

Digitalisierung bei der Produktion von Solar- und Batteriezellen

Die Digitalisierung von Maschinen und Produktion ist kein so modernes Thema wie es scheint. Bereits im 18. Jahrhundert wurden Walzen zur Steuerung von Webstühlen eingesetzt, 1805 erfolgte dann mit Einführung des Jacquard-Webstuhls binäre digitale Produktion auf der Basis von leichter austausch- und ergänzbaren Lochkarten [1]. Weitere Meilensteine der Digitalisierung mit großem Einfluss auf die Produktionstechnologien waren die Einführung der digitalen Fernkommunikation mit Samuel Morses Telegraph im Jahre 1837 sowie die Z3, mit der Konrad Zuse im Jahr 1941 erstmals komplexe Rechenoperationen digital abbilden konnte. Seither haben sich alle ca. 5 Jahre die Kosten für eine Million standardisierter Operationen verzehnfacht [2].

Welche Rolle kann die Digitalisierung in der Produktion stromtragender Bauelemente der Energiewende spielen? Hierzu lohnt es sich, die wachsenden Herausforderungen zu betrachten:

- schnell wachsende Märkte und globaler Wettbewerb (bspw. Silizium-Solarzellen, Lithium-Batterien, ProtonExchangeMembrane (PEM)-Brennstoffzellen)
- zunehmende Komplexität und Vielfalt der Produkte
- zunehmende Produktivität der Produktion
- steigende Anzahl der Akteure und Sensoren (Big Data)

Der durch die Digitalisierung angestrebte Nutzen liegt insbesondere in der zentralen digitalen Erfassung und Auswertung aller Abläufe und anfallenden Daten, um so Prozesse und Produktionsabläufe automatisiert zu optimieren und damit die Performanz

einer Produktion zu verbessern und Produktionskosten zu reduzieren.

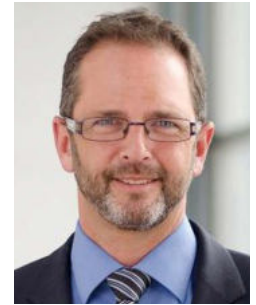
Digitalisierung innerhalb der Photovoltaik-Produktion

Wir haben hier Produkte entlang der Wertschöpfungskette, die vom Rohstoff Quarz über die Siliziumherstellung bis zum System reicht. Die PV-Produkte werden üblicherweise quasistatisch betrachtet, bei Themen wie Degradation aber auch dynamisch. Demgegenüber grundsätzlich dynamischer Natur sind die Prozesse, die in der Produktion zu betrachten sind, exemplarisch in der Prozesskette zur Herstellung einfacher Siliziumsolarzellen.

Als Reallabor zur Evaluation neuer Solarzellen-Technologien verwendet das Fraunhofer ISE das PV-TEC (Technologie-Evaluations-Centrum). Ergänzt um die vorhergehenden und nachfolgenden Stufen der Silizium-Scheiben und Modul-Herstellung bildet das Fraunhofer ISE die Wertschöpfungskette als F+E-Dienstleistungszentrum für die Photovoltaik ab.

Von der Fab zur Smart Fab – Herausforderungen und Lösungsansätze

Die Produktion von stromtragenden Bauelementen wie Solarzellen sieht sich, abgeleitet von den oben genannten übergeordneten Herausforderungen, zunehmend auch digitalen Herausforderungen gegenüber. Die nachfolgende Tabelle stellt Herausforderungen in der Silizium-Solarzellen-Technologie deren digitalen Lösungsansätzen gegenüber.

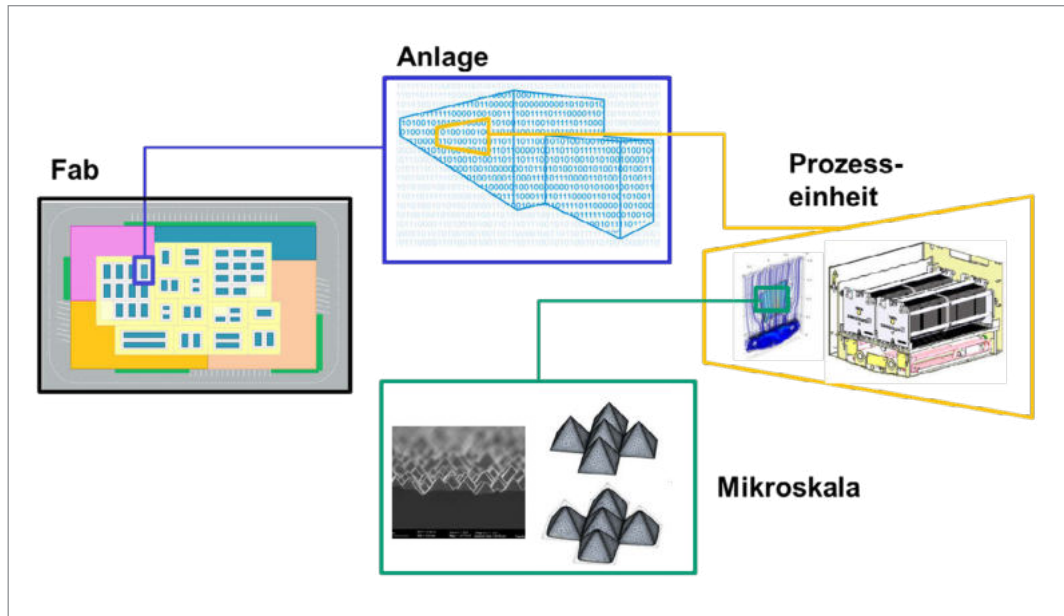


Fraunhofer ISE
 Dr. Ralf Preu
 ralf.preu@ise.fraunhofer.de
 Dr. Stefan Rein
 rein@ise.fraunhofer.de
 Dr. Martin Zimmer
 martin.zimmer@ise.fraunhofer.de

KIT
 Prof. Dr. Jürgen Fleischer
 juergen.fleischer@kit.edu
 Hannes Weinmann
 hannes.weinmann@kit.edu
 Janna Hofmann
 janna.hofmann@kit.edu

Herausforderungen	Digitale Lösungsansätze
Einzeldaten-Analyse <ul style="list-style-type: none"> • Rohdaten-Analyse • Extraktion von Defektsignaturen • Messdaten-Kondensation 	<ul style="list-style-type: none"> • Mustererkennung / Bildverarbeitung
Datenbewertung <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation kritischer Kenngrößen • Wechselwirkungen • Wirkungsvorhersage (Feed-Forward) 	<ul style="list-style-type: none"> • Multivariate Korrelationsanalysen • Metamodeling, z. B. simulationsgestützte Analyse von Prozess-Schwankungen • Maschinelles Lernen, Q-/Deep Learning
Anwendungen <ul style="list-style-type: none"> • Regelung und Selbstoptimierung von Einzelprozessen • Prozessanlagenüberwachung • Anlagen- und Messgerätoptimierung für die Hochdurchsatzfertigung • zentrale Fab-Steuerung zur Performanz-/Kostenoptimierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozesssimulation • Datenanalyse der Anlagensensorik • Predictive Maintenance • Compressed Sensing

Abbildung 1
Verschiedene Skalen digitaler Zwillinge einer Solarzellenproduktion am Beispiel des nasschemischen Ätzprozesses zur mikroskopischen Oberflächenbearbeitung.
 © Fraunhofer ISE



Konzept des Digitalen Zwillings

Ein Digitaler Zwilling ist eine virtuelle Repräsentation eines Produktes, einer Produktion oder abstrahierter Performanz-Kriterien, wie beispielsweise des Wirkungsgrads oder der Fertigungskosten einer Solarzelle. In der ► **Abbildung 1** werden die verschiedenen Skalen auf der Ebene der Produktion, der Prozessanlage, der Prozesseinheit und der Mikroskala für den Prozess zur nasschemischen Herstellung einer Oberflächentextur dargestellt.

zum Einsatz, in dem Trainingsätze genutzt werden, um mit einem selbstlernenden Algorithmus relevante Struktureigenschaften in hochdimensionalen Parameter- und Ergebnisräumen zu identifizieren und zu klassieren. An Testdatensätzen kann dann die Prognosegüte demonstriert werden.

Machine Learning am Beispiel der Parameterprognose auf der Basis von Photolumineszenz-Bildern [3]

Methoden des „Machine Learning“ kommen beispielsweise bei der Prognose von Solarzellenleistungsdaten auf der Basis von Photo-Lumineszenz(PL)-Bildern am nicht prozessierten Rohwafer

Batteriesolarzellenproduktion am KIT

Das KIT deckt die komplette Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen Batteriezellen ab. Gegenwärtig beherbergt das Batterietechnikum alle Prozessschritte vom Kalandrieren bis zum Formieren. Beim Prozessschritt der Stapelbildung werden im Batterietechnikum zwei Verfahren adressiert, nämlich diskontinuierliche und kontinuierliche Stapelbildungsverfahren.

Im Folgenden soll auf die Digitalisierung in der Produktion am Beispiel des Einzelblattstapelns näher eingegangen werden. Dieses beschreibt ein diskon-

Abbildung 2
Machine Learning Algorithmus für die Prognose von Solarzellenparametern (hier die offene Klemmenspannung Voc).
 © Fraunhofer ISE

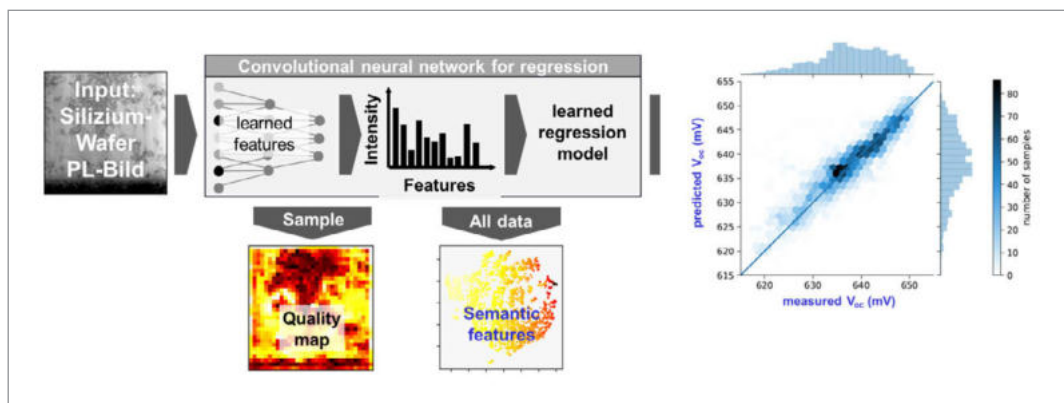




Abbildung 3
**Prozesskette zur
 Batterieherstellung**
 © KIT

tinuierliches Stapelbildungsverfahren, bei welchem Einzelsheets – bestehend aus Anode, Kathode und Separator – wechselseitig und präzise übereinandergestapelt werden, bis der Zellstapel vollständig und in gewünschter Höhe gebildet wurde.

Die Herausforderungen des Verfahrens liegen in der Senkung der Kosten, aufgrund der Vielzahl von Handhabungsoperationen, sowie der allgemeinen Reduktion der Taktzeit bei gleichzeitig höchster Genauigkeit und Qualität. Einen Ansatzpunkt bilden die Neuentwicklung von Handhabungs- und Greifsystemen, sowie die Entwicklung intelligenter Komponenten basierend auf einem fundierten Prozessverständnis.

Basis jeder Digitalisierung in der Produktion ist ein grundlegendes Material- und Prozessverständnis. Dafür wurden alle relevanten Material- und Anlagenparameter identifiziert und, soweit möglich, formal beschrieben. Die funktionalen Zusammenhänge können dann, zusammen mit den experimentell ermittelten Wirkzusammenhängen, in ein Modell zur Einzelblattstapelbildung überführt werden. Dieses kann sukzessive erweitert werden und mündet letztlich in einen digitalen Zwilling. Mithilfe dieses digitalen Zwillings ist es dann möglich auf die Prozessierbarkeit neuer Materialien zu schließen, noch bevor diese tatsächlich auf der Anlage verarbeitet werden. Im Umkehrschluss können ebenfalls Rückschlüsse darüber gezogen werden wie die Anlage ausgeführt sein muss, um ein bestimmtes (neues) Material zu verarbeiten.

Auf dem Weg zum digitalen Zwilling sind experimentelle Untersuchungen essenziell, die an zwei Beispielen erläutert werden sollen:

1. Integration einer adaptiven Regelung der Bahnzugkraft in den Einzelblattstapler.

Damit lassen sich zum einen die Materialförderung optimieren, als auch optimale Parameter für den Stanzvorgang – in Abhängigkeit des jeweiligen Materials – finden. Letztlich lassen sich materialspezifische Optimierungsmodelle erstellen, welche beschreiben, welcher Bahnzug zu einer optimalen Elektrodengeometrie beim Stanzvorgang führt.

2. Auswertung mittels eines eigens entwickelten Algorithmus.

Dieser macht die Bahnverzüge in der Materialzuführung sichtbar und quantifizierbar. Mithilfe des Algorithmus kann zum einen die Materialzuführung optimiert und zum anderen eine Qualitätssicherung vor dem Stanzwerkzeug realisiert werden. So kann sichergestellt werden, dass das Material in der Stanzeinheit faltenfrei geklemmt ist.

Die Digitalisierung der Produktion für die Batteriezellherstellung erfordert ein grundlegendes Prozessverständnis entlang der Prozesskette. Dabei ist es wichtig, die Wechselwirkungen zwischen Anlagen- und Materialparametern zu kennen und zu beschreiben.

Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Digitalisierung seit über 200 Jahren der Maschinensteuerung dient. Durch die deutliche Kostenreduktion in der Bereitstellung digitaler Leistung gibt es immer mehr digitale Lösungsansätze für die wachsenden Herausforderungen bei der Produktion stromtragender Bauelemente der Energiewende. Das Konzept des digitalen Zwillings wird hierbei auf verschiedenen Skalen verfolgt und es werden Methoden künstlicher Intelligenz eingesetzt, um die Performanz der Produkte zu erhöhen und die Kosten der Herstellung zu reduzieren.

Quellenangaben

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Jacquardwebstuhl>, Internet entnommen am 18.10.2018
- [2] <https://aiimpacts.org/trends-in-the-cost-of-computing/>, Internet entnommen am 18.10.2018
- [3] Deep learning approach to inline quality rating and mapping of multi-crystalline Si wafers, M. Demant et al., 35th EU-PVSEC, Brussels (2018), 814-818