

# Schlussbericht

Verbundvorhaben

„SALSA“

Vorhaben-Name:

Messtechnik und Sensitivitätsanalyse für Ladungsträger-Selektive Solarzellen

Teilvorhaben:

Wirbelstrombasierte Messtechnik für künftige Solarzellkonzepte und  
Messaufgaben

Förderkennzeichen:

03EE1096D

Laufzeit:

01.04.2021 - 30.06.2024

**SURAGUS GmbH**

Dipl.-Wi.-Ing. Marcus Klein

Maria-Reiche-Straße 1

01109 Dresden

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

„Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren“

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Schlussbericht SALSA

## Inhalt

1	Kurzfassung.....	3
1.1	Aufgabenstellung .....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	4
1.5	Wesentlichen Ergebnisse .....	4
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen .....	5
2	Ausführlicher Sachbericht.....	6
2.1	Ziele des Vorhabens.....	6
2.2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	6
2.3	Darstellung und Wertung erzielter Ergebnisse .....	7
2.3.1	AP 2 Probenherstellung und Charakterisierung.....	8
2.3.2	AP 4 Messtechnikentwicklung zur elektrischen Charakterisierung: .....	9
2.3.3	AP 7 Algorithmen zur automatisierten Qualitätsbewertung .....	10
2.4	Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	11
2.5	Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	12
2.6	Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.....	12

## 1 Kurzfassung

### 1.1 Aufgabenstellung

Die Welt-Produktion von Solarzellen und Modulen ist kostengetrieben. Um Kosten zu reduzieren, wird versucht, die Produktionskosten durch höhere Durchsätze von Produktionsanlagen und verbesserte Effizienz der Zellen und Module zu reduzieren. Zwei wichtige Faktoren sind:

- ▶ Erhöhung des Durchsatzes: Anlagenbauer verbessern kontinuierlich die Produktivität von Produktionsanlagen, indem sie Abpumpzeiten verkürzen, schnelle Aufheizzeiten erreichen und maximale dynamische Depositionsraten realisieren.
- ▶ Verbesserung der Effizienz: Durch Optimierung der Elektroden und des Absorbers kann die Effizienz von Solarzellen erhöht werden. Hier sind Heterojunction- (HJT) und TOPCon-Zellen besonders effizient.

Um Hocheffizienz-c-Si-Zellen in einer hochproduktiven Umgebung zu realisieren, ist zuverlässige Messtechnik von entscheidender Bedeutung. Diese garantiert die Qualitätskontrolle und ermöglicht stabile Prozesse, die hohe Durchsätze im Gigawatt-Bereich garantieren.

Das Ziel dieses Vorhabens war es, Wirbelstrommesssysteme für hochproduktive Beschichtungsprozesse zu entwickeln, um die Qualität und Prozesskontrolle zu gewährleisten. Diese Anforderungen werden durch kritische Prozessparameter identifiziert und die Wirbelstrom-Prüfsysteme sollen den Prozess-Anforderungen entsprechen.

### 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Um das Vorhaben umzusetzen, galt es zunächst einige Voraussetzungen zu erfüllen. Neben der Verfügbarkeit von geeigneten Proben standen deren Testmöglichkeiten im Vordergrund. Die Zusammenarbeit mit Partnern, welche Möglichkeiten zum Durchführen von Inline-Tests direkt an der Anlage boten, ermöglichte es uns, die Tests unter realen Bedingungen durchzuführen und somit genauere Ergebnisse zu erhalten. Schließlich spielte auch bereits bestehendes Know-how in ähnlichen Wirbelstromanwendungen eine entscheidende Rolle. Daher kam zunächst bereits zum Teil etablierte Hardware und Algorithmen zum Einsatz, welche dann sukzessiv über mehrere Iterationen verbessert werden konnten, um den Anforderungen des Vorhabens zu genügen.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zunächst wurde in Zusammenarbeit mit Meyer Burger und dem ISE Anforderungen an die Testsysteme definiert. Neben den nötigen Schritten zur Hardware-Integration wurden Maschinenschnittstellen, Messbereiche und Messsequenzen diskutiert und die Umsetzung im Einklang mit dem Projektablauf geplant. Die zuvor bei uns im Haus durchgeführte Tests zur Sensoroptimierung wurden schließlich auf Inline Anlagen bei den Projektpartnern erweitert. Die gesammelten Daten konnten genutzt werden, um die Hardware und Algorithmik auf die vorherrschenden Prozesse weiter anzupassen. Die dabei in Erfahrung gebrachten Optimierungen mündeten in einem Konzept für die nächste Generation von Hardware und Software. Demonstratoren wurden umgesetzt und auf Messfähigkeit im Vergleich zu der anfangs im Projektverlauf genutzten Hardware evaluiert.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

SURAGUS hatte bereits Erfahrungen mit wirbelstrombasierter Messtechnik, wobei die technologische Plattform vor dem Projekt auf einer herkömmlichen Elektronikplattform basierte, welche viele Möglichkeiten der mit heutigen Chipgenerationen und Signalverarbeitungsbauelemente nicht nutzte. Aufbauend auf dem Wissen wurde eine neue Generation entwickelt, welche nun auch aktuelle Möglichkeiten unter Nutzung modernster Prozessoren und Signalverarbeitungsalgorithmen nutzt.

Für die Recherche der Möglichkeiten wurden Informationen von Elektronikherstellern und teils auch Fachliteratur genutzt. Wichtig war hier vor allem die Datenblattrecherche und Auswahl der richtigen Komponenten.

## 1.5 Wesentlichen Ergebnisse

Insgesamt sind drei wesentliche Ergebnisse in diesem Teilvorhaben entstanden. Diese umfassen:

- ▶ Funktionierende Messtechnik für die Inline-Messung an Zellen in verschiedenen Prozessstadien. Datensammlung durch die Evaluation des Gesamtsystem bei zwei Projektkunden (Meyer Burger und ISE)

## Schlussbericht SALSA

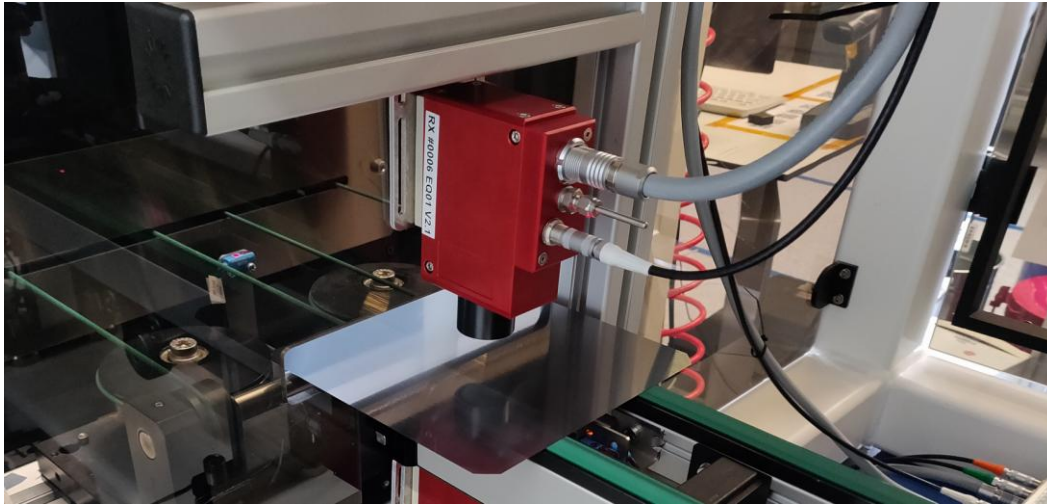


Abb. 1 Validierung Messtechnik im Dauertest bei Meyer Burger

- ▶ Konzept und Demonstrator der Messelektronik in zweiter Generation mit Fokus auf vereinfachte Integrierbarkeit und Messgenauigkeit durch den Einsatz volldigitaler Messung
- ▶ Algorithmen zur vereinfachten Defekterkennung und Inbetriebnahme beim Kunden und zur Verbesserung der Messgenauigkeit durch Reduktion des Kalibrieraufwands und Einführung automatisierter Probengeometriekerennung und Kompensation des Kanteneffekts. Hierfür wurde ebenso ein Teststand für die Labormessung entworfen.

Insgesamt ist eine „Leuchtturm-Innovation“ entstanden, welche weltweit einzigartig ist und in verschiedenen Industrien und Prozessketten eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse erscheinen bei Konferenzen und Messen, national und international vorgestellt. Der entstandene Demonstrator ist in der Lage in einem Messbereich von 6 Dekaden, also von 0.001 bis 1,000 Ohm/sq bzw. Metallschichtdicken von ca. 5 nm bis 1,000  $\mu\text{m}$  Schichten zu vermessen.

### 1.6 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die Zusammenarbeit mit dem ISE und Meyer Burger erlaubte es uns zunächst die Anforderungen der Messaufgabe an Sensorik, Hardware und Software klar abzustecken. Hierbei stand die praktische Anwendung im Fokus für die Entwicklung. Theoretische Konzepte konnten anschließend direkt bei den beiden Projektpartnern evaluiert werden. Durch die enge Zusammenarbeit war es möglich verschiedene Iterationen an Sensorik und Messparameter in Langzeitversuchen zu testen und so Anforderungen für die nächste Generation von Messtechnik zu definieren.

## 2 Ausführlicher Sachbericht

### 2.1 Ziele des Vorhabens

Das Projekt "SALSA" zielte darauf ab, Inline-Messtechnik für fortschrittliche Solarzellentechnologien wie Heterojunction- und TOPCon-Route zu entwickeln, zu optimieren und techno-ökonomisch zu bewerten. Diese Technologie Routen werden nach Marktstudien im Jahr 2029 über 45% Marktanteil aufweisen. Die Messtechnik muss jedoch weiterentwickelt werden, um eine hohe Ausbeute sicherzustellen und kontinuierliche Prozessverbesserungen zu ermöglichen.

In SALSA wurden kritische Parameter der Solarzellen mittels Simulationen identifiziert, Proben in verschiedenen Prozessstadien hergestellt und neu entwickelte Messtechnik für HJT und TOPCon getestet. SURAGUS fokussierte sich dabei auf die Detektion elektrischer Eigenschaften und die Entwicklung eines sehr schnellen, skalierbaren Messsystems. Das Ziel war es, substantielle Beiträge für die Etablierung von Qualitätssicherungsverfahren für zukünftige Zellkonzepte und Stärkung der Position deutscher Anlagen- und Messtechnik-Anbieter im internationalen Marktumfeld zu erarbeiten.

### 2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Herstellung hocheffizienter Solarzellen erfordert präzise Kontrolle zahlreicher Fertigungsschritte, bei denen elektrische Messmethoden eine zentrale Rolle spielen. Diese Messverfahren sind unerlässlich für die Prozessoptimierung, Qualitätssicherung und kontinuierliche Weiterentwicklung von Photovoltaiktechnologien, da sie detaillierte Einblicke in die elektrischen Eigenschaften der produzierten Komponenten ermöglichen.

Elektrische Messverfahren in der Solarzellproduktion lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: Offline-Messtechnik und Online-Messtechnik. Offline-Messungen werden außerhalb der Produktionslinie an ausgewählten Proben in speziellen Laborumgebungen durchgeführt und ermöglichen besonders präzise, detaillierte Analysen. Online- oder Inline-Messtechnik hingegen ist direkt in den Fertigungsprozess integriert und erlaubt die kontinuierliche Überwachung während der laufenden Produktion ohne Unterbrechung des Herstellungsflusses.

Im Bereich der Offline-Messtechnik spielen insbesondere die Vier-Punkt-Probe (4PP) und die Van-der-Pauw-Methode eine herausragende Rolle. Die 4PP-Technik verwendet vier separate Kontakte – zwei für die Stromspeisung und zwei für die Spannungsmessung – wodurch Kontaktwiderstände eliminiert und eine präzise Bestimmung des Schichtwiderstands von Emitttern, Metallisierungen und transparenten leitfähigen Oxiden ermöglicht wird. Diese Methode ist entscheidend für die Bewertung der Qualität von Diffusionsprozessen und Metallisierungsschritten. Die Van-der-Pauw-Methode ergänzt diese Messungen, da diese auch Ladungsträgerkonzentration und Beweglichkeit bereitstellen kann.

# Schlussbericht SALSA

Die Online-Messtechnik in der Solarzellenfertigung umfasst unter anderem Wirbelstrommessungen, die direkt in die Produktionslinie integriert werden können. Dieses berührungslose Verfahren nutzt elektromagnetische Felder zur Induzierung von Wirbelströmen in leitfähigen Materialien, wodurch Leitfähigkeitsänderungen, Materialfehler oder Strukturabweichungen in Echtzeit erkannt werden können. In der Waferproduktion und bei der Überprüfung von Metallisierungsschichten liefert diese Methode unmittelbare Rückmeldungen zur Prozessstabilität und hilft, Ausschuss frühzeitig zu identifizieren, ohne den Produktionsfluss zu unterbrechen. Weitere Online-Messverfahren umfassen automatisierte Widerstandsmessungen an kritischen Punkten der Fertigungslinie sowie optische Inspektionssysteme, die mit elektrischen Messungen korreliert werden, um eine umfassende Prozessüberwachung zu gewährleisten.

In SALSA wurden kritische Parameter der Solarzellen mittels Simulationen identifiziert, Proben in verschiedenen Prozessstadien hergestellt und neu entwickelte Messtechnik für HJT und TOPCon getestet. SURAGUS fokussierte sich dabei auf die Detektion elektrischer Eigenschaften und die Entwicklung eines sehr schnellen, skalierbaren Messsystems. Das Ziel war es, substantielle Beiträge für die Etablierung von Qualitätssicherungsverfahren für zukünftige Zellkonzepte und Stärkung der Position deutscher Anlagen- und Messtechnik-Anbieter im internationalen Marktumfeld zu erarbeiten. Stand der Technik vor dem Projekt war es, dass nur eine Messspur eingesetzt wird. Mit dem Vorhaben wurden die Voraussetzungen geschaffen in und offline auch hochauflösende Messdaten zu erfassen.

## 2.3 Darstellung und Wertung erzielter Ergebnisse

Im Projekt SALSA wurde die kontaktlose Schichtwiderstandsmessung für HJT- und TOPCon-Routen entwickelt und optimiert. Das Vorhaben war durch vielfältige Aktivitäten geprägt, darunter die Entwicklung von Messhardware, von Testständen sowie der Durchführung von Messungen und Datenanalysen, die Verbesserung von Hardwarekomponenten und die Optimierung von Algorithmen. Wesentliche Aspekte waren:

- ▶ Die elektrische Messung von Schichten entlang HJT- und TOPCon Fertigungsprozesse
- ▶ Die Entwicklung eines neuartigen induktiven hochauflösenden Messsystems
- ▶ Die Messung von Temperaturabhängigkeiten der Widerstandsmessungen und die Entwicklung von Korrekturverfahren, um Messartefakte zu vermeiden.

Durch die ganzheitliche Adressierung verschiedener Limitierungen der bekannten Wirbelstromtechnologie wurde das kontaktlose Wirbelstromverfahren mit der Entwicklung neuer Hardware und Algorithmen mit dem Ziel verbessert genauere Ergebnisse in den verschiedenen Prozessstadien zu erzielen. Nachfolgend werden wesentliche Arbeitsinhalte detaillierter dargelegt.

# Schlussbericht SALSA

## 2.3.1 AP 2 Probenherstellung und Charakterisierung

Im Rahmen des Vorhabens wurden zahlreiche Wafer in verschiedenen Prozessstadien vermessen. Dabei wurden verschiedene Messaufbauten eingesetzt. Für die Inlinemessung wurden automatisierte Messplätze entwickelt. Auch wurden Messungen in einem Temperaturschrank unter verschiedenen Umgebungsbedingungen durchgeführt. Weiterhin wurden Referenzproben mit Wafergeometrien mit bekannten Schichtwiderständen hergestellt. Diese waren notwendig um Modelle für die Kanteneffektkompensation mit bekannten Schichtwiderständen und bekannten Homogenitäten in vielen Schichtwiderstandsbereichen im Rahmen der Machine-Learning-Algorithmen zu trainieren. Hierfür war es wichtig die Proben nach ihrer Homogenität auszuwählen und zu evaluieren. Um die Handelbarkeit im Labor zu verbessern wurden die Proben auf Substrate aufgebracht welche keinen Einfluss auf die Wirbelstrommessung haben.

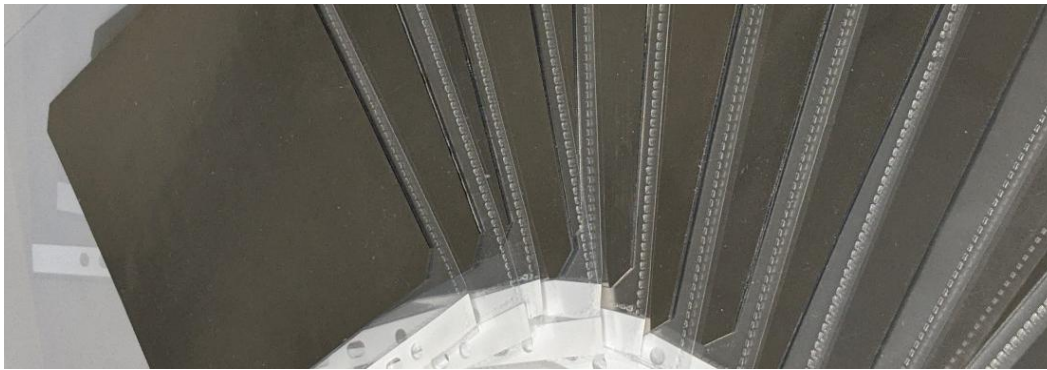


Abb. 2: Probenet mit definierten Referenzeigenschaften für die Entwicklung der Kanteneffektkorrektur

Es wurden zahlreiche Inline und offline Messungen entlang der Wertschöpfungskette durchgeführt. Die beinhaltet die Wafer Charakterisierung im Rahmen der Wafereingangsprüfung bis hin zur Charakterisierung von fertigen Zellen inkl. der Druckprozesse. Einige Messdaten sind nachfolgend dargestellt.



Abb. 3: Ergebnisse einer Versuchsserie mit Meyer Burger mit Focus auf die Charakterisierbarkeit des Druckprozesses

# Schlussbericht SALSA

Auch wurden abbildende Wirbelstrommesssysteme evaluiert. Diese sind in der Lage Linienprofile an diversen Stellen aufzunehmen.

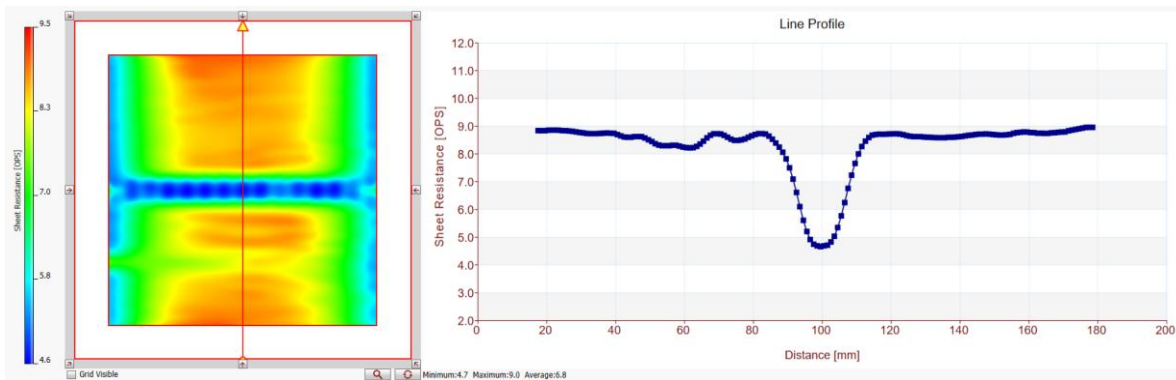


Abb. 4 Hochauflösendes Wirbelstrommessergebnisses mit Linienprofil des Schichtwiderstandes

## 2.3.2 AP 4 Messtechnikentwicklung zur elektrischen Charakterisierung:

Das Projekt umfasste die Entwicklung von Hardware, Firmware und Software für die orts aufgelöste Inlinemessung. In der ersten Iterationsstufe wurde das System bei Meyer Burger evaluiert, gefolgt von einer zweiten Evaluierung im Rahmen des Projektpartners ISE, wobei mehrere Messspuren evaluiert wurden. Es kam eine Optimierung des Hardwarekonzepts zustande, die auf der Nutzung voll digitaler Messung und der Kombination von Messspuren basierte, um eine vereinfachte Integrationsmöglichkeit für mehrere Kanäle zu ermöglichen. Dies wurde durch die Implementierung eines Daisychain-Konzepts erreicht.

Die Evaluation von Power-over-Ethernet ergab, dass eine Integration dieser Technologie das Gesamtsystem erheblich vergrößern und die Integrationsmöglichkeiten reduzieren würde. Zur weiteren Vereinfachung und Adaption wurde auf der Firmwareebene Schnittstellen integriert, insbesondere UDP und Profinet.

Um eine möglichst hohe Datenrate zu erreichen und damit die Bewertung der Homogenität zu vereinfachen wurde die digitale Signalverarbeitung über einen FPGA realisiert.

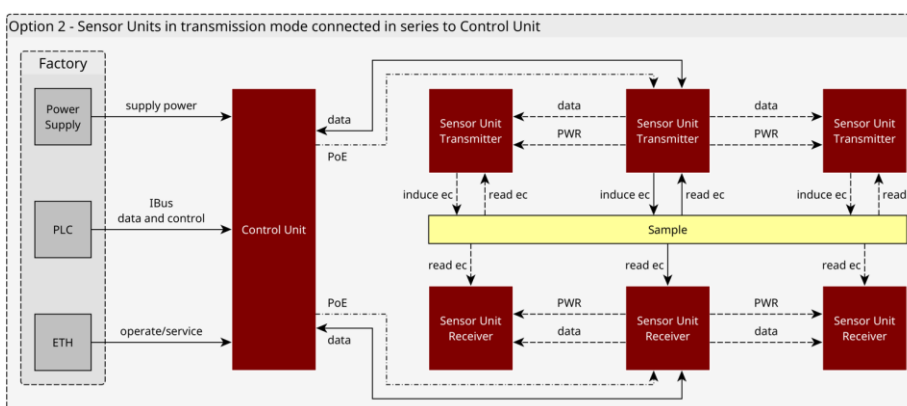


Abb. 5 Blockschaltbild des modularen Sensorkonzeptes für eine skalierbare volldigitale Elektronik

# Schlussbericht SALSA

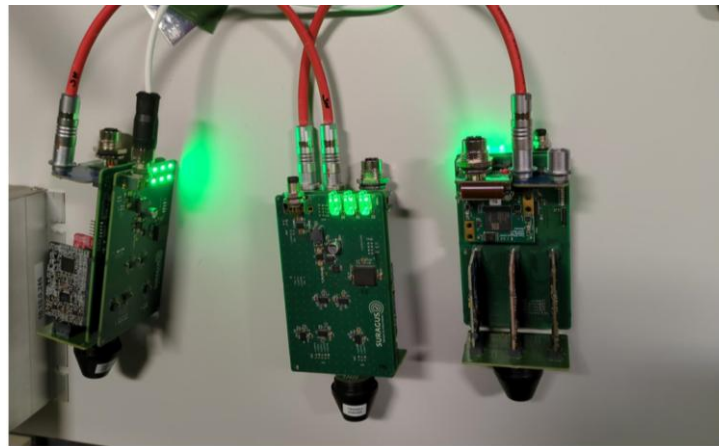


Abb. 6 Demonstrator der entwickelten Wirbelstromelektronik mit digitaler (Ethernet) Signalübertragung

Insgesamt ist eine neue Generation Messtechnik mit vielen neuen Möglichkeiten entstanden. Diese Elektronik hat sehr viel Potential viele Messaufgaben in zahlreichen Industrien zu lösen.

## 2.3.3 AP 7 Algorithmen zur automatisierten Qualitätsbewertung

Im Rahmen des Vorhabens wurden zahlreiche Algorithmen entwickelt und evaluiert. Dies beinhaltet vor allem Kanteneffektkompensationsalgorithmen. Diese sind notwendig um auch Messungen nahe am Rand zu ermöglichen.

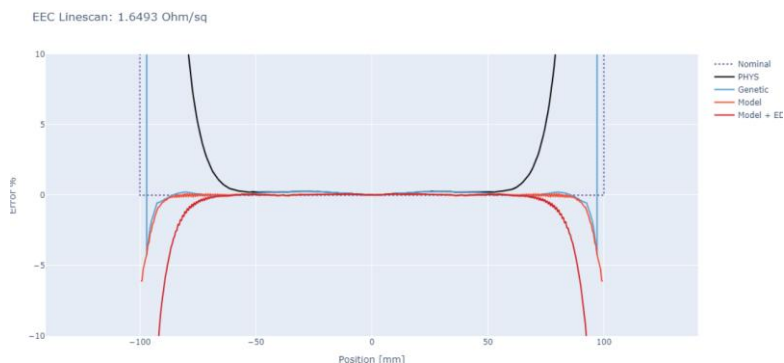


Abb. 7 – Darstellung des Kanteneffektes am Rand (phys) und sowie der kompensierten Ergebnisse unter Nutzung verschiedener Modelle

Um die Qualitätsbewertung insbesondere die der Homogenität der Probe zu verbessern wurden folgende Schritte durchgeführt:

- ▶ Erstellen hoch orts aufgelöster 2D Messdatenbank dieser Proben für vereinfachte Analyse
- ▶ Entwicklung eines Algorithmus zur Erkennung der Probenkante über die komplexe Impedanz
- ▶ Evaluieren verschiedener mathematischer Modelle zur Kanteneffektkompensation

Während der Datenakquise hat sich gezeigt, dass die Inbetriebnahme besonders mit dem Ziel der Minimierung des Kanteneffektes mit erhöhtem Aufwand einhergeht. Um diesen zu verringern und die Qualität der Daten besonders für die automatische Probenanalyse zu verbessern wurden folgende Maßnahmen ergriffen:

# Schlussbericht SALSA

- ▶ Sammeln von Impedanzwerten für Anwendungsrelevante Widerstände und Probengrößen
- ▶ Halbautomatisierte Analyse der Impedanzverschiebungen
- ▶ Modellbildung mit dem Ziel die nötige Anzahl an Stützstellen für eine Kalibrierung zu reduzieren
- ▶ Modellanwendung und Vergleich zu bis dato eingesetzte Modelle an Kalibrierungen von unterschiedlichen Messsystemen

Für eine automatisierte und kontinuierliche Messung wurde eine Temperatur-Kompensation implementiert. Dieser erlaubt eine genaue Messung auch bei schwankenden Umgebungstemperaturen. Die Tatsache, dass zwischen den Wafern Lücken sein können, vergrößerte dabei die Kompensationsmöglichkeiten, da neben der Probe ebenfalls der Zustand „Luft“ gemessen werden kann. Bei der Entwicklung wurde wie folgt vorgegangen:

- ▶ Implementierung einer parallel zur Wirbelstrommessung laufenden Temperaturmessung der Elektronik und der Umgebungstemperatur
- ▶ Testmessung in einer Klimakammer mit definierten Temperaturprofilen mit anschließender Datenauswertung
- ▶ Analyse des Temperaturverhaltens und Ableiten geeigneter Kompensationsmethoden
- ▶ Implementierung von automatisierter Temperaturkompensation

## 2.4 Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Sensorentwicklungsprojekts erwies sich der gewählte Arbeitsumfang als notwendig und angemessen, um den komplexen Anforderungen der Solarzellproduktion gerecht zu werden. Die umfassende Charakterisierung zahlreicher Wafer mit diversen Sensorikkonzepten zu Projektbeginn offenbarte signifikante Herausforderungen, was mit der Entwicklung einer neuen Sensorgeneration adressiert werden konnte. Der mehrstufige Entwicklungsansatz mit iterativen Prototypenphasen ermöglichte eine systematische Optimierung (eigentlich Revolutionierung) der Signalverarbeitung und Rauschunterdrückung. Die intensive Zusammenarbeit mit Applikationsingenieuren während der Implementierungsphase stellte sicher, dass die entwickelte Sensorik den realen Fertigungsbedingungen standhalten kann, während die umfangreichen Validierungstests unter verschiedenen Umgebungsbedingungen die Zuverlässigkeit der Messergebnisse gewährleisteten. Angesichts der erzielten Qualitätsverbesserung ist der investierte Entwicklungsaufwand als wirtschaftlich sinnvoll und technologisch angemessen zu bewerten, was auch durch das positive Feedback vom Meyer Burger bestätigt wurde.

### 2.5 Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es gab viele Veröffentlichungen im Bereich Messtechnik für Solarzellen in den vergangenen 3 Jahren. Während der Projektlaufzeit konnten wir jedoch keine relevanten Fortschritte im Bereich der Inline-Wirbelstrom-Sensorik für die Solarzellenfertigung bei anderen Forschungseinrichtungen und Wettbewerbern identifizieren. Es gab trotzdem eine Reihe von Veröffentlichungen, welche sich mit der elektrischen Charakterisierung befassen, wobei hier auch oft im forschenden Konzept andere Verfahren, oft kontaktierende Verfahren eingesetzt wurden.

### 2.6 Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

Die SURAGUS GmbH verfolgt die Strategie wesentliche Entwicklungstricks bei der Entwicklung von Messhardware und Datenverarbeitungsalgorithmen nicht zu veröffentlichen, sondern geheim zu halten. Spätere Anwender und Kunden der SURAGUS Technologie werden ermutigt Messergebnisse zu veröffentlichen ohne Algorithmen zu verraten. Es wird erwartet, dass in absehbarer Zeit Veröffentlichungen dazu erfolgen.