf Perowskit-basierte Technologien ausgerichtet sind, während Vorschläge zur Weiterentwicklung industriell relevanter kristalliner Silizium-Technologien keine Berücksichtigung fanden. Unabhängig von den jeweiligen Einzelentscheidungen verdeutlicht dieses Beispiel die Bedeutung einer ausgewogenen Förderstrategie, welche sowohl Zukunftstechnologien als auch die kontinuierliche Weiterentwicklung der heute marktprägenden c-Si-Technologien angemessen berücksichtigt.

Gerade im Hinblick auf den Transfer in industrielle Anwendungen sollte die Forschungsförderung sicherstellen, dass etablierte Wertschöpfungsketten nicht geschwächt, sondern als Fundament zukünftiger Technologien weiterentwickelt werden.

6. HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Für das 8. Energieforschungsprogramm empfehlen wir:

6.1 c-Si als tragende Säule erhalten

Der Anteil der Forschungsförderung für kristalline Siliziumtechnologien sollte nicht weiter sinken, sondern entsprechend ihrer langfristigen industriellen Bedeutung eher gestärkt werden. Für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau sind dabei insbesondere die Technologie-Roadmaps großer internationaler c-Si-Produzenten – unter anderem in Indien und den USA – von hoher Bedeutung. Diese Roadmaps reichen zunehmend über die Weiterentwicklung heutiger TOPCon- und BC-Technologien bis zu zukünftigen Tandemkonzepten. Aufgrund des wachsenden Anteils von BC-Technologien sollten dabei neben 2-Terminal- auch 3- und 4-Terminal-Architekturen technologieoffen weiterentwickelt werden.

6.2 Industrienähe Forschung weiter stärken

Weiterhin im Fokus: Förderung von Projekten mit

- Maschinenbau
- Produktionsunternehmen
- Materialherstellern
- Forschungseinrichtungen

entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

6.3 Produktionstechnologien stärker fördern

Neben Zellwirkungsgraden sollten stärker adressiert werden:

- Produktionsprozesse
- Digitalisierung
- KI
- Automatisierung
- Qualitätssicherung
- Zuverlässigkeit
- Nachhaltigkeit
- Recycling
- Skalierung

6.4 Demonstration und Pilotierung ausbauen

Neue Technologien müssen unter industriellen Bedingungen demonstriert werden. Pilotlinien und industrienähe Forschungsinfrastrukturen sind hierfür unverzichtbar.

6.5 Forschung an industrieller Verwertung ausrichten

Die Auswahl von Forschungsprojekten sollte neben wissenschaftlicher Qualität stärker berücksichtigen:

- Verwertungspotenzial,
- industrielle Anschlussfähigkeit,
- Beitrag zur europäischen Wettbewerbsfähigkeit,
- Nutzen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau.

7. SCHLUSSBEMERKUNG

Deutschland besitzt weiterhin hervorragende Chancen, eine führende Rolle in der weltweiten Photovoltaikindustrie einzunehmen – nicht über Massenproduktion, sondern über Innovation, Produktionstechnologien und industrielles Know-how. Das 8. Energieforschungsprogramm leistet hierzu einen entscheidenden Beitrag, das soll so bleiben. Eine ausgewogene Förderstrategie, die wissenschaftliche Exzellenz mit industrieller Wertschöpfung verbindet und kristalline Siliziumtechnologien als Fundament zukünftiger Entwicklungen versteht, stärkt sowohl die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft als auch die technologische Souveränität Europas.