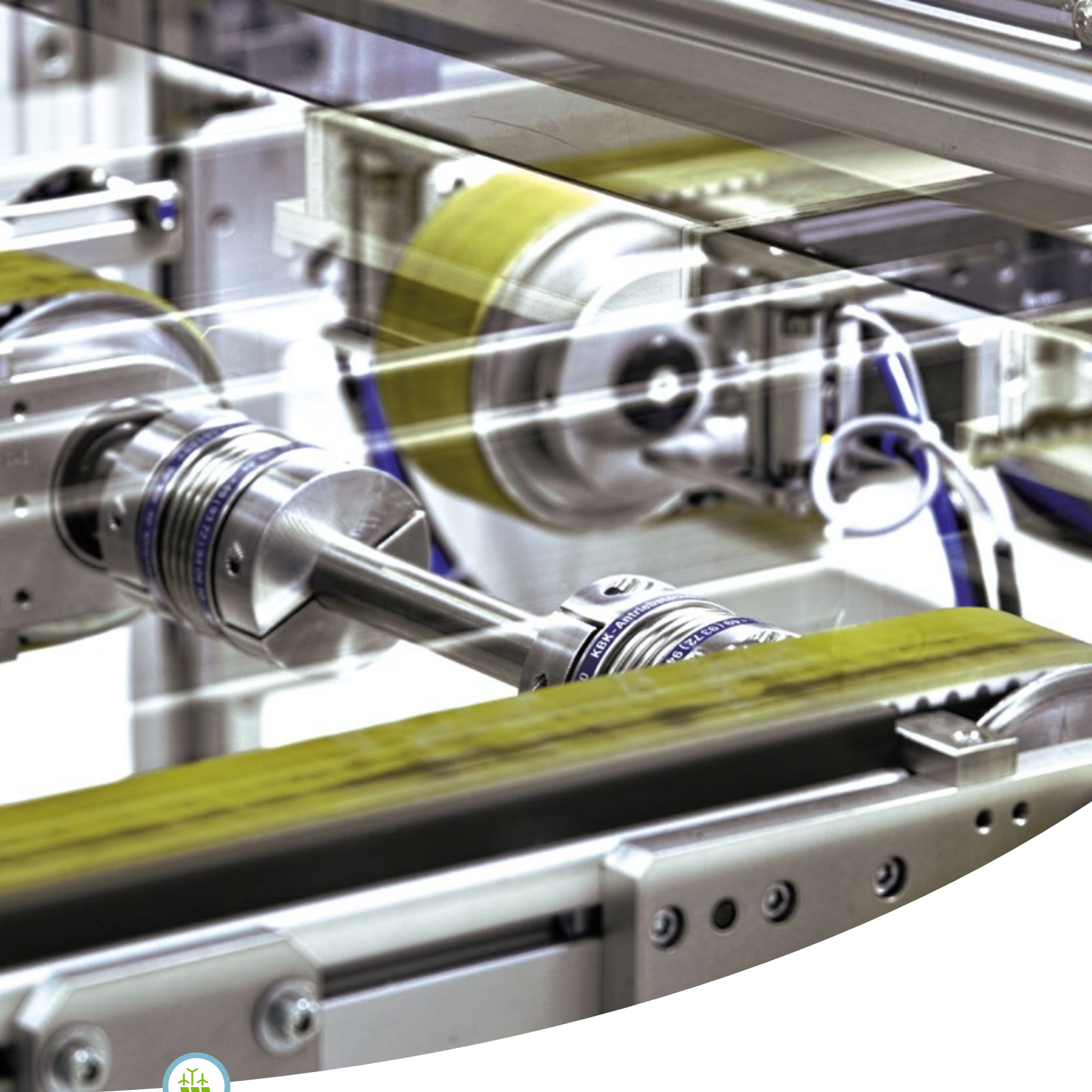




FORSCHUNGSRoadmap zur Digitalisierung in der Photovoltaik

Empfehlungen aus der deutschen Photovoltaikbranche zur Forschungsförderung



Impressum

Herausgeber

Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt
Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien

Gestaltung und Produktion

Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Stand

Januar 2021

Bildnachweise:

Umschlag: ©swoerl – stock.adobe.com
Hintergrund: ©Lino Hermes
Seite 3: ©Fraunhofer ISE/Foto: Dirk Mahler
Seite 5: ©Michel Angelo – stock.adobe.com
Seite 6: ©Fraunhofer ISE/Foto: Dirk Mahler
Seite 8: ©Fraunhofer ISE
Seite 10: ©BELECTRIC
Seite 13: ©Meyer Burger (Germany) GmbH



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



ERNEUERBARE ENERGIEN

FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE

1 HINTERGRUND

Dieses Papier gibt Inhalte eines Fachworkshops wieder, der im November 2019 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) durchgeführt wurde. Es zeigt eine Auswahl vieler neuer Möglichkeiten der Kombination von Photovoltaik und Digitalisierung. Mit Forschung können diese Möglichkeiten zur Realität werden. Das Papier zeigt deswegen den erforderlichen Forschungsbedarf auf.

An diesem Dokument haben mitgewirkt:

Prof. Dr. Andreas Bett	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel	Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH)
Dr. Simon Philipps	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Dr. Thorsten Dullweber	Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH)
Dr. Jann Binder	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
Prof. Dr. Christoph Brabec	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dr. Matthias Ebert	Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP
Dr. Oliver Führer	SMA Solar Technology AG
Dr. Wolfgang Jooß	RCT Solutions GmbH
Dr. Ralf Preu	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Dr. Stefan Rein	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Dr. Bernhard Schropp	SMA Solar Technology AG
Robert van Treeck	BELECTRIC GmbH

Stand: 31. Dezember 2020



INHALT

1.	Hintergrund		
2	Zusammenfassung und Fazit	3	
3.	Die Bedeutung der Digitalisierung in der Photovoltaik	5	
4.	Photovoltaik und Digitalisierung	6	
4.1	Digitalisierung in der Fertigung von Zellen, Modulen und Systemkomponenten	6	
4.1.1	Stand der Technik und technologische Möglichkeiten	6	
4.1.2	Nutzung, Mehrwert und innovative Geschäftsmodelle	7	
4.1.3	Forschungsfelder der Digitalisierung in der Fertigung	8	
4.2	Digitalisierung der PV-Systeme und der PV-Integration in das Energiesystem	10	
4.2.1	Stand der Technik und technologische Möglichkeiten	11	
4.2.2	Nutzen, Mehrwert und innovative Geschäftsmodelle	12	
4.2.3	Forschungsfelder der Digitalisierung bei PV-Systemen und ihrer Integration	12	
5.	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	15	
5.1	Datengeneration	15	
5.2	Austausch und Speicherung von Daten	16	
5.3	Digitaler Zwilling	17	
5.4	KI-basierte Datenanalyse	18	
5.5	Verwertung von Daten in neuen Geschäftsmodellen	20	
	Abkürzungsverzeichnis	21	



2. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die sich kontinuierlich entwickelnde Digitalisierung ist ein mächtiges Werkzeug zum Erreichen besserer und neuer Qualitäten auch im Bereich der Photovoltaik (PV). Dies betrifft die gesamte Wertschöpfungskette vom Material bis zum Modul, der Anwendung im Kraftwerk und die Rückführung über Recyclingwege. Produkte, Prozesse, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle erfahren durch das Werkzeug Digitalisierung neue Möglichkeiten. Dieser erweiterte Möglichkeitsraum wird für die Photovoltaik erschlossen, indem spezifische Erfahrungen, Fragestellungen und Visionen mit den neuen digitalen Methoden bearbeitet und die Methoden auf die Fragestellungen angepasst werden. Es besteht also ein Wechselspiel zwischen der Entwicklung der Digitalisierung und der Photovoltaik, das zu Innovationen führt.

Dabei kann es nie alleine um die reine Informationstechnik gehen. Die Photovoltaikbranche muss in der nicht-virtuellen, realen Welt zweckdienliche und intelligente Produkte bereitstellen, welche CO₂-Emissions-einsparungen ermöglichen und kostengünstige Energie liefern. Es ist deshalb wichtig, dass die Photovoltaikfachleute der Zukunft neue digitale Techniken mit den erfolgreichen konventionellen Techniken an den besonders gewinnbringenden Stellen verzahnen. Dafür ist zum einen viel Wissen und Erfahrung aus der Photovoltaikbranche erforderlich, zum anderen aber

auch viel Wissen aus der Informationstechnik. Dieser Workshop-Bericht gibt Hinweise, an welchen Stellen diese Verzahnung besonders gewinnbringend ist. Beim Workshop wurde deutlich, dass es zu vielen Fragestellungen noch Bedarf an Forschung und Entwicklung (F&E) gibt. Die Schwerpunkte der Diskussionen sind in diesem Dokument zusammengefasst. Dabei erhebt das Dokument nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Verbindung der beiden Megatrends Photovoltaik und Digitalisierung ermöglicht es, weitere Kostensenkungspotenziale zu erschließen. Die Nutzung digitaler Methoden in der Photovoltaik hat bereits begonnen und muss durch zielgerichtete F&E-Aktivitäten begleitet werden. Die Anwendung digitaler Methoden entlang der Wertschöpfungskette – vom Anlagenbau bis zum Kraftwerksbetrieb – kann Firmen Alleinstellungsmerkmale ermöglichen, um Marktanteile zu sichern und auszubauen. Wesentliche Themenfelder, in denen die Digitalisierung zum Tragen kommt, sind die Fertigungstechnologien von Solarzellen, Modulen und Balance-of-System-Komponenten (BOS), der Betrieb von PV-Systemen sowie die Integration von PV-Strom in das Energiesystem.

Die F&E-Themen lassen sich entlang der Datenanalyse-kette skizzieren. Das erste Thema ist die Datengeneration. Für diese gilt es zu analysieren, welche Daten zum Beispiel bei der Solarzellenherstellung oder beim Betrieb von Solarkraftwerken für welche Auswertung in welcher Qualität und Dichte erforderlich sind. Zunächst

können Daten aus schon eingesetzten Sensoren zukünftig systematischer erschlossen und genutzt werden. Mittelfristig muss die Datenbasis durch anforderungsgerechte neue Sensorik deutlich verbreitert werden. In der Fertigung kommt es dabei auf Schnelligkeit und Genauigkeit an. Bei den PV-Anwendungen spielen die Zuverlässigkeit und die Konnektivität eine besonders wichtige Rolle. In allen Themenfeldern muss eine hohe Kosteneffizienz erreicht werden, damit die durch Digitalisierung möglichen Verbesserungen rentabel sind.

Als zweites Thema für die Digitalisierung der Photovoltaik müssen Austausch und Speicherung von Daten optimiert werden. Dazu sind Schnittstellen und Datenformate zu standardisieren, Datenbanken müssen weiterentwickelt und Sicherheitskonzepte verbessert werden. Besonderes Augenmerk verdient ein umfassender Datenaustausch von der Komponenten-Produktion über den Energiesystem-Betrieb bis zum Recycling. Dadurch können Optimierungspotenziale entlang des kompletten Lebenszyklus von PV-unterstützten Energiesystemen voll ausgeschöpft werden.

Als drittes Thema in der Datenanalysekette spielen Digitale Zwillinge eine wichtige Rolle. Virtuelle Repräsentationen, zum Beispiel von Werkstücken, Fertigungsprozessen und Produktionsanlagen bis hin zu ganzen Fabriken, eröffnen neue Möglichkeiten bei der Planung, Optimierung und Anpassung. Sie stellen die

Basis für eine Einbindung in Industrie-4.0-Umgebungen dar. Multi-Skalen- und Meta-Modelle der realen Objekte müssen entwickelt und validiert werden. Um diese an die reale Welt anzubinden, müssen Messtechnik, Sensorik und Schnittstellen weiterentwickelt werden. Hierfür besteht ein Bedarf an Best-Practice-Beispielen und zentralen Simulationsplattformen.

Alle drei Themenbereiche schaffen Grundlagen für die Datenanalyse auf Basis künstlicher Intelligenz (KI). Diese kann große Datenmengen mittels KI-unterstützten Softwarealgorithmen selbstständig nach neuen Zusammenhängen und Korrelationen untersuchen, um zum Beispiel den Wirkungsgrad von Solarzellen in der Produktion zu erhöhen oder den Ertrag von photovoltaischen Energiesystemen zu maximieren. Hierzu sind PV-spezifische Methoden zur Auswertung und Mustererkennung zu entwickeln. Zudem wird neue Software benötigt, die zum Beispiel Produktionsdaten oder auch Betriebsdaten von PV-Kraftwerken laufend analysiert und Verbesserungsmaßnahmen bzw. Wartungsbedarf automatisiert ableitet.

Schlussendlich soll die Verwertung von Daten neue Geschäftsmodelle ermöglichen. F&E kann aufzeigen, welches Optimierungspotenzial besteht, wenn Daten aus Produktion, PV-Kraftwerken und bei der Integration der PV in das Energiesystem erhoben und genutzt werden.



3. DIE BEDEUTUNG DER DIGITALISIERUNG IN DER PHOTOVOLTAIK

Auf der 21. UN-Klimakonferenz (COP21) 2015 in Paris¹ diskutierte die Weltgemeinschaft darüber, wie mit der Herausforderung des Klimawandels aufgrund des CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre umgegangen werden soll. Die COP21-Debatten führten zu einer bisher einmaligen und fast weltweiten Einigung der Regierungen: Die Weltgemeinschaft will eine Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5 Grad Celsius erreichen. Dies bedeutet, dass der Übergang des Energiesystems von fossilen zu erneuerbaren Energiequellen stark beschleunigt werden muss. Fast alle Energiesystemszenarien zeigen, dass die Photovoltaik (PV) neben der Windenergie die wichtigste Säule der zukünftigen Energieversorgung sein wird². Vor diesem Hintergrund und angesichts der immer geringeren Erzeugungspreise für PV-Strom wird der PV-Markt schnell wachsen. Bis 2030 werden weltweit voraussichtlich 12 Terawatt^{3,4}, installiert sein. Dies ist eine beeindruckende Steigerung gegenüber der heute installierten Leistung von rund 640 Gigawatt⁵. Die PV-Technologie ist, das darf heute als sicher gelten, ein Megatrend der weltweiten Energieversorgung und steht erst am Anfang ihrer Entwicklung⁶. Diese rasante Entwicklung wurde bisher und wird auch zukünftig in hohem Maß von Innovationen aus unserer deutschen und europäischen Forschung getragen.

Ein zweiter wichtiger Megatrend ist die Digitalisierung sehr vieler Lebensbereiche: Verteilte Sensorik, dezentrale automatisierte Informationsverarbeitung und vernetzte Intelligenz kombiniert mit höchster Rechenleistung verändern auch die Produktionstechnik und den Betrieb unserer Energiesysteme. Durch die Digitalisierung entstehen weltweit wirtschaftliche Opportunitäten auf Basis neuer und besserer Produkte. Die zentrale Bedeutung der Digitalisierung für einen erfolgreichen Industriestandort steht außer Frage. Auch im Bereich der Digitalisierung ist die deutsche und europäische Forschung sehr stark.

Forschung und Entwicklung für die Digitalisierung in der Photovoltaik verbinden zwei Megatrends und bieten damit nicht nur eine große Chance für unser Klima, sondern auch für unsere Industrie. Unsere in der Photovoltaik und in der Digitalisierung erfolgreichen Firmen und Forschungseinrichtungen können gemeinsam eine weiter verbesserte Kosteneffizienz bei der Herstellung von PV-Zellen und -modulen, Wechsel-

richtern und Montagesystemen erreichen. Zudem können neue, intelligente Anlagen- und Fertigungskonzepte dem Maschinenbau Alleinstellungsmerkmale verschaffen und somit helfen, Marktanteile zurückzugewinnen. Wichtige Ansätze sind hier beispielsweise predictive Maintenance (vorausschauende Instandhaltung), selbststeuernde Fertigungen, selbstoptimierende Prozessanlagen sowie eine automatisierte Fertigungsanalyse. Langfristiges Ziel ist es dabei, eine selbstlernende und sich selbst optimierende Fabrik zu realisieren. Auch im Bereich der PV-Anlagen und Kraftwerke bieten sich neue Optionen durch eine konsequente Nutzung der Chancen aus der Digitalisierung. So können neue Geschäftsmodelle für Planung und Betrieb von PV-Kraftwerken und die Stromvermarktung entstehen. Zudem wird es neue Anwendungsmöglichkeiten für in verschiedenste Produkte integrierte Photovoltaik geben, die durch die Digitalisierung kostengünstig errichtet werden können. Vorausschauende Instandhaltung und detailliertes Monitoring werden helfen, Ausfallzeiten zu reduzieren und somit Leistung und Ertrag zu steigern. Zudem werden eine ganzheitliche Betrachtung der Anlagen sowie systematische Vergleiche von Anlagen- und Komponentenqualität hohe Lerneffekte ermöglichen. Als langfristige Vision wird eine Auswertung und Verknüpfung der Daten von der Komponentenfertigung über die Errichtung bis zum Betrieb von PV-Kraftwerken gesehen.

¹ "United Nations Framework Convention on Climate Change, 21st Conference of the Parties, Paris, France (2015)

² Vgl. u.a. Fatih, B. World Energy Outlook 2019; International Energy Agency Publication: Paris, France (2019)

³ 1 Terawatt (TW) = 1.000 Gigawatt (GW) = 1.000.000.000.000 Watt

⁴ C. Breyer et al., On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios, Progress in Photovoltaics 25 (2017)

⁵ A. Jäger-Waldau, Snapshot of Photovoltaics—February 2020, Energies, 13, 930 (2020)

⁶ Siehe z.B. P. Sterchele, J. Brandes et al. Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem, Fraunhofer ISE (2020)

4. PHOTOVOLTAIK UND DIGITALISIERUNG

Die Digitalisierung umfasst die Umstellung von technischen und ökonomischen Prozessen, Produkten, Information und Kommunikation auf digitale Methoden und Plattformen. Sie ist damit ein wichtiger Innovationstreiber und betrifft sehr viele Bereiche unserer Industrie und Gesellschaft.

Auch in der Photovoltaik findet ein Transformationsprozess hin zu einer verstärkten Digitalisierung statt, welcher durch zielgerichtete Forschung und Entwicklung begleitet werden muss. Zentrale Themenfelder sind dabei zum einen die Digitalisierung von Produktionstechnologien entlang der Wertschöpfungskette auf unterschiedlichen Ebenen (etwa Instandhaltung und Prozessregelung) und Skalen (Werkstück, Anlage, Fabrik). Zum anderen ergibt sich eine Vielzahl von Konzepten bei der Integration der Photovoltaik in das Energiesystem sowie rund um die Optimierung des Anlagenbetriebs, um Verfügbarkeit und Ausbeute zu steigern sowie Kosten zu senken. Im Folgenden wird auf diese zwei Themenfelder im Detail eingegangen und der Forschungsbedarf aufgezeigt.

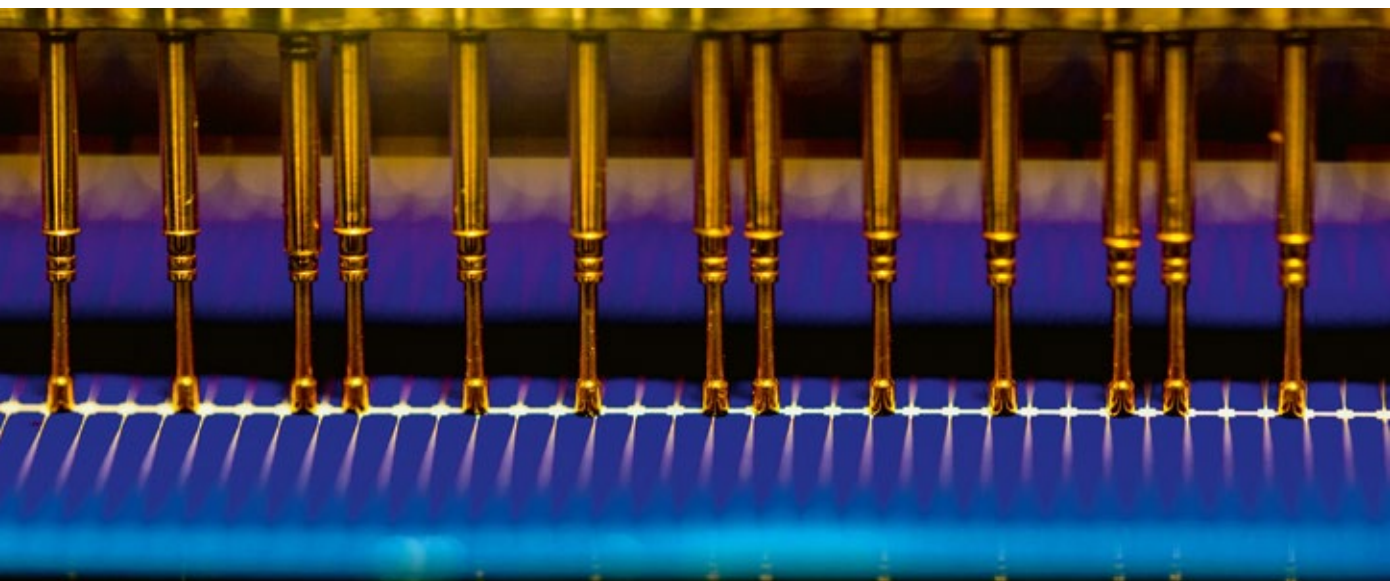
4.1. Digitalisierung in der Fertigung von Zellen, Modulen und Systemkomponenten

Heutige moderne Wafer-, Zell- und Modulfabriken produzieren jedes Jahr mehrere Gigawatt an Wafern, Solarzellen und Modulen, Tendenz stark steigend. Das entspricht etwa einer Milliarde jährlich produzierten Solarzellen pro Fabrik. Während der Herstellung werden extrem viele und hochdimensionale Daten generiert: zum Beispiel von den Produktionsmaschinen,

den Inline-Messgeräten, mit denen der Prozess überwacht wird, sowie bei der Strom-Spannungsmessung, mit der Solarzellen und Module klassifiziert werden. Die Digitalisierung hilft, diese großen Datenmengen zu sammeln und auszuwerten. Die Produktion kann dadurch bezüglich Wirkungsgrad, Langlebigkeit und Herstellungskosten der Zellen und Module optimiert werden. Die Maschinenbauer und Zulieferer können bei der Generation von Maschinendaten, der Definition von Schnittstellen, der Maschinensteuerung sowie bei der digitalen Optimierung von Analyse- und Wartungskonzepten einen wichtigen Kundennutzen generieren. In den folgenden Abschnitten wird der Stand der Technik erläutert, der Mehrwert und Nutzen beschrieben sowie der zukünftige F&E-Bedarf skizziert. Diverse Aspekte lassen sich auch auf andere Komponentenfertigungen in der Photovoltaik übertragen wie zum Beispiel auf die Herstellung von Wechselrichtern und anderen PV-Systemkomponenten.

4.1.1. Stand der Technik und technologische Möglichkeiten

Die moderne Solarzellenproduktionstechnologie hat sich in den vergangenen zehn Jahren rasant weiterentwickelt und damit maßgeblich zur Kostensenkung von Solarstrom beigetragen. Heutzutage produzieren die Fabriken überwiegend Solarzellen auf der Basis von monokristallinen Silizium (Si) -Wafern mit mono- und bi-fazialen PERC-Zelldesign⁷. Doch auch die Dünnschichttechnologie hat große Fortschritte in Bezug auf Effizienz und Kostensenkung realisieren können und hat weiterhin signifikante Marktanteile. Im Bereich der Silizium-Technologie können zukünftig auch Konzepte für passivierende Kontakte wie TOPCon, POLO⁸ und Heterojunction⁹ verstärkt zum Einsatz kommen.



Bei der Zellherstellung werden verschiedene Prozessanlagen aus den Bereichen Nasschemie (Reinigung, Textur), Öfen (Diffusion, Tempern, Feuern), Beschichtungstechnik (PECVD, ALD, Sputtern) sowie Strukturierung und Metallisierung (Laser, Siebdruck, Galvanik) verwendet, die derzeit etwa 6.000 Silizium-Wafer pro Stunde hochautomatisiert prozessieren können. Dabei generieren sie vielfältige Rezeptparameter und Maschinendaten pro Wafer. Nach den meisten Prozessschritten erfolgt eine Messung zur Prozesskontrolle wie zum Beispiel die optische Reflexion nach Textur, der Schichtwiderstand nach Diffusion oder die Schichtdicke nach dem Abscheiden von Siliziumnitrid (SiN). Schließlich werden die fertigen Solarzellen mittels Stromspannungs-Messung, Elektrolumineszenz und ggf. weiteren Messtechniken charakterisiert. Insgesamt gewinnen bildgebende Messtechniken mit zunehmender Sensitivität der Zellkonzepte an Bedeutung. Auch die Modulproduktion hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt hin zu Drahtlöt- und Klebe-Verschaltungskonzepten sowie Halbzellen und Schindeldesign mit entsprechend weiterentwickelten Gerätschaften wie Stringern und Laminatoren. Zudem werden die finalen Leistungs- und Langlebigkeitsmessungen in der Produktion in der Regel auf Modulebene durchgeführt.

Bislang werden in den meisten Fabriken nur Teilmengen der vielfältigen Daten mittels MES-Software-Systemen (Manufacturing Execution Systems) zentral in Datenbanken erfasst und standardisiert verarbeitet. Zum Beispiel geschieht das in der Darstellung von Trend-charts. Zudem werden die Daten manuell ausgewertet, etwa mittels Datenkorrelationen. Erste Fabriken verwenden bereits Wafer-Tracking-Methoden, bei denen die Silizium-Wafer eingangs mit einer Kodierung versehen werden. Diese Kodierung wird vor jedem Produktionsschritt mit einer Kamera erfasst, wodurch sich die Produktionsdaten der jeweiligen Solarzelle zuordnen lassen. Dieses Verfahren ermöglicht es zukünftig, die vielen Produktionsdaten auf den Wafer genau zu erfassen und auszuwerten. Durch diese Daten kann schließlich eine Korrelation zum Wirkungsgrad und zu Langlebigkeitsdaten der Zellen im Solarkraftwerk hergestellt werden. Erste Solarzellen-Unternehmen forschen bereits an Software auf der Basis künstlicher Intelligenz (KI), mit der Produktionsdaten ausgewertet werden sollen. Die KI soll die automatische Analyse großer Datenmengen (Data Mining von Messdaten, Bildanalyseverfahren) unterstützen. Sie bietet zukünftig das große Potenzial, Solarzellenproduktionslinien noch schneller bezüglich wichtiger Produktionskennzahlen wie zum Beispiel Wirkungsgrad, Ausbeute, Durchsatz und Langlebigkeit zu optimieren.

Zur Produktionskontrolle und Qualitätssicherung werden auch Daten bildgebender Messverfahren ausgewertet. Mustererkennungsalgorithmen und maschinelle Lernverfahren ermöglichen eine Detektion und Quantifizierung von Defekten. Hier werden einerseits noch merkmalsbasierte Verfahren verwendet, die von Fachkräften definiert werden, andererseits werden neue Technologien des mehrschichtigen Lernens (Deep Learning) eingesetzt, die eine Ende-zu-Ende Verknüpfung von Messdaten und DefektlABELN zulassen. In beiden Fällen basiert die Datenauswertung auf einer menschlichen Definition von Merkmalen oder Labels. Die Eingabedaten verschiedener Messsysteme sind in seltenen Fällen fusioniert. Die vollautomatische Identifikation und Quantifizierung der Messdaten zur Datenanalyse, Produktionskontrolle und Prozessoptimierung mittels moderner KI ist möglich. F&E-Institute verfügen über das Know-how zur Entwicklung von KI-Methoden, mit denen eine aussagekräftige Datenkompression und theoriegestützte Datenanalyse möglich sind. Das schafft einen Mehrwert zu den bisherigen Verfahren.

Bezüglich des Betriebes und der Wartung von Produktionsmaschinen gibt es schon heute IT-basierte Fernwartungssysteme, die jedoch noch von Personen bedient werden und nach Zeitplänen oder bei Anlagenstörungen erfolgen. Vorausschauende oder vorhergesagte Maschinenwartung mittels KI ist noch nicht Stand der Technik. Die KI-unterstützte predictive Maintenance (vorausschauende Instandhaltung) bietet die Chance, die Verfügbarkeit der Produktionsanlagen weiter zu optimieren und Anlagenausfälle durch Wartung oder Anlagenfehler zu minimieren. Zudem wird daran gearbeitet, einen digitalen Zwilling einer Produktionsmaschine zu erstellen. Dieser beinhaltet nicht nur das komplette Anlagendesign, sondern zum Beispiel auch eine möglichst detaillierte digitale Beschreibung des Herstellungsprozesses.

4.1.2. Nutzen, Mehrwert und innovative Geschäftsmodelle

Der Nutzen einer KI-basierten Analyse von Produktions- und Qualitätsdaten liegt für Unternehmen der Solarzellenherstellung darin, Prozessfehler frühzeitig zu erkennen und zu bewerten sowie automatisiert Maßnahmen identifizieren zu können, um diese Fehler zu vermeiden. Generell können die Analysen dazu eingesetzt werden, die Produktionsstreuung zu reduzieren und den Solarzellenwirkungsgrad zu steigern. Mittel- bis langfristig werden KI-basierte Analysen auch die Selbstoptimierung von Prozessen und/oder ganzen Fertigungslinien ermöglichen. Zudem kann KI eingesetzt

⁸ Eine Verringerung der Verluste an den Kontakten von Solarzellen kann durch das Platzieren von bestimmten Materialkombinationen an den Kontakten erreicht werden, welche die Majoritätsladungsträger passieren lassen, während die Minoritätsladungsträger nicht rekombinieren. Solche selektiven passivierten Kontakte werden in den Konzepten TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) und POLO (Polysilizium auf Oxid) realisiert.

⁹ Heterojunction-Solarzellen verwenden eine spezielle Solarzellenstruktur, welche amorphes und kristallines Silizium nutzt.

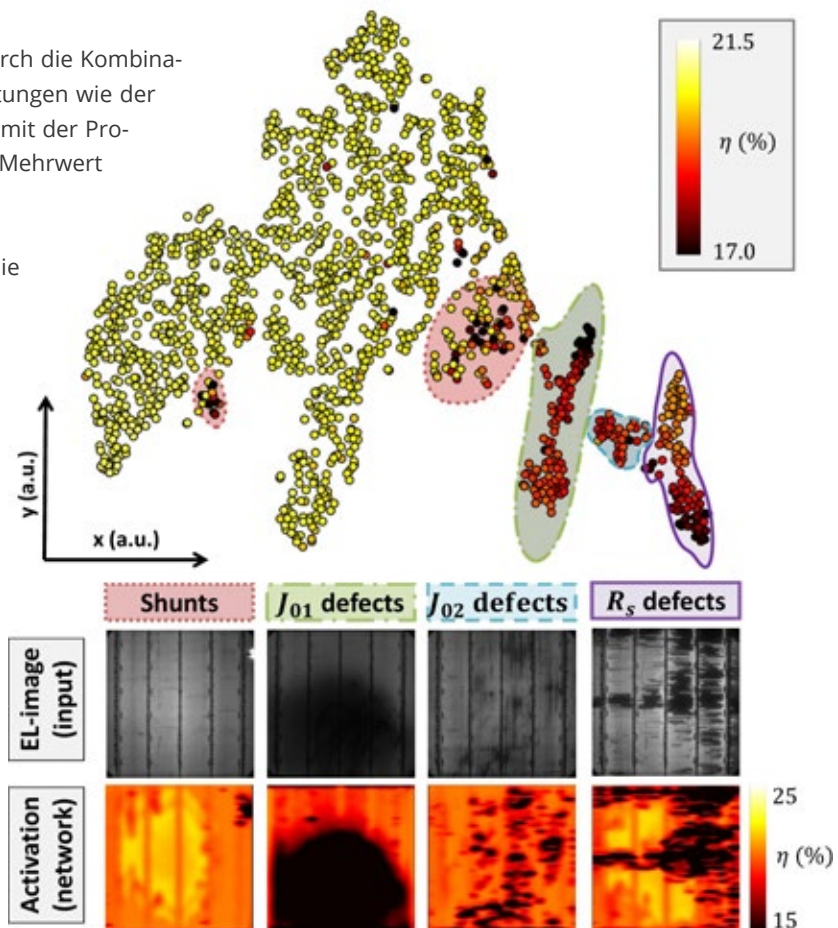
werden, um die Anlagenverfügbarkeit (Uptime), den Fabrikdurchsatz oder auch die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der Solarzellen zu optimieren. Entsprechende Degradationsmechanismen wie Potenzial-induzierte Degradation (PID) oder durch Licht und erhöhte Temperaturen induzierte Verluste (LeTID) können minimiert werden.

Für die Zulieferindustrie, zum Beispiel Maschinenbau-, Messtechnik- und Software-Dienstleistungs-Unternehmen, eröffnen sich neue Chancen und Geschäftsmodelle in sämtlichen heute angebotenen Leistungen:

- **Anlage:** Die mit zusätzlicher Digitalisierung ausgestattete hochwertigere Anlage lässt sich besser vermarkten. Durch eine Anbindung an entsprechende Clouddienste werden zum Beispiel aktuellste Algorithmen für die vorausschauende Instandhaltung oder zur automatisierten Prozessoptimierung nutzbar.
- **Verbrauchsmaterialien/-teile:** Durch die Kombination von Industrie-4.0-Dienstleistungen wie der Verbrauchsmaterialbeschaffung mit der Prozessanlage lässt sich ein neuer Mehrwert generieren.
- **Prozess und Herstelldaten:** Die durch Industrie 4.0 gewonnenen Prozessinformationen lassen sich als reine Daten oder als Prozess-Know-how (Verkauf als Prozessoptimierung) vermarkten. Es wird Wissen bereitgestellt, mit dem die Anwenderinnen und Anwender selbst weiter optimieren können. Durch intelligente Logistikkomponenten lassen sich Prozessinformationen (Temperatur, Konzentration etc.) direkt vor Ort sammeln, um den Herstellprozess zu steuern.
- **Qualitätsdaten/Datenverknüpfung:** Intelligenter Messgeräte ermöglichen neben der Identifikation auch eine Bewertung und Klassifikation auftretender Defekte am Werkstück,

wodurch die Anwenderinnen und Anwender in der Interpretation der Daten unterstützt werden. Durch eine algorithmische Verknüpfung von Qualitäts- und Prozessdaten sind mittelfristig auch neue Steuerungskonzepte des Herstellprozesses denkbar.

- **Instandhaltung und Service:** Bekannte Dienstleistungen können über erweiterte Realität (augmented reality), vorausschauende Instandhaltung als auch über Updates nach dem Verkauf angeboten werden.
- **Weiterbildung:** Es können Schulungen basierend auf Simulatoren digitaler Zwillinge stattfinden.
- **Neue Geschäftsmodelle zur Bereitstellung des Equipments:** Neue Ansätze wie „pay per use“ oder „production as a service“ können etabliert werden.



Dargestellt ist die Ableitung eines Digitalen Zwillinges in zweidimensionalem Raum, als komprimierte Version der gemessenen Daten einer Solarzelle. Hierbei wurden Daten aus Thermographie und Elektrolumineszenz kombiniert. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen Gruppen von Solarzellen mit ähnlichen Defekten (Mitte). Dieses Verfahren ermöglicht auch eine orts aufgelöste Analyse des Wirkungsgrades (unten).

4.1.3. Forschungsfelder der Digitalisierung in der Fertigung

Es besteht ein großer F&E-Bedarf entlang des gesamten Produktionsflusses von Wafern, Solarzellen, Modulen bis hin zu den Balance-of-System-Komponenten (BOS) von PV-Kraftwerken, um die vielfältigen Maschinen- und Prozessdaten während der Fertigung zu generieren und mit KI-basierten Methoden gewinnbringend zu analysieren und zu nutzen. Nachfolgend werden die wichtigsten F&E-Themenbereiche Datengeneration, digitaler Zwilling sowie KI-basierte Datenauswertung motiviert und erläutert. Der zugehörige detaillierte F&E-Bedarf ist in den entsprechenden Tabellen in Kapitel 4 aufgeführt.

Datengeneration

- Für die KI-unterstützte Produktionskontrolle und die Produktionsoptimierung ist die Erzeugung der relevanten Daten in den Produktionsmaschinen sowie mittels schneller inline-Messungen eine Grundvoraussetzung und somit von zentraler Bedeutung. Heutige Produktionsanlagen verwenden bereits vielfältige Sensoren und stellen die Daten über Schnittstellen der Produktion bereit. Zukünftig können neue, intelligente Multi-Sensoren entwickelt werden, die die vielfältigen Herstellungsschritte noch genauer beschreiben und somit eine noch präzisere Prozesssteuerung ermöglichen. Zudem können noch schnellere und vor allem kostengünstigere inline-Messungen entwickelt werden, die ein Echtzeit-Prozessmonitoring ermöglichen. Durch die KI-basierte verbesserte Prozesskontrolle werden der Wirkungsgrad, die Ausbeute und die Langzeitstabilität der Solarzellen und weiterer BOS-Komponenten optimiert und generieren somit einen zentralen Nutzen für die Produktion.

Austausch und Speicherung von Daten

- Die von den Maschinen erzeugten Daten müssen in zentrale Datenbanken transferiert werden, um dort analysiert und für die Prozesssteuerung verwendet werden zu können. Dafür müssen die Datenschnittstellen standardisiert werden und für eine bidirektionale Kommunikation für die direkte Anlagensteuerung weiterentwickelt werden. Zudem erfordern die riesigen Datenmengen eine Weiterentwicklung geeigneter Datenbanken für die Speicherung und Weiterverarbeitung der Produktionsdaten. Nicht zuletzt müssen die sehr heterogenen Daten aus verschiedenen Quellen für eine spätere Solarzellen-feine Auswertung einander zugeordnet

werden können, was einerseits Verfahren der Werkstückverfolgung (zum Beispiel Single-Wafer-Tracking oder Carrier-Tracking), andererseits datenbankseitig Verfahren der Kontexterfassung und -zuordnung erfordert. Die Regelung rechtlicher Aspekte zum Besitz und Zugriff auf Daten sowie der IP-Schutz für Prozessoptimierungen ist eine anspruchsvolle Aufgabe.

Digitaler Zwilling

- Der digitale Zwilling ist als „Virtuelle Repräsentation eines realen Objekts oder Prozesses“ definiert und kann sowohl auf die Werkstücke im Produktionsprozess als auch auf die Prozesse und Produktionsanlagen, aber auch Fertigungsstätten bezogen werden.
- Der digitale Zwilling einer realen Produktionsmaschine beinhaltet zum Beispiel die digitalen Konstruktionspläne und die Betriebssoftware der Anlage, kann aber auch ein digitales Modell des Herstellprozesses (zum Beispiel Plasmabeschichtung) sowie des erzielten Prozessergebnisses (zum Beispiel Schicht) umfassen, die gemessenen digitalisierten Prozessparameter (zum Beispiel Gasflüsse, Substrattemperatur) sowie auch Anlagenkomponenten (zum Beispiel Verschleißzustand der Vakuumpumpen oder des Wafer-Transportsystems). Der digitale Zwilling einer Produktionsanlage dient einerseits dazu, Prozessdaten für das Prozessmonitoring und die Prozessoptimierung bereitzustellen, wie im obigen Abschnitt zu Datengeneration ausgeführt. Die Entwicklung eines Prozessmodells erlaubt andererseits ebenfalls die Implementierung von Regelparametern zur automatischen Prozesssteuerung und Optimierung. Der digitale Zwilling kann auch für Verschleiß- und Uptime-optimierte Wartungskonzepte weiterentwickelt werden (vorausschauende Instandhaltung). Die Einbindung in eine Industrie-4.0-Umgebung könnte es zukünftig zudem erlauben, dass die Produktionsmaschine selbstständig neue Verbrauchsmaterialien nachbestellt oder bei Anlagenproblemen selber den Serviceeinsatz beauftragt.

KI-basierte Datenanalyse

- Bei der Solarzellenherstellung entstehen durch den komplexen Produktionsprozess und den extrem großen Durchsatz gigantische Datenmengen, die nicht mehr umfassend von einzelnen Fachkräften überblickt und ausgewertet werden können. Daher

bietet die moderne Solarzellenproduktion ein ideales Anwendungs- und Entwicklungsfeld für das „Big Data Mining“ mittels KI-unterstützten Softwarealgorithmen, die die Datenmengen selbständig nach neuen Zusammenhängen und Korrelationen durchsucht, um die Produktion zu optimieren. Aufgrund der großen Datenmengen ist hier selbstlernende KI-Software zu entwickeln, die kein aufwändiges manuelles Training mehr benötigt.

- Für die Maschinenbauindustrie bietet die KI-basierte Analyse die Möglichkeit, neue wichtige Prozessparameter und Regelparameter der Maschine zu identifizieren und dafür Selbstoptimierungsalgorithmen zu entwickeln. Zudem kann KI-Software dafür entwickelt werden, die Notwendigkeit für eine Anlagenwartung auf Basis von Sensordaten der Maschine vorherzusagen - (vorausschauende Instandhaltung).
- Im Bereich Messtechnik eröffnen KI-basierte Verfahren die Möglichkeit, intelligente Modelle der Defektklassifikation und -bewertung zu entwickeln und damit den Wert der erhobenen Daten zu steigern sowie Analysen signifikant zu beschleunigen. Damit können die Verfahren an die kontinuierlich steigenden Durchsatzanforderungen angepasst werden. Im Bereich der übergeordneten Datenanalyse auf Ebene von Leitsystemen oder Messtechnik-Clustern (wie zum Beispiel Zelltestern) eröffnen KI-basierte Verfahren die Möglichkeit, insbesondere die Daten des Werkstücks verknüpft zu analysieren - als digitaler Zwilling des Werkstücks. Daraus lassen sich Zusatzinformationen ableiten, um den Gesamtprozess zu optimieren.
- Da die KI-basierte Datenanalyse ein sehr komplexes und neuartiges Thema für viele Maschinenbau- und Messtechnik-Unternehmen darstellt und das Angebot an KI-Fachpersonal noch rar ist, können diese Entwicklungen in enger Zusammenarbeit zwischen Firmen und Forschungsinstitutionen entstehen. Darüber hinaus wären KI-Bausätze und weitestgehend standardisierte KI-Anwendungspakete wünschenswert, die Beispiellösungen für typische KI-basierte Maschinenanwendungen vorstellen und veranschaulichen.
- Eine langfristige Zukunftsvision ist es, mittels KI-basierter Datenanalyse eine selbstlernende und sich selbst optimierende Fabrik zu realisieren.

4.2. Digitalisierung der PV-Systeme und der PV-Integration in das Energiesystem

Neben der Digitalisierung der PV-Fertigung bietet sich auch bei PV-Systemen ein großes Innovationspotenzial durch digitale Methoden. Hier spannt sich ein weites Feld auf, welches vom PV-Kraftwerk über die Integration von PV-Strom in das Energiesystem bis hin zu neuen Geschäftsmodellen auf Systemebene reicht. In diesem Abschnitt werden ausgewählte Chancen und Herausforderungen sowie bestehender Forschungsbedarf aus diesem Bereich skizziert.



4.2.1. Stand der Technik und technologische Möglichkeiten

Eine umfassende Digitalisierung von PV-Systemen umfasst mehrere Schritte entlang einer Datenanalysekette. Zunächst muss entsprechende Sensorik installiert sein, sodass Daten an verschiedenen Punkten des PV-Systems und anhängigen Systemen aufgezeichnet werden. Über IT-Systeme und standardisierte Schnittstellen werden die Daten dann verfügbar gemacht. Entscheidend ist dabei auch eine Speicherung der Daten in geeigneten Auflösungen und für adäquate Zeiträume. Daten werden dann mittels klassischer Analyseverfahren und KI-Methoden analysiert. Analysemöglichkeiten werden jedoch noch mächtiger, wenn Daten verschiedener Kraftwerke und von verschiedenen Systemebenen verknüpft werden können, wie zum Beispiel Daten über PV-Systeme, die Struktur von Verteilnetzen und die Kostenstruktur von regulierten Dienstleistungen wie beispielsweise dem Netzbetrieb. Auf diese Weise können Geschäftsprozesse über die verschiedenen Beteiligten in einem System hinweg verknüpft und Abläufe automatisiert werden. Auch wird eine autonome Reaktion von PV-Systemen auf Signale aus dem Netz oder von Märkten ermöglicht. Die Umsetzung einer solch umfassenden Digitalisierung ist noch nicht erfolgt. Zudem sind noch einzelne technologische Entwicklungen erforderlich. Am Beispiel des Monitoring, der Ertrags- und Wetterprognosen sowie des Energiehandels sollen im Folgenden der Stand der Technik und die Möglichkeiten skizziert werden.

Das Monitoring von PV-Kraftwerken wird in Bezug auf Langlebigkeit und Ertragssicherung von PV-Kraftwerken eine wichtige Rolle spielen. Aktuell erfolgt das Monitoring jedoch häufig nur punktuell und auf hoher Systemebene ohne Betrachtung der Leistung der einzelnen Komponenten und ohne Verwendung moderner digitaler Verfahren. So wird beispielsweise Künstliche Intelligenz (KI) nur in sehr begrenztem Umfang zur Fehleridentifikation aus Strom-/Spannungsmessungen pro Modul genutzt. Fehlfunktionen von PV-Kraftwerken führen in der Regel zu hohen Folgekosten. Auf Basis der bisher etablierten Technik gibt es aktuell keine kosteneffizienten Standardlösungen, um eine detailliertere Messung und Fehleridentifikation zu ermöglichen. Aufgrund des hohen Kostendrucks bei PV-Kraftwerken führt dies dazu, dass einerseits im Investment an qualitativ hochwertigem Monitoring gespart wird, aber andererseits langfristig größere Kosten drohen. Dabei steigt der Wunsch nach qualitativ hochwertigen Anlagen, die nachhaltig und langlebig ausgelegt sind. Hierfür wäre ein Monitoring auf detaillierterem Level entscheidend. KI könnte Fehlerbildungen

auf Basis von Messungen pro Modul punktgenau zuordnen. Durch einen höheren Digitalisierungsgrad würde zudem der Vergleich von Anlagen, Komponenten und der Qualität möglich. Entsprechende Daten könnten bei Planung und Betrieb der Kraftwerke genutzt werden und langfristig mit in die Innovationen rund um die Komponentenverbesserung einfließen, indem diese Daten zu den Herstellern zurückgespielt werden. Das langfristige Ziel ist dabei eine Kombination von Sensorik und KI zur standardisierten Auswertung für verlässliche und portable Ergebnisse. Um diese Fehleridentifikation nachhaltig angehen zu können, muss ebenfalls beim Bau und beim Betrieb bzw. der Wartung des Kraftwerks weiter in Richtung der Digitalisierung vorangeschritten werden. So ist ein detailliertes Dokumentieren der Anlage selbst bisher nur aufwändig möglich und wird oftmals nur bedingt vorgenommen. Damit mangelt es teils an zentralen Informationen zur weiteren Auswertung rund um die verbauten Komponenten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Planung und den Betrieb von PV-Kraftwerken sind Ertrags- und Wetterprognosen. Für den Entwurf der Anlagen werden langfristige Vorhersagen benötigt, die insbesondere die verwendeten Zell- und Modultechnologien sowie aktuellste Wettermodelle umfassen müssen. Für den Betrieb und den Verkauf des erzeugten Stroms sind sowohl mittelfristige Vorhersagen im Zeitraum von einem Tag bis zu einer Woche sowie kurzfristige Vorhersagen bis zu einer Auflösung von wenigen Minuten relevant. Optimierungspotenzial besteht insbesondere noch bei der Verfügbarkeit von lokalen Wetterdaten und Planungstools, zum Beispiel für die gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV). Auch müssen Veränderungen durch den Klimawandel sowie neueste PV-Technologien mit einbezogen werden. Die Qualität der Prognosen könnte durch Verfahren künstlicher Intelligenz signifikant verbessert werden. Als langfristige Vision bietet die Entwicklung eines digitalen Zwillings von PV-Systemen große Möglichkeiten, unter anderem für den Vergleich von theoretischem und praktischem Zustand sowie die Korrektur von Wetter- und Ertragsmodellen unter Ausschluss von Schädigungseffekten.

Zudem bieten sich auch beim Energiehandel von Energiemengen und Leistung aus Photovoltaik sowie Netz- und Systemdienstleistungen der PV-Systeme große Chancen durch digitale Methoden. Hierbei gilt es die Besonderheiten der Photovoltaik, wie beispielsweise die volatile Verfügbarkeit, geringe Betriebskosten sowie die Heterogenität der PV-Systeme intelligent zu berücksichtigen. Entscheidend ist zunächst eine IKT-Anbindung der PV-Anlagen mit ausreichenden Datenraten, zum

Beispiel durch einen Netzanschluss oder 5G, sowie mit standardisierten Schnittstellen und Protokollen. Die Technologien sind prinzipiell verfügbar, jedoch muss eine optimale Auswahl, Anpassung und Adaption für die Photovoltaik durchgeführt werden. Eine weitere Voraussetzung ist, dass entsprechende Daten gespeichert und verfügbar gemacht werden. Auf Basis der Datenanalyse kann die Prognose des PV-Angebots und Bedarfs mit unterschiedlichen Zeithorizonten verbessert werden, um schließlich intelligente PV-Betriebs-Optimierungssysteme für die Umsetzung und Markt-Integration realisieren zu können.

4.2.2. Nutzen, Mehrwert und innovative Geschäftsmodelle

Im Bereich der Systemtechnik können die verschiedenen Beteiligten insbesondere von Kostenreduktionen durch Digitalisierung in verschiedenen Bereichen profitieren. Das betrifft unter anderem Anlagenbetriebsgesellschaften, Betriebsfirmen von IKT-Plattformen, Installationsunternehmen, EPCs (Entwicklung, Beschaffung und Realisierung), O&M (Betrieb und Instandhaltung), Energieversorgungsunternehmen sowie Anbietende von PV-Systemkomponenten. Viele potenzielle Geschäftsmodelle werden durch komplexe Geschäftsprozesse unwirtschaftlich. Eine Automatisierung dieser Prozesse ermöglicht neue Geschäftsmodelle. Durch nationale und internationale Standardisierung von verschiedenen Datenschnittstellen können neue Geschäftsmodelle leicht auf eine große Anzahl von Kundenschaft skaliert werden. Verschiedene Systemagierende können durch eine erhöhte Verfügbarkeit verlässlicher Daten ihre Planungsprozesse optimieren und so Kosten durch beispielsweise unnötig hohe Rückstellungen vermeiden.

So ermöglicht ein optimiertes Monitoring von PV-Kraftwerken letztlich Mehrerträge für die Betreiberinnen und Betreiber. Ertragsausfälle können reduziert werden, die Leistungsausbeute (Performance Ratio) der Kraftwerke wird erhöht. Aber auch der Bereich O&M könnte durch digitale Verfahren wie predictive Maintenance (vorausschauende Instandhaltung) den Aufwand reduzieren. Intelligente Verfahren könnten zudem Vorhersagen des Verschmutzungsgrades und damit optimierte Reinigungsintervalle ermöglichen. Zudem würde den EPCs eine effizientere und gezieltere Planung ermöglicht, wodurch auch schwierigere Standorte und Märkte, zum Beispiel bei notwendiger gezielter Vorhersage, erschlossen werden könnten. Ebenso könnten Industrie und die Wissenschaft durch eine umfangreichere Datenverfügbarkeit und -analyse eine bessere Bewertung und ein tieferes Verständnis von PV-Systemen erhalten.

Durch Ertrags- und Wetterprognosen auf Basis neuester Digitalisierungsmethoden könnten Wetterdienste und die Energiemetrologie standardisierte Dienste mit einer höheren zeitlichen und räumlichen Genauigkeit anbieten und dadurch neue Kundenkreise erschließen. Kraftwerksbetreiberinnen und -betreiber würde eine genauere Prognose des Ertrags und somit eine bessere Vermarktung der erzeugten Energie ermöglicht. Auch für Netzbetreiberinnen und -betreiber böten sich neue Möglichkeiten in Bezug auf die lokale Optimierung des Energieübertragungssystems und insbesondere des Netzausbaus. Letztlich würden durch feinere Prognosen neue Geschäftsmodelle sowohl auf lokaler Ebene, zum Beispiel bei Kleinanlagen im Schwarmbetrieb (PV Cloud), als auch auf nationaler Ebene im Zuge eines Risikomanagements durch gekoppelte Wetter- und Ertragsprognosen für ganz Deutschland ermöglicht.

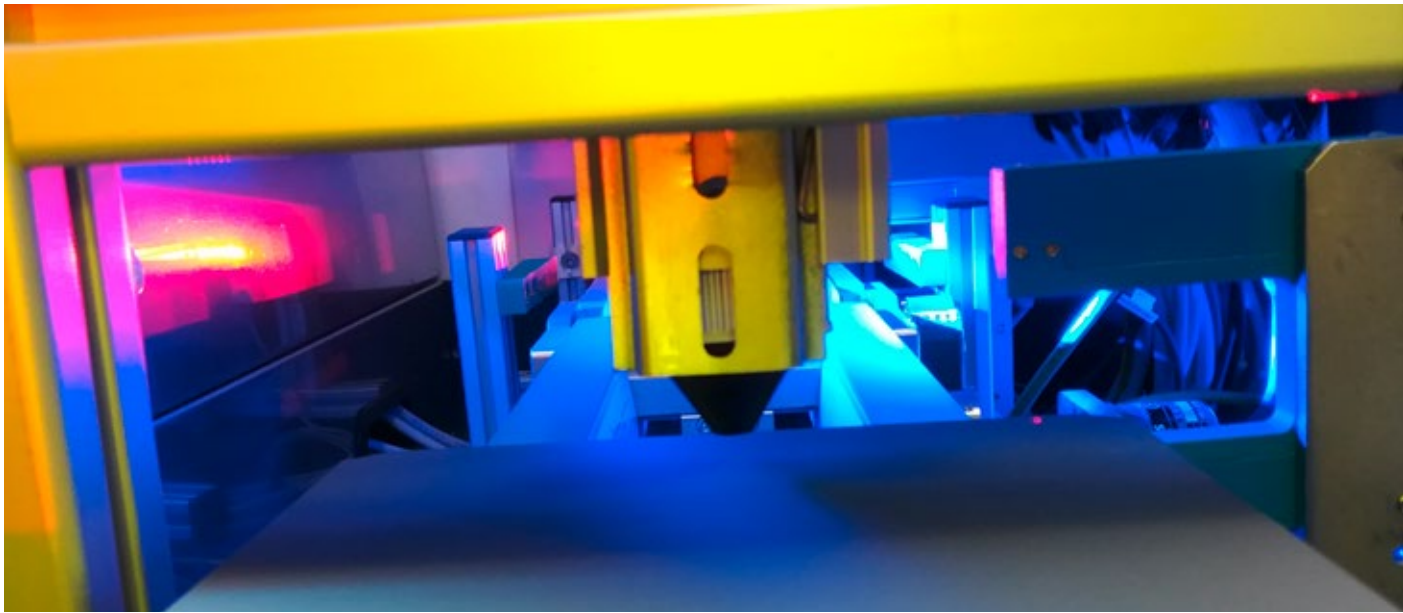
Auch in Bezug auf die Vermarktung von PV-Strom und Systemdienstleistungen ermöglicht ein höherer Grad der Digitalisierung der PV-Kraftwerke neue Chancen. Die ökonomische Optimierung könnte langfristige Investments, momentane Betriebskosten sowie das Marktverhalten kombinieren und auf diese Weise die Kosten des PV-Stroms senken und höhere Erträge für den Kraftwerksbetrieb ermöglichen. Detaillierte Daten für den Energie- und Servicedienstleistungsmarkt ermöglichen eine entsprechende Marktoptimierung. Dadurch können die Kosten des Energieversorgungssystems reduziert und die Erträge für Netzbetreibende und Energieversorgungsunternehmen erhöht werden. Auch die Möglichkeiten virtueller Kraftwerke für Pooling und Leistungsausgleich würden vergrößert. Des Weiteren werden neue Vertriebskonzepte wie Ertragsversicherungen oder neue Contracting-Modelle durch datengestützte Risiko- & Ertragsberechnungen möglich.

4.2.3. Forschungsfelder der Digitalisierung bei PV-Systemen und ihrer Integration

Für die Nutzung der Chancen der Digitalisierung und der Realisierung neuer möglicher Geschäftsmodelle ergeben sich eine Reihe von Schwerpunkten für die zukünftigen Forschungsbedarfe, die anhand der Datenanalysekette skizziert werden. Weitere Details und konkrete Forschungsthemen finden sich in den Tabellen im hinteren Teil des Dokuments.

Datengeneration

- Zunächst muss festgelegt werden, welche Daten für welche Auswertung in welcher Qualität und



Dichte erforderlich sind und wie mit Datenlücken und rechtlichen Aspekten umgegangen werden kann.

- Für die Aufzeichnung ist die Entwicklung spezieller und kostengünstiger Sensorik bzw. die Nutzung vorhandener Sensorik entscheidend. Unter anderem wird sie eingesetzt für modulgenaue Messungen, die Identifikation des Verschmutzungsgrads oder die Ertragsprognose, also die landesweite dynamische Erfassung von Wetterdaten, zum Beispiel durch den Abruf von Licht- und Regensensorik in Kraftfahrzeugen.
- Schließlich bedarf es einer kostengünstigen Interoperabilität und Konnektivität aller Geräte und Systeme, auch an schwierigen Standorten und Einbauorten.

Austausch und Speicherung von Daten

- Ein Schwerpunkt betrifft auch die Entwicklung von gemeinsamen und standardisierten Datenbanken, die von der Produktion über den Betrieb bis zum Recycling reichen und einen Datenaustausch über alle Beteiligten sicherstellen. Dabei ist insbesondere auf eine durchgehende Datenkette von der Installation bis zum Monitoring zu achten.
- Zudem sollen Schnittstellen erarbeitet werden, welche die Interoperabilität der verschiedenen Komponenten und Systeme ermöglichen und langfristig, also ca. 30 Jahre, ohne Nachrüstung zukunftsfähig sind. Diese Schnittstellen sollen international harmonisiert werden, um Anpassungs-

bedarfe der darauf aufsetzenden Lösungen zu minimieren und so den Export zu erleichtern und die Kosten zu reduzieren.

- Alle Informations- und KI-basierten Lösungen erfordern eine hohe Sicherheit der Daten und der IT-Systeme. Hier besteht die Notwendigkeit, auch die besonderen Anforderungen der Energiebranche in der Entwicklung von Sicherheitsarchitekturen zu berücksichtigen.

KI-basierte Datenanalyse

- Es besteht ein Bedarf an der Entwicklung von automatisierten KI-Auswertungsmethoden und Mustererkennung in großen Datenmengen. Diese sollten eine automatische Handlungsempfehlung unter Rücksichtnahme auf den Return-on-Investment ermöglichen. Dies wird unter anderem zur Korrelation von physikalisch beobachteten Modul- bzw. Systemfehlern und der Zuordnung von Abhilfemaßnahmen genutzt werden (zum Beispiel durch Reparaturmaßnahmen oder vorausschauende Instandhaltung).
- KI-basierte Wetter- und Ertragsprognosen müssen sowohl für Planungsprozesse als auch für sensorbasierte Kurzzeitwetterprognosen unter Einbeziehung von remote sensing entwickelt werden.
- Ein KI-gestützter Vergleich der Performance von PV-Systemen im Feld mit Messergebnissen an Systemkomponenten während deren Herstellung kann die Langlebigkeit und den Ertrag des PV-Systems erhöhen. In diesem Zusammenhang ist

auch die Entwicklung von Standards entscheidend, mit denen die Langlebigkeit von Kraftwerken mit neuen Technologien bewertet werden können. Darunter fällt auch die Bewertung von Engineering-Tools zur idealen bzw. langlebigen Kraftwerksauslegung unter Einbeziehung der Handelsmöglichkeiten.

- Realisierung von Digitalen Zwillingen von PV-Systemen.

Verwertung von Daten in neuen Geschäftsmodellen

- Viele der absehbaren Geschäftsmodelle sind kleinteilig und benötigen spezialisierte Lösungen. Hier müssen modulare Lösungen erarbeitet werden, die leicht auf ähnliche Problemstellungen übertragen werden können. Gerade im Bereich industrieller Lasten, bei Quartieren und Mikro-netzen besteht hier enormes Einsparpotenzial.
- Kleinteilige Geschäftsmodelle können nur dann funktionieren, wenn sie größtenteils automatisiert oder autonom ablaufen. Hier besteht noch Forschungsbedarf dazu, wie Geschäftsprozesse mittels KI-Methoden automatisiert und flexibel auf zusätzliche Märkte und Kunden angepasst werden können, unter anderem für die Betriebsoptimierung lokaler PV-Anlagen.
- Die neuen digitalen PV-Geschäftsmodelle müssen ökonomisch, juristisch und steuerlich untersucht werden: Der Nutzen muss optimiert und die Wirkungen der unterschiedlichen Ansätze müssen erforscht werden.
- Die optimalen, PV-gerechten Rahmenbedingungen für die PV-Teilnahme am Handel für Energie und Systemdienstleistungen müssen identifiziert werden. Hierbei muss auch analysiert werden, welche PV-Daten der Handel benötigt, um optimal zu funktionieren. Eine weitere Frage ist, ob regionale Bilanzkreise und Energiehandelsplätze gegebenenfalls angepasst werden müssen.
- Es müssen akzeptierte Standards für Daten und Benchmarks definiert werden, die den ordnungsgemäßen Betrieb von Anlagen vertragstauglich nachweisen.

5. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARF

DATENGENERATION	MEHRWERTE	UMSETZUNG BIS [2024, 2028, 2035]
Nutzung vorhandener Anlagensensoren für eine erweiterte Prozess-/Wartungsüberwachung	Kurzfristiges Potenzial für ein verbessertes Monitoring der Solarzellenproduktion	2024
Welche Daten, zum Beispiel von PV-Systemen, sind für welche Auswertung in welcher Qualität und Dichte erforderlich? Wie kann mit Datenlücken umgegangen werden?	Basis für eine effiziente, effektive und kostengünstige Strategie zur Hardwareinstallation und softwarebasierten Auswertung	2024
Entwicklung spezieller und kostengünstiger oder Nutzung vorhandener Sensorik etwa für modulgenaue Messungen, Identifikation des Verschmutzungsgrads, Ertragsprognose	Verbesserte Analysen und Prognosen reduzieren Betriebskosten und erhöhen den Energieertrag	2024
Logistik-Tracking: Entwicklung von Verfahren der virtuellen und aktiven Waferidentifikation, Entwicklung eines durchgängigen Material-trackings über die gesamte Wertschöpfungskette (vom Ingot bis ins System)	Basis für die Zuordnung und Verfolgung von Qualitäts- und Prozessparametern bei nicht-Beschreibbarkeit von Produkten	2024
Entwicklung intelligenter Logistikkomponenten in der Produktion für die Prozessdatenerfassung und -steuerung	Neue Lösungen, die die Zuordnung der Daten zu einzelnen Produkten ermöglichen	2028
Entwicklung schneller in-line Messtechnik für echtzeitfähige (realtime) Prozesssteuerung: Neben den Anforderungen an die "High End"-Messtechnik (genauere Messungen, schnellere Messungen etc.) gibt es beträchtlichen Bedarf an günstigen Messtechniken, die deutlich zahlreichere Messungen erlauben	Echtzeit-Prozesskontrolle und damit Verringerung von Streuung und Ausreißern in der Produktion sowie Verbreiterung der Datenbasis für Maschinelles Lernen in der Produktion	2028
Wie kann die Interoperabilität und Konnektivität aller Geräte und Systeme kostengünstig realisiert werden, auch an schwierigen Standorten und Einbauorten?	Umfassende und günstige Datenverfügbarkeit als Basis für datengetriebene Analysen und Geschäftsmodelle	2028
Entwicklung von intelligenten, autarken Multi-Sensoren für Erfassung relevanter Maschinen- und Produktionsdaten sowie geeigneter Anwendungen der erzeugten Daten	Verbreiterung der Datenbasis für eine KI-unterstützte Steuerung und Optimierung der Solarzellen- bzw. Komponentenproduktion (Module, BOS etc.)	2035

AUSTAUSCH UND SPEICHERUNG VON DATEN	MEHRWERTE	UMSETZUNG BIS [2024, 2028, 2035]
Entwicklung von gemeinsamen und standardisierten Datenbanken, die von der Produktion über den Betrieb bis um Recycling reichen und einen Datenaustausch über alle Beteiligten sicherstellen: Dabei ist insbesondere auf eine durchgehende Datenkette von der Installation bis zum Monitoring zu achten.	Produktions- und Betriebsoptimierungen werden durch Big-Data-Analysen und KI entlang der gesamten Datenkette ermöglicht.	2024
Wie kann die Sicherheit der Daten und der IT-Systeme aller Informations- und KI-basierten Lösungen garantiert werden?	Geeignete Architekturen und Methoden garantieren die Sicherheit der Daten und IT-Systeme entsprechend der besonderen Anforderungen der Energiebranche.	2024
Entwicklung von KI-Methoden zur Fusion und Kompression von Daten aus verschiedenen Datenquellen	Hochaufgelöste Messdaten können nicht effizient gespeichert werden, weshalb effiziente Datenspeicherung notwendig ist, die zum Beispiel Datenquellen kombiniert und eine Korrelation zur Qualitätssicherung und Produktionskontrolle ermöglicht.	2024
Entwicklung von Konzepten zur Sicherung von Daten in Clouds und Regelung von Zugriffsrechten	Technische Voraussetzungen für ein Cloud-Computing werden geschaffen und der Nutzen von globaler/lokaler Datenverarbeitung für verschiedene Szenarien evaluiert.	2024
Standardisierung von Schnittstellen in der Produktion und PV-Systemen: Sowohl die verwendete Sensorik als auch das Datenmanagement (Datenformat, Datenspeicherung bzw. der Datentransfer) müssen zwischen den einzelnen Beteiligten (auch international) abgestimmt werden.	Die Standardisierung von Schnittstellen ermöglicht die Erfassung aller relevanten Produktionsdaten in zentralen Datenbanken sowie den Austausch von Daten zwischen den Produktionsanlagen zur Prozesssteuerung. Die Interoperabilität der verschiedenen Komponenten und Systeme wird langfristig (30 Jahre) ohne Nachrüstung sichergestellt.	2028
Entwicklung von Anlagenschnittstellen zur vereinfachten und flexiblen Anbindung der Produktionsmaschine in die vorhandene Dateninfrastruktur der Fabrik	Schnelle und möglichst standardisierte IT-Einbindung von neuen Maschinen in die Produktionsdatenumgebung (mit einfachen Protokollen)	2028
Erweiterung der Produktionsanlagen-schnittstellen für eine bidirektionale Kommunikation zur echten Anlagensteuerung durch Advanced Process Control (APC)-Algorithmen	Ermöglichung von direkter Steuerung der Produktionsmaschinen durch die (KI-unterstützte) zentrale Datenanalyse und Steuerungssoftware (MES = Manufacturing Execution System) der Fabrik	2028
Weiterentwicklung von objekt- und graphbasierten Datenbanken für die Produktionskontrolle und Entwicklung von Verfahren zur automatisierten Kontexterfassung und -zuordnung	Erweiterung der Datenbasis (auch unstrukturierte Daten) und Verbesserung der Datenqualität (Erfassung Metadaten) für die KI-unterstützte Produktionsoptimierung	2028
Wie kann die Interoperabilität und Konnektivität aller Geräte und Systeme kostengünstig realisiert werden, auch an schwierigen Standorten und Einbauorten?	Umfassende und günstige Datenverfügbarkeit als Basis für datengetriebene Analysen und Geschäftsmodelle	2028

DIGITALER ZWILLING	MEHRWERTE	UMSETZUNG BIS [2024, 2028, 2035]
Entwicklung von Konzepten zur Sicherung von Daten in Clouds und Regelung von Zugriffsrechten	Technische Voraussetzungen für ein Cloud-Computing werden geschaffen und der Nutzen von globaler/lokaler Datenverarbeitung für verschiedene Szenarien evaluiert.	2024
Entwicklung von Best-Practice Beispielen Digitaler Zwillinge	Visualisierung der Vorteile Digitaler Zwillinge	2024
Weiterentwicklung der Maschinenmodellierung zum Beispiel von Verschleißteilen zur KI-basierten möglichst umfangreichen Implementierung einer vorausschauenden Instandhaltung, die nicht mehr auf Zeitplänen sondern auf dem aktuellen Anlagenzustand basiert	Entwicklung einer durchgehenden vorausschauenden Instandhaltung zur Reduktion der Betriebskosten	2028
Umsetzung von Modellen in Quellcode	Austauschbare Software-Plattformen zur Beschleunigung der Entwicklung und Implementierung	2028
Entwicklung von Standards für die Simulationsschnittstellen	Deutliche Beschleunigung der Adaption von Simulationsmodulen in übergreifende Modelle	2028
Zentrale Simulationsplattform, multi-user-fähig mit proprietären Anteilen zum Schutz der Kernkompetenzen	Absenkung der Barrieren zum Austausch von Daten	2028
Methoden zur Verbesserung der Abbildung der Digitalen Zwillinge	Akkurate Modellierung aufgrund der Präzision der Messdaten, um den Wert des Digitalen Zwillinges aufgrund erhöhter Abbildungsschärfe zu verbessern	2028
Wie kann die Interoperabilität und Konnektivität aller Geräte und Systeme kostengünstig realisiert werden, auch an schwierigen Standorten und Einbauorten?	Umfassende und günstige Datenverfügbarkeit als Basis für datengetriebene Analysen und Geschäftsmodelle	2028
Entwicklung von Multi-Skalen- und Meta-Modellen von Herstellprozessen, Produktion und Produkten sowie deren Komponenten und deren Evaluierung	Ganzheitliches Verständnis und Optimierungsansätze der PV-Produktion, die einen Einsatz von KI-Methoden ermöglichen und somit zur Verbesserung der Güte der Produkte beitragen	2035
End-User Modelle von photovoltaischen Produkten im Lebenszyklus	Frühzeitiges Erkennen und Verstehen von leistungsmindernden Degradationsmechanismen im Feld und Zuordnung zu spezifischen Randbedingungen	2035
Entwicklung von Digitalen Zwillingen der gesamten Produktion als Basis einer selbstlernenden Fabrik (Vision)	Beschleunigung der Optimierungszyklen durch automatisierte Analyse aller verfügbaren Daten	2035

KI-BASIERTE DATENANALYSE	MEHRWERTE	UMSETZUNG BIS [2024, 2028, 2035]
Entwicklung von Konzepten zur Sicherung von Daten in Clouds und Regelung von Zugriffsrechten	Technische Voraussetzungen für ein Cloud-Computing werden geschaffen und der Nutzen von globaler/lokaler Datenverarbeitung für verschiedene Szenarien evaluiert.	2024
Entwicklung von automatisierten KI-Auswertungsmethoden und Mustererkennung in großen Datenmengen von PV-Systemen mit automatischer Handlungsempfehlung unter Rücksichtnahme auf den Return-on-Investment.	Unter anderem: Korrelation von physikalisch beobachteten Modul- bzw. Systemfehlern und Zuordnung von Abhilfemaßnahmen (Reparaturmaßnahmen, vorausschauende Instandhaltung)	2028
Identifizierung relevanter Maschinenparameter, die die Zielgrößen der Kundschaft beeinflussen, durch Maschinenbauunternehmen sowie Entwicklung dafür geeigneter Selbstoptimierungsalgorithmen	Selbstoptimierende Produktionsanlagen	2028
Methoden zur Verbesserung der Abbildung der Digitalen Zwillinge	Akkurate Modellierung aufgrund der Präzision der Messdaten, um den Wert des Digitalen Zwillings aufgrund erhöhter Abbildungsschärfe zu verbessern	2028
Wie kann die Interoperabilität und Konnektivität aller Geräte und Systeme kostengünstig realisiert werden, auch an schwierigen Standorten und Einbauorten?	Umfassende und günstige Datenverfügbarkeit als Basis für datengetriebene Analysen und Geschäftsmodelle	2028
Entwicklung KI-unterstützter Konzepte für vorausschauende Instandhaltung, bei denen die Prozessanlage selber durch geeignete Sensorik und Messtechnik lernt und mitteilt, wann eine Wartung bzw. ein Teileaustausch erforderlich ist	Verbesserung der Anlagen-Uptime durch effizientere Wartung	2028
Entwicklung von KI-basierten Wetter- und Ertragsprognosen	Optimierte Planungsprozesse und sensorbasierte Kurzzeitwetterprognosen unter Einbeziehung von remote sensing	2028
Methoden zum Vergleich von PV-Kraftwerken und PV-Systemen sowie zur Analyse der Übertragbarkeit von Labortests (zum Beispiel IEC) auf Basis von KI-Technologien	Unter anderem: Standards zur Langlebigkeitsbewertung von Kraftwerken mit neuen Technologien und Engineering-Tools zur idealen (langlebigen) Auslegung unter Einbeziehung der Handelsmöglichkeiten	2028
Entwicklung von Digitalen Zwillingen der gesamten Produktion als Basis einer selbstlernenden Fabrik (Vision)	Beschleunigung der Optimierungszyklen durch automatisierte Analyse aller verfügbaren Daten	2035

KI-BASIERTE DATENANALYSE	MEHRWERTE	UMSETZUNG BIS [2024, 2028, 2035]
Entwicklung KI-basierter Software, welche die großen Datenmengen während der Produktion automatisch nach Zusammenhängen, Korrelationen und Effekten analysiert und daraus Verbesserungsmaßnahmen für die Steigerung des Zellwirkungsgrades, der Solarzellenzuverlässigkeit, der Anlagen-Uptime, der Produktivität ableitet (Data Mining von Messdaten, Bildanalyseverfahren)	Verbesserte Produktionskontrolle, KI-unterstützte Steigerung von Produktkennzahlen wie Wirkungsgrad, Qualität, Ausbeute etc.	2035
Perspektivische Entwicklung selbstlernender KI-Software-Systeme aufgrund der großen Datenmengen	Schnelle Datenauswertung mit geringem Trainingsaufwand	2035
Verbesserung der Interaktion zwischen Mensch und Computer	Unterstützung bei der Anpassung von Prozessparametern, zum Beispiel automatische Einrichtung von Messsystemen; Korrektur von Sortierkriterien durch Menschen, zum Beispiel Korrektur der Zelltester-Sortierung; Verständnis für Entscheidung des KI-Systems	2035
Methoden zur schnellen Anpassung von erlernten Bewertungsmodellen (Transfer-Lernen, Few-Shot Lernen)	Anpassung / Übertragung der erlernten Modelle auf neue Messtechnik, Produkte und Prozesse	2035
KI-Bausätze/Anwendungspakete, die Anwendungsmöglichkeiten und Nutzen verschiedener KI-Softwarelösungen vorstellen und an Beispiellösungen veranschaulichen: Das Angebot an verschiedenen KI-Softwarepaketen ist groß, die Maschinenbauunternehmen und andere PV-Firmen und -Institute haben aber eher zu wenige Informatik-Fachkräfte, die KI-Methoden kennen.	Bereitstellung von „KI-Baukästen“ für PV-Zulieferindustrie zur Reduktion des Entwicklungsaufwandes	2035

VERWERTUNG VON DATEN IN NEUEN GESCHÄFTSMODELLEN	MEHRWERTE	UMSETZUNG BIS [2024, 2028, 2035]
Wie sehen optimale regulatorische, ökonomische und steuerliche Rahmenbedingungen für datengetriebene Geschäftsmodelle aus? Wo besteht Anpassungsbedarf?	Kostengünstige, möglichst automatisierte Regularien (low-cost Zählerwesen, Eichrecht etc.) ermöglichen Geschäftsmodelle mit dezentralen Erzeuger-Betrieben in Privatbesitz.	2024
Verbrauchsmaterialien/-teile: Kombination von Industrie-4.0-Dienstleistungen wie der Verbrauchsmaterialbeschaffung mit der Prozessanlage	Erhöhung des Mehrwertes der Produktionsanlage, indem sie sich selber um die Beschaffung der Verbrauchsmaterialien kümmert	2028
Wie können Geschäftsprozesse mittels KI-Methoden automatisiert und flexibel sowie modular auf zusätzliche, kleinteilige Märkte sowie Nutzerinnen und Nutzer, zum Beispiel industrielle Verbraucher, Quartiere etc. angepasst werden?	Realisierung kleinteiliger Geschäftsmodelle auf Basis größtenteils automatisiert oder autonom ablaufender Prozesse/Einsparungen im Bereich industrieller Lasten, bei Quartieren und Micronetzen	2028
Optimierung des Betriebs lokaler PV-Anlagen	Zum Beispiel optimierter Eigenverbrauch und Handels-Leistungserbringung, um unter anderem dezentralen Peer-to-Peer-Handel mit den Nachbarn (etwa mit Blockchain-Nutzung) zu ermöglichen	2028
Entwicklung neuer Geschäftsmodelle zur Bereitstellung des Equipments wie zum Beispiel „pay per use“ oder „production as a service“	Reduktion der Investitionskosten von neuen Fabriken/Bereitstellung von Produktions-Know-how durch Maschinenbauunternehmen	2035

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

5G	Mobilfunkstandard der fünften Generation
ALD	Atomic Layer Deposition (Atomlagenabscheidung)
APC	Advanced Process Control
BIPV	Gebäudeintegrierte Photovoltaik
BOS	Balance of System
COP21	21. UN-Klimakonferenz
EPC	Unternehmen in Entwicklung, Beschaffung und Realisierung
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable
GW	Gigawatt
IEC	International Electrotechnical Commission
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
LeTID	Light and elevated Temperature Induced Degradatio (durch Licht und erhöhte Temperaturen induzierte Degradation)
MES	Manufacturing Execution System (Produktionsleitsystem)
O&M	Betrieb und Instandhaltung
PECVD	Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell
PID	Potenzial-induzierte Degradation
POLO	Polycrystalline Silicon on Oxide
PV	Photovoltaik
Si	Silizium
SiN	Siliziumnitrid
TOPCon	Tunnel Oxide Passivated Contact
TW	Terawatt

