

# SODECO

## Abschlussbericht

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Anhalt	<b>Förderkennzeichen:</b> 01DG20003
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verschmutzungserkennung für PV-Anwendungen und Reinigungsoptimierung in ariden und semiariden Gebieten Nordafrikas  <i>Soiling detection for PV application and cleaning optimization in arid and semi-arid areas of North Africa</i>	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2020 bis 31.05.2022  Kostenneutrale Verlängerung: 01.06.2022 bis 31.12.2022	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.06.2020 bis 31.12.2022 (31 Monate)	

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Betreut vom:



DLR Projektträger

# Inhalt

<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>Wissenschaftlich-technische Ergebnisse</b>	<b>4</b>
Arbeitspaket 1 Verschmutzungssensor	4
Arbeitspaket 2 Freifeldtests	7
Arbeitspaket 3 Reinigungsmethoden	9
Arbeitspaket 4 Sensorbasierte Reinigungsmetrik	10
Arbeitspaket 5 Verwertungskonzept	13
<b>Stand des Vorhabens im Vergleich zur Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung</b>	<b>15</b>
<b>Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises</b>	<b>17</b>
<b>Notwendigkeit und Angemessenheit des geleisteten Projektarbeiten</b>	<b>18</b>
<b>Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse und Fortschreibung des Verwertungsplans</b>	<b>18</b>
<b>Relevante Ergebnisse Dritter</b>	<b>19</b>
<b>Veröffentlichungen</b>	<b>19</b>

## Einleitung

In diesem Sachbericht werden die umfassenden Fortschritte und Ergebnisse des Forschungsprojekts SoDeCo zur Entwicklung eines Sensornetzwerks zur Verschmutzungserkennung für PV-Systemen in semi-/ariden Klimaten präsentiert. Die Umsetzung erfolgte durch mehrere gemeinsamen Schritte im Konsortium, von der Konzeption und Überarbeitung des Sensorkonzepts, Prototypenentwicklung und Outdoortest bis hin zur Bewertung von Reinigungsverfahren und der Vorhersage von Reinigungszyklen.

Die Durchführung von Labor- und Freifeldtests ermöglichte unter anderem eine zuverlässige Evaluierung der entwickelten Sensoren und Reinigungsmetriken an verschiedenen Standorten. Die Auswertung und der Vergleich der standortbezogenen Soiling-Daten und Laboruntersuchungen lieferten wertvolle Einblicke in das Verhalten von PV-Modulen unter unterschiedlichen Umweltbedingungen und unterstützten langfristig die Entwicklung effizienterer Solarenergiesysteme.

Die erfolgreiche Anpassung und das Fortschreiben des Verwertungsplans basieren auf einer Marktrecherche und -analyse für Produkte zur Soiling-Detektion. Dies führte zu einem besseren Verwertungskonzept, das die Integration der entwickelten Sensoren und Reinigungsmetrik in bestehende Überwachungssysteme oder als eigenständige Lösung betonte.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass das Sensornetzwerk zur Verschmutzungserkennung einen wertvollen Beitrag zur Optimierung der Solarenergie in Marokko und darüber hinaus leisten kann. Die optimierten Reinigungsstrategien geben einen verbesserten Indikator den Energieertrag von PV-Anlagen zu maximieren und reduzieren gleichzeitig den Reinigungsaufwand, was zu einer nachhaltigen Nutzung und Reduktion von Abrasion der Solarenergie beitragen kann.

Für die zukünftige Weiterentwicklung und Verbesserung des Sensorkonzepts wurden mögliche Forschungsaspekte vorgeschlagen, darunter die Optimierung der Sensortechnologie, die Integration von KI und maschinellem Lernen sowie die Untersuchung der Langzeitstabilität und ökonomischen Auswirkungen.

Insgesamt unterstreichen die präsentierten Ergebnisse die Bedeutung des Forschungsprojekts und zeigen vielversprechende Wege auf, wie die Verschmutzungserkennung in PV-Systemen weiter verbessert und effizienter gestaltet werden kann, um einen nachhaltigen und effektiven Beitrag zur Förderung erneuerbarer Energien in Afrika und anderen Regionen zu leisten.

# Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

## Arbeitspaket 1 Verschmutzungssensor

Arbeitspaket 1 umfasst die Arbeiten zur Entwicklung und Umsetzung eines Sensornetzwerks zur Verschmutzungserfassung auf PV-Modulen, das dazu dient, relevante Umweltparameter in einer bestimmten Region zu überwachen und das Verschmutzungsverhalten zu analysieren. Im Nachfolgenden werden die Schritte der Konzeption des Sensorkonzepts, die Bauteilbeschaffung für die Prototypen, die Evaluierung von Einzelsensoren, die Optimierung des Sensorkonzepts und die weitere Planung für den Bau von Sensoren für das Messnetzwerk vorgestellt.

### *1. Konzeption/Überarbeitung des Sensorkonzepts*

Die Konzeption des Sensornetzwerks begann mit einer umfassenden Analyse der Anforderungen an die zu messenden Umweltparameter. Basierend auf Vorarbeiten der im Projekt beteiligten deutschen und marokkanischen Wissenschaftler\*Innen und einer ausgiebigen Diskussion wurden die Kriterien an spezifische Sensoren für die Erfassung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftqualität, Partikelverteilung, elektrische Modulleistung und Modultemperatur erfasst.

Nach der Definition der Parameter wurden die technischen Spezifikationen für jeden Sensor festgelegt. Dabei wurden Faktoren wie Messgenauigkeit, Messbereich, Stromverbrauch und Schnittstellen berücksichtigt, um die besten verfügbaren Sensortechnologien auszuwählen.

Im Konsortium wurden im Laufe verschiedener Projekttreffen Teile des Konzepts sowie deren dafür notwendigen Bestandteile weiterdiskutiert und mehrfach überarbeitet. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass sowohl die technischen Anforderungen, experimentelle Ausführbarkeit als auch die Kostenoptimierung für Entwicklung und Handhabung zu berücksichtigen.

Das Sensorkonzept wurde in Tabelle 1 zusammengefasst.

### *2. Prototypenentwicklung und Beschaffung*

Basierend auf dem überarbeiteten Sensorkonzept werden Prototypen entwickelt. Bei der Herstellung der Prototypen sollen hochwertige Materialien und Komponenten verwendet werden, um sicherzustellen, dass die Sensoren den spezifizierten Anforderungen entsprechen. Der Prototypenbau erfolgt in Marokko, während die Beschaffung in Deutschland erfolgte, unter Einhaltung der jeweils geltenden Beschaffungsvorgaben.

Aufgrund von internationalen Liefer- und Produktionsengpässen kam es zu erheblichen Einschränkungen der Verfügbarkeit und Lieferbedingungen, wodurch verschiedene Bestellvorgänge deutlich länger gedauert haben, als zunächst angenommen. Dies hatte leider Auswirkungen auf die weitere Bearbeitung der Arbeiten im Projekt.

Nach Abschluss der Beschaffungen, werden die beschafften Komponenten und Geräte nach Marokko an das IRESEN versandt.

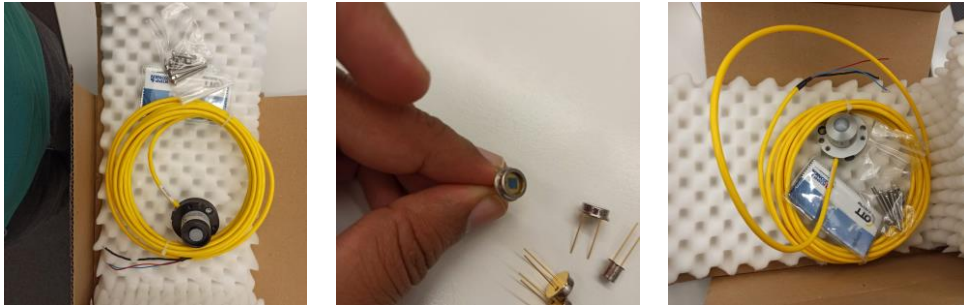
**Tabelle 1:** Überblick über das in AP1 entwickelte Sensorkonzept

Kurzname	PVSM	Mikroskopsensor	PVSM- $\lambda$	PVSM 2.0	Zwei PV Modul Aufbau
<b>Zielstellung</b>	Optische Messung der Soilingrate	Die Staubansammlung und -ablagerung auf den Glasoberflächen wird mit einem Mikroskopaufbau (entwickelt von Ben Figgis) gemessen	Da es verschiedene PV-Technologien auf dem Markt gibt, ist es von großer Bedeutung, die optischen Leistungen mit der Wellenlängenverteilung zu verknüpfen.	PVSM 2.0 ist eine kostengünstigere Weiterentwicklung des PVSM, die auf Fotodioden basiert und in der Lage ist, die Inhomogenität der Staubverteilung zu überwinden.	Validierung der optischen Konzepte sowie der Bewertung von Reinigungsmethoden
<b>Beschreibung</b>	<p>Der PVSM (PV-Soiling Monitor) ist ein von Prof. Merrouni entwickeltes und patentiertes Gerät. Der PVSM besteht aus zwei Boxen, die jeweils ein Pyranometer und eine PV-Glasproben enthalten.</p> 	<p>Zwei dieser Anlagen werden in UMP und GEP installiert, um die Adhäsionseigenschaften unterschiedlich geneigter Gläser und bei unterschiedlichen Wetterbedingungen zu testen.</p> 	<p>Aus diesem Grund werden wir zwei PVSM<math>\lambda</math>-Sensoraufbauten entwickeln und bauen. Diese Sensoren basieren auf Quantenmessungen und werden in Oujda gebaut und am GEP und an der UMP zum Vergleich der Standorte installiert.</p>	<p>Zwei Einheiten des PVSM2.0 Verschmutzungssensors werden in Oujda gebaut und eine wird am GEP und die andere an der UMP installiert, um mit dem PVSM und dem Aufbau der PV-Module sowie dem Standortvergleich validiert zu werden.</p> 	<p>An den Standorten UMP und GEP werden je zwei PV-Module installiert und elektrisch sowie thermisch vermessen. So wird das Soilingverhalten analysiert und zuverlässige Referenzwerte erhalten.</p> 

### 3. Evaluierung

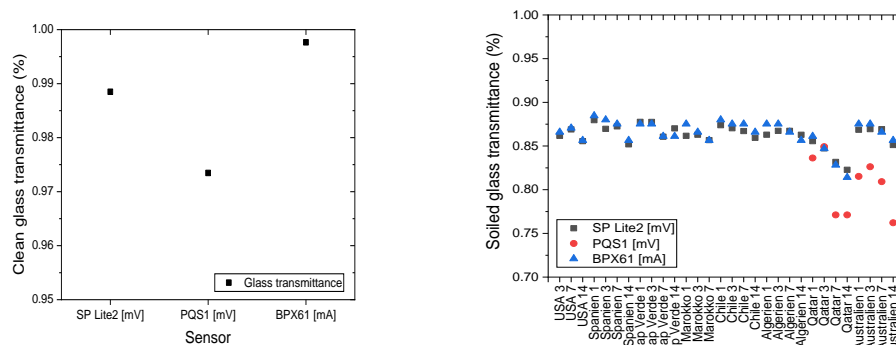
Im Projekt wurden verschiedene Aufgaben durch das Fraunhofer CSP übernommen. Im WP1 umfasst das die Charakterisierung von Einstrahlungssensoren und Glasproben für Freifeldversuche.

Zur Evaluierung der Vergleichbarkeit verschiedener Einstrahlungssensoren (siehe Abb. 1) wurden Transmissionsmessungen (gemäß IEC CD 62805-2 IEC:2015, Gerät: Perkin Elmer Lambda 1050) anhand systematisch verschmutzte Glasproben durchgeführt. Für diese Verschmutzung wurden lokal verschmutzte Glasproben aus potenziellen Wüstenregionen (weltweit) verwendet.



**Abbildung 1:** Übersicht der getesteten Sensoren (v.l.n.r. SP Lite 2 Pyranometer, Photodiode (BPX61), PQS 1 PAR Quantum Sensor)

Wie in Abbildung 2 zu sehen, konnten die Sensoren SP Lite 2 und BPX61 eine hohe Vergleichbarkeit über die Proben hinweg erreichen. PQS 1 PAR wies verringerte Transmissionswerte auf, die sich durch eine die andere Arbeitsweise des Sensors erklären lassen. Diese Erkenntnisse liefern wesentliche Informationen über die spätere Eignung bei Standorten und für die Validierung der Outdoormesswerte.



**Abbildung 2:** Transmissionsmessungen der für das Sensorkonzept vorgesehenen Einstrahlungssensoren  
links: an unverschmutzten Referenzglasscheiben  
rechts: an verschmutzten Glasproben (aus verschiedenen Standorten weltweit)

#### 4. Optimierung des Sensorkonzepts

Die Ergebnisse der Laborversuche dienen als Grundlage für die Optimierung des Sensorkonzepts. Die gesammelten Daten wurden analysiert, um mögliche Verbesserungen zu identifizieren und das Design zu verfeinern.

## *5. Bau von Sensoren für das Messnetzwerk*

Der Bau der aller optimierten Sensoren für das Sensorkonzept und Prototypen für die Vermarktungsphase wurde noch nicht abgeschlossen, aufgrund der Verschiebung der Arbeiten durch verspätete Lieferungen und zollrechtlicher Schwierigkeiten beim Versand der Komponenten und Geräte.

## Arbeitspaket 2 Freifeldtests

Dieses Arbeitspaket baut auf den vorherigen Erkenntnissen des Sensorkonzepts zur Soiling-Messung auf, wie im ersten Arbeitspaket beschrieben. Im Folgenden werden die nächsten Schritte der Umsetzung behandelt, darunter die Überprüfung und Auswahl von Standorten, das Ausbringen der Sensoren, die Überprüfung und Analyse der Messdaten sowie die Auswertung und der Vergleich der standortbezogenen Soiling-Daten.

### *1. Überprüfung/Auswahl von Standorten*

Die Auswahl geeigneter Standorte für die Soiling-Messung ist von entscheidender Bedeutung, um repräsentative Daten zu erhalten. Basierend auf verschiedenen Beziehungen der marokkanischen Partner in Afrika wurden potenzielle Standorte in Wüstenregionen identifiziert, die eine hohe wirtschaftliche Relevanz und die entsprechenden Infrastrukturen für die Experimente aufweisen: Kriterien wie geografische Lage, klimatische Bedingungen, Verschmutzungspotenzial und Zugänglichkeit wurden berücksichtigt.

Anhand der Kriterien wurden schließlich geeignete Standorte ausgewählt:

1. University of Oujda (UMP)
2. Green Energy Park (Ben Guerir) (IRESEN)
3. Errachidia (UMP)
4. Laayoune (UMP)

### *2. Ausbringen der Sensoren an verschiedenen Standorten*

Die entwickelten Sensoren werden an den ausgewählten Standorten installiert. Die Sensoren werden sorgfältig positioniert und Umweltdaten aufgezeichnet, um repräsentative und reproduzierbare Messdaten zu gewährleisten. Dabei wurden etwaige örtliche Besonderheiten dokumentiert, die das Soiling-Verhalten beeinflussen könnten (Straßen, Vegetation, Gebäude, etc.).

Die Datenübertragung wurde ebenfalls eingerichtet, um eine kontinuierliche Sicherung der Daten der Sensoren vor Ort sicherzustellen.

Die Messungen werden auch nach Abschluss des Projekts weitergeführt, um eine bessere Kontrolle des Langzeitverhaltens der Sensoren und Verstaubungsprozesse zu erfassen und in weiterführenden Veröffentlichungen zu präsentieren.

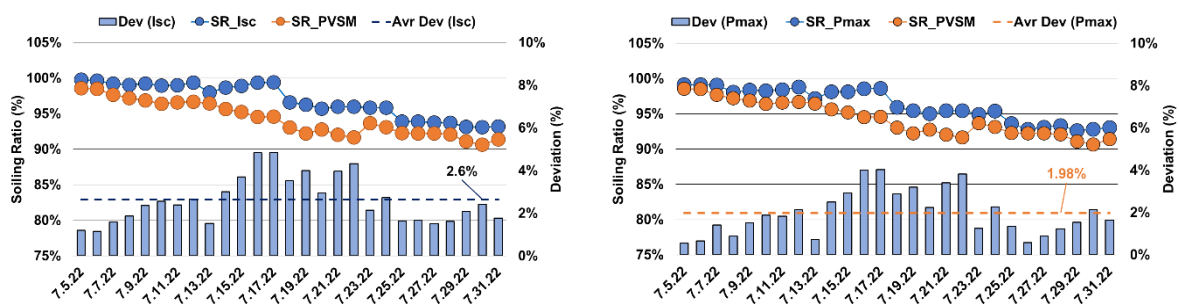


**Abbildung 3:** Experimentelles Setup PVSM, installiert in Marokko, Ben Guerir

### 3. Überprüfung und Analyse der Messdaten

Während des Messzeitraums wurden kontinuierlich Daten von den Sensoren erfasst. Diese Daten umfassten Strom-, Leistungs- und Temperaturwerte des verschiedenen PVMS-Setups sowie Informationen über Umweltparameter (Einstrahlung, Temperatur, Wind, Luftpartikelkonzentration). Die Messdaten wurden regelmäßig überprüft, um sicherzustellen, dass die Sensoren ordnungsgemäß funktionieren und keine Ausfälle oder Datenverluste auftreten.

Zur Analyse der Messdaten wurden statistische Methoden angewendet, um die Wechselwirkungen zwischen Soilingverlusten und Umweltfaktoren quantifizieren zu können. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Analyseergebnisse der PVSM-Messdaten anhand der Zwei PV Modul Messungen. Um einen besseren Vergleich zu ermöglichen, wurde ein Zeitraum (ein Monat) ausgewählt, der in der Region als trockene Periode mit hoher Verschmutzung bekannt ist. Die Ergebnisse zeigen, dass PVSM sehr präzise Messungen der Soiling Verluste (Soiling Ratio, SR) liefert, die gut mit den Messungen anhand der elektrischen Parameter übereinstimmen (Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 82% für Modulleistung ( $P_{max}$ ) und 81% für Kurzschlussstrom ( $I_{sc}$ )). Die durchschnittliche Abweichung von PVSM ist mit ca. 2,6% ( $I_{sc}$ ) und 1,98% ( $P_{max}$ ) sehr gering.



**Abbildung 4:** Validierungsergebnisse des PVMS-Setups: links: Vergleich der PVSM-SR-Daten mit SR  $I_{sc}$ ; rechts: Vergleich der PVSM-SR-Daten mit SR von  $P_{max}$  (Standort: Ben Guerir)



#### *4. Pflege der Standorte, Vor-Ort-Service*

Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Daten sicherzustellen, wurden die Standorte regelmäßig gewartet und dokumentiert. Dies beinhaltete die Reinigung der Sensoren und PV-Module, die Kalibrierung der Sensoren, das Protokollieren von Beobachtungen und Abweichungen sowie die Behebung von eventuellen technischen Problemen.

#### *5. Auswertung und Vergleich der standortbezogenen Soiling-Daten*

Nach Abschluss der Datenerfassung werden die standortbezogenen Soiling-Daten ausgewertet und miteinander verglichen. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichts war die Zusammenstellung aller Messdaten und derer Analyse nicht abschließend fertiggestellt. Das ist der verspäteten Bereitstellung und Lieferung der Sensorik geschuldet. Die Auswertung wird nach Projektende weitergeführt und in gemeinsame Veröffentlichungen überführt.

### Arbeitspaket 3 Reinigungsmethoden

Dieses Arbeitspaket evaluiert verschiedene Reinigungsmethoden für PV-Systeme. Dazu wurden sowohl Freifeld- als auch Laborversuche durchgeführt, um Faktoren wie Schädigung, Kosten und Effizienz zu vergleichen. Die Erkenntnisse sollen regionalen O&M Firmen helfen, ihre Reinigungsverfahren zu verbessern und Reinigungsschäden zu vermeiden. Auf deutscher Seite wurden die Versuche durch Laboruntersuchungen anhand der Reflektions- und Abrasionseigenschaften behandelter Glasproben begleitet. Diese wurden auch hier mit Hilfe des Unterauftrag durch das Fraunhofer CSP bearbeitet.

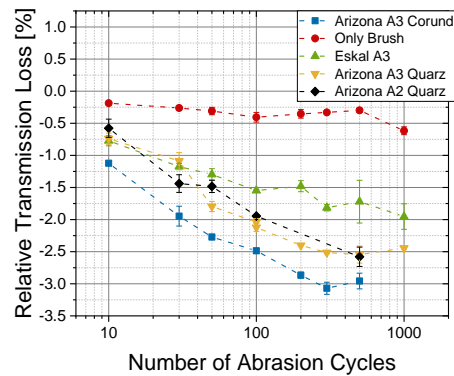
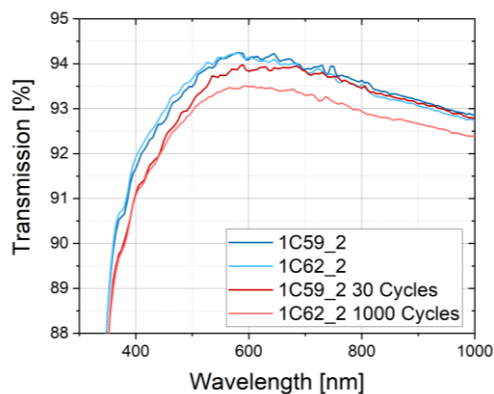
#### *1. Testen von Reinigungsmethoden*

Um die Effektivität verschiedener Reinigungsmethoden zu untersuchen, werden in Marokko am Standort Ben Guerir verschiedene Reinigungsmethoden getestet: manuelles Abwischen, Bürsten und roboterbasierte Verfahren. Nach jeder Reinigungsmethode wurden die PV-Module erneut vermessen, um die Reinigungseffizienz zu analysieren. Dabei wurden die Soiling-Raten (SR) vor und nach der Reinigung verglichen, um die Wirksamkeit der jeweiligen Methode zu bewerten.

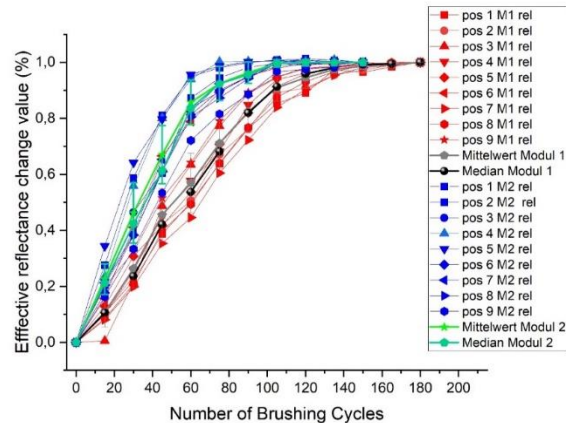
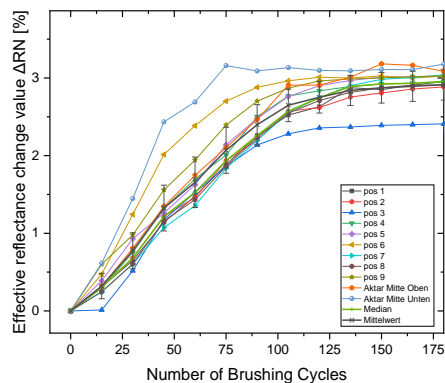
#### *2. Analyse der Reinigungs- und Schädigungseffizienz*

Diese Untersuchungen umfassen lineare (nach ASTM D2486 bzw. DIN 53778-2) und rotierende (gemäß ISO 20566) Abrasionsverfahren. Um die Reinigungseffizienz und das Schädigungspotenzial der Reinigungsmethoden zu analysieren, werden Transmission (nach IEC CD 62805-2 IEC:2015) und Reflektion der Proben gemessen.

Die Untersuchungen wurden an zwei verschieden beschichteten Glasprobentypen durchgeführt (PM1 und PM2). Die Ergebnisse zeigten, dass PM1 deutlich höhere Transmissionsverluste als die Glasproben PM2. Abbildung 5 zeigt exemplarisch das Transmissionsverhalten für die Proben PM1 für das lineare Verfahren. Abbildung 6 zeigt zusätzlich für PM1 Ergebnisse des rotierenden Verfahrens an großen PV-Modulen.



**Abbildung 5:** Wellenlängenabhängige Transmissionsverluste für lineare Reinigungsversuche für die Glasproben PM1; links: Messung nach 30 cm/s mit leichter Bürste ohne Sandpartikel; rechts: Messergebnisse nach verschiedenen Anzahlen von Abrasionszyklen mit und ohne Sandpartikel.



**Abbildung 6:** Wellenlängenabhängige Reflektanz nach rotierende Reinigungsversuche für große PV-Module mit Glastyp PM1 an neun verschiedenen Positionen

Die Ergebnisse verdeutlichen zum einen, dass eine Reinigung mit Sandpartikeln zerstörerischer ist als eine schmutzfreie Reinigung und dass die Wahl der Partikelart keinen direkten Einfluss auf die Intensität der Beschädigung hat. Zum anderen dass bei niedrigen Reinigungswiederholungen (kleiner 100) Beschädigungen im Glas unterschiedlich stark ausgeprägt sein können, ab ca. 150 heben sich die Unterschiede auf.

Die Ergebnisse der Reinigungstests und -analysen sollen nach Abschluss der Untersuchungen in Marokko mit den bisherigen Laborergebnissen verglichen werden, um die Praktikabilität und Zuverlässigkeit der Reinigungsmethoden in realen Umgebungen zu überprüfen.

## Arbeitspaket 4 Sensorbasierte Reinigungsmetrik

Dieser Bericht baut auf den vorangegangenen Berichten auf, die die Umsetzung eines Sensornetzwerks zur Soiling-Messung für PV-Module in Marokko und die Optimierung der Reinigungsverfahren beschrieben haben. In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Forschung bezüglich verfügbarer Metriken für optimierte Reinigungsstrategien, die Entwicklung eines verbesserten Modells für optimierte Reinigungsintervalle und die

Entwicklung eines physikalischen Modells für eine verbesserte Verschmutzungsvorhersage auf Basis von Umweltparametern vorgestellt. Zusätzlich werden die Modelle anhand von Sensordaten aus AP2 validiert.

### 1. Recherche nach verfügbaren Metriken für optimierte Reinigungsstrategien

Es wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um vorhandene Metriken und Bewertungsverfahren für die Optimierung von Reinigungsstrategien für PV-Module zu identifizieren. In der Forschung und Industrie werden dabei folgende Metriken i. d. R. verwendet (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Übersicht der meist verwendeten Reinigungsmetriken für die Bestimmung optimaler Reinigungsstrategien

Metrik	Beschreibung	Anwendbarkeit im Projekt
Soiling Rate (SR)	Soiling Rate gibt an, wie stark die PV-Module durch Verschmutzung beeinträchtigt sind. Sie wird oft als Prozentsatz angegeben und zeigt den Verlust an Energieertrag aufgrund von Soiling.	Ja
Energy Yield Loss	Diese Metrik gibt den prozentualen Verlust an Energieertrag im Vergleich zu einem gereinigten PV-Modul an. EYL berücksichtigt den Einfluss von Soiling auf die Effizienz der PV-Anlage.	Setzt ein regelm. Reinigung eines Referenzmodul voraus
Cleaning Frequency (CF)	Die Cleaning Frequency gibt an, wie oft eine Reinigung der PV-Module erforderlich ist, um den Soiling-Effekt zu minimieren. Eine niedrige Cleaning Frequency bedeutet, dass die PV-Anlage weniger häufig gereinigt werden muss, was Kosten und Ressourcen spart.	Ja
Performance Ratio (PR)	Die Performance Ratio ist das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen Energieertrag einer PV-Anlage und dem theoretisch möglichen Ertrag unter optimalen Bedingungen. Eine geringe PR kann auf Verschmutzung und Soiling hinweisen.	Bedingt, da der tatsächliche Energieertrag für große Anlagen mit einer großen Unsicherheit >10% belegt ist, so dass kleine Verschmutzungen im Rauschen untergehen
Levelized Cost of Energy (LCoE)	Diese Metrik bewertet die Gesamtkosten der Energieerzeugung über die Lebensdauer der PV-Anlage. Soiling kann die LCoE erhöhen, daher ist es wichtig, optimierte Reinigungsstrategien zu finden, um die Gesamtkosten zu minimieren.	Bedingt, da der LCOE in einstrahlungsreichen Regionen i. d. R. deutlich kleiner ausfällt
Return of Investment (ROI)	Der ROI gibt an, wie schnell sich die Investition in die PV-Anlage durch die Energieeinsparungen und den Verkauf von überschüssigem Strom amortisiert. Eine effektive Reinigungsstrategie kann den ROI verbessern.	Ja
Availability and Performance Ratio (APR)	Die APR misst die Verfügbarkeit und Leistung einer PV-Anlage im Laufe der Zeit. Soiling kann die Verfügbarkeit und Leistung beeinträchtigen, daher ist die Reinigung wichtig, um eine hohe APR zu gewährleisten.	Nein, da Soiling keinen Gesamtausfall der Anlage provoziert

Die unterschiedlichen Ansätze wurden analysiert, um diejenigen auszuwählen, die sich am besten für die Bedingungen in Marokko eignen. Die Auswahl der geeigneten Bewertungsmetriken hängt von den spezifischen Zielen der Betreiber. Es ist wichtig, dass die Metriken die relevanten Faktoren berücksichtigen, die die Leistung der PV-

Anlage beeinflussen (z. B. technische Ausfälle von Wechselrichtern, Moduldefekte oder Verschattungen), einschließlich der Umweltbedingungen (z. B. Einstrahlung, Temperatur, PVMS Sensormesswerte) in der Wüste und der Wirksamkeit von Reinigungsmethoden.

## 2. Entwicklung eines verbesserten Modells für optimierte Reinigungsintervalle

Die bestehenden Metriken können verbessert werden, indem sie system- und umweltspezifische Faktoren berücksichtigen. Ein Ansatz bestand darin, für die Berechnung der optimalen Reinigungsfrequenz die tatsächlichen lokalen Wetterdaten einzubeziehen, statt allgemeiner Wetterdaten (TMY Daten, TMY = „typisches meteorologisches Jahr“). Außerdem wurden dafür Methoden des Maschinellen Lernens verwendet, um die Abhängigkeiten zwischen Soiling Loss und Umweltparametern abzubilden.

Ein anderer Ansatz bestand darin, basierend auf historischen Performance Daten die Tage bis zur nächsten Reinigung anzupassen. Dafür wurde in Anlehnung an [1] ein Modell angepasst, dass die optimale Anzahl an Tagen für einen gegebenen Zeitpunkt  $t$  anhand der letzten historischen 14 Tage berechnet. Die nachfolgenden Formeln wurden dafür verwendet:

$$cyc_{opt} = \frac{365}{n_{opt}} = 365 \sqrt{\frac{Y_{spec} SR I A}{2 u}} \quad [1]$$

$$\Rightarrow n_{opt} = \sqrt{\frac{2 u}{I A Y_{spec} SR}}$$

$n_{opt}$  ... number of days between cleaning [d]  
 $Y_{spec}$  ... specific energy yield [kWh/kWp]  
 $I$  ... incentives [€/kWh]  
 $SR$  ... constant (average) soiling rate [-]  
 $A$  ... effective area [kWp/m<sup>2</sup>]  
 $u$  ... costs for cleaning [€/m<sup>2</sup>]  
 $cyc_{opt}$  ... cycles per year [-]

**New: How many days I have to wait for cleaning?**

$$SR = const. \rightarrow SR(t) = \frac{\sum_{i=t-2w}^t (i - \bar{i}_{2w})(SR(i) - \bar{SR}_{2w})}{\sum_{i=t-2w}^t (i - \bar{i}_{2w})^2}$$

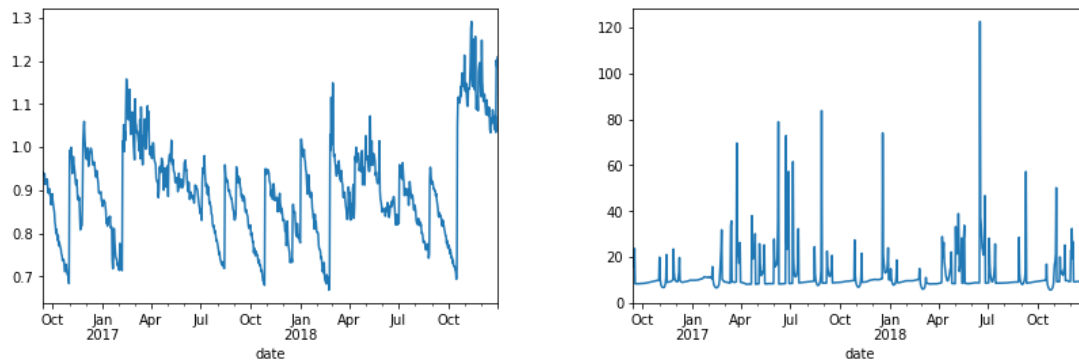
$\Delta t = [t - 2w, t]$  ... time period of last 2 weeks

$$Y_{spec} = const. \rightarrow Y_{spec}(t) = \sum_{i=t-2w}^t Y_{spec}(i)$$

If  $SR(t) \leq 0 \rightarrow SR = 0$

$$n_{opt} = const. \rightarrow n_{opt} = \sqrt{\frac{2 u}{I A Y_{spec}(t) SR(t)}}$$

Abbildung 7 demonstriert für einen gegebenen Datensatz an gemessenen Verschmutzungsmessungen für einen Wüstenstandort die Schätzung der optimalen Anzahl von Tagen bis zur nächsten Reinigung.



**Abbildung 7:** Anwendung einer angepassten Metrik (dynamische optimale Reinigungsfrequenz basierend auf den letzten 2 Wochen) für Verschmutzungsdaten an einem charakteristischen Wüstenstandort  
links: Verschmutzungsprofil (einheitenlos) aus dem Verhältnis zwischen Einstrahlung und Systemperformance;  
rechts: berechnete Anzahl an Tagen bis zur nächsten Reinigung

## Arbeitspaket 5 Verwertungskonzept

Anschließend an die vorangegangene Entwicklung und Implementierung eines Sensornetzwerks zur Soiling-Messung für PV-Module in Marokko wurde eine Marktrecherche und -analyse für Produkte zur Soilingerkennung zusammengestellt, um ein weiterführendes Verwertungskonzept für das entwickelte und validierte Konzept abzuleiten.

### 1. Marktrecherche und Analyse für Produkte zur Soiling-Detektion

Es wurde eine umfassende Marktrecherche durchgeführt, um Produkte und Technologien zur Soiling-Detektion zu identifizieren und die Wettbewerbslandschaft zu verstehen, um mögliche Synergien mit den entwickelten Sensoren und Reinigungsmetrik zu erkennen. Entsprechend der Recherche beruhen die Produkte auf einer der folgenden Technologien:

Pyranometer/ Pyrheliometer:	Diese Sensoren messen die Sonneneinstrahlung auf die PV-Module. Eine Verschmutzung führt zu einer Abschwächung der eingestrahlten Lichtmenge, was sich in den Messwerten dieser Sensoren widerspiegeln kann.
IR-Kameras:	Infrarotkameras können zur Erkennung von Hotspots verwendet werden, die durch Verschmutzung oder Beschädigung auf den PV-Modulen entstehen können. Hotspots führen zu lokalen Überhitzungen, die zu einem Leistungsabfall führen.
Elektrische Sensoren:	Strom- und Spannungssensoren können zur Messung des Energieertrags der PV-Anlage verwendet werden. Eine Verschmutzung führt zu einem geringeren Energieertrag, der durch diese Sensoren erfasst werden kann.
Sensoren zur Temperaturmessung:	Sensoren zur Messung der PV-Modul-Temperatur können ebenfalls auf Verschmutzung hindeuten, da eine verminderte Wärmeabfuhr aufgrund von Verschmutzung zu einer Erhöhung der Modultemperatur führen kann.

Kontaktsensoren:	Es gibt auch Sensoren, die direkt auf den PV-Modulen angebracht werden können und die Verschmutzung durch den direkten Kontakt mit der Oberfläche erfassen.
Optische Sensoren:	Diese Sensoren nutzen optische Technologien, um die Transparenz und Sauberkeit der PV-Moduloberfläche zu messen und Verschmutzungen zu erkennen.

Während in moderaten Klimaten Sensorik aufgrund des Kostendrucks weniger priorisiert werden, werden sie in ariden Klimaten überproportional verwendet, um den Energieertrag maximal auszunutzen.

Während Reinigungen bei System im Gigawatt-Bereich mittlerweile höchst automatisiert über Robotik realisiert werden, sind diese allerdings i. d. R. nicht sensorgetrieben, sondern werden einmal alle x Tage ausgeführt. Kleinanlagen wurden bisher häufig manuell gereinigt, was ebenfalls wenig sensorgetrieben erfolgt war. Hier besteht weiterhin Bedarf, Sensoren zu implementieren, um Reinigungen minimal Glas schonend auszuführen.

Es ist zu beachten, dass der Einsatz dieser Konzepte und Produkte in Afrika von verschiedenen Faktoren wie den spezifischen Umweltbedingungen, technische Infrastruktur, der Marktnachfrage, den finanziellen Ressourcen und den technischen Fähigkeiten abhängt. In einigen Regionen Afrikas, in denen PV-Anlagen weit verbreitet sind (vorrangig Nord- und Südafrika), werden bereits einige dieser Technologien eingesetzt.

## *2. Erstellung eines weiterführenden Verwertungskonzeptes für entwickelte Sensoren und Reinigungsmetrik*

Basierend auf den Ergebnissen der Marktrecherche und -analyse wurde ein weiterführendes Verwertungskonzept für die entwickelten Sensoren und Reinigungsmetrik erstellt. Das Konzept umfasst potenzielle Anwendungsbereiche und Zielmärkte in Afrika für die Technologien, strategische Partnerschaften und Kooperationen sowie eine mögliche kommerzielle Vermarktungsstrategie:

1. Marktdefinition: der Zielmarkt sind in erster Phase afrikanische Länder, aufgrund der kontinentalen und kulturellen Nähe. Es sollen solareinstrahlungsreiche Länder angesprochen werden, deren PV-Systeme vorrangig in trockenen Wüsten, wüstenähnlichen oder verschmutzungsintensiven Regionen (z. B. Bergbau, Landwirtschaft) installiert werden. Die einzelnen Märkte pro Land können sich stark unterscheiden, je nach entwickelter PV-Ausbau-Geschwindigkeit, Investitionsgeschehen und etablierten O&M Qualitätsstandards. Es wird empfohlen, in zweiter Phase eine detaillierte Analyse der bevorzugten afrikanischen Märkte durchzuführen.

2. Technologieanpassung: um die Akzeptanz und Relevanz des entwickelten Sensors in Afrika zu erhöhen, ist es wichtig, dass zu vermarktende Produkt an die lokalen Bedingungen und Gegebenheiten anzupassen: einfache Bedienbarkeit für Fremdnutzer, erweiterte Analysefunktionen der Daten, Verwendung lokaler Zeitstempel sowie Anpassungen an die Landessprachen in der Bedienungsanleitung und bei Beschreibungen am Gerät. Zudem sollte eine universelle Schnittstelle für die Integration des Produkts in bestehende Monitoring-Infrastrukturen der PV-Systeme bestehen, um eine hohe Kompatibilität ermöglichen.

3. Partnerschaften und Netzwerkaufbau: der Aufbau von Partnerschaften mit lokalen PV-Anlagenbetreibern, Solarunternehmen, Regierungsbehörden und

Forschungseinrichtungen ist entscheidend, um das Vertrauen in die Technologie zu stärken und den Zugang zum Markt zu erleichtern. Das Schaffen von Netzwerken und Kooperationen ermöglicht auch den Austausch von Wissen und Erfahrungen.

4. Schulung und Bewusstseinsbildung: die Einführung neuer Produkte erfordert oft Schulung und Bewusstseinsbildung bei den potenziellen Nutzern. Workshops, Schulungen und Informationskampagnen können dazu beitragen, das Verständnis für die Bedeutung der Verschmutzungserkennung in PV-Systemen zu fördern und die Vorteile der Technologie aufzuzeigen.

5. Preisgestaltung und Finanzierung: eine kostendeckende Preisgestaltung ist entscheidend, um die Wettbewerbsfähigkeit des Sensors auf dem Markt zu gewährleisten. Flexible Finanzierungsoptionen und Angebote für Miete oder Leasing können den Zugang zur Technologie erleichtern, insbesondere für kleinere PV-Anlagenbetreiber.

6. Testphasen und Pilotprojekte: die Durchführung von Testphasen und Pilotprojekten in ausgewählten afrikanischen Märkten ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit des Sensors unter realen Bedingungen zu demonstrieren und Kundenfeedback zu sammeln. Positive Testergebnisse und Erfolgsgeschichten können das Vertrauen in die Technologie stärken.

7. Nachhaltigkeit und Kundensupport: ein wichtiges Element des Verwertungskonzepts ist die langfristige Nachhaltigkeit und der Kundensupport. Die Bereitstellung von Wartungs- und Supportdienstleistungen gewährleistet eine reibungslose Nutzung der Technologie und baut eine langfristige Kundenbindung auf.

8. Zertifizierung und Standards: die Einhaltung von relevanten Zertifizierungen und Qualitätsstandards ist entscheidend, um das Vertrauen der Kunden zu gewinnen und die Einhaltung von Industriestandards zu demonstrieren.

### *3. Suche nach weiterführenden Fördermöglichkeiten in Marokko und Deutschland*

Um die technische Weiterentwicklung, die Datenanalyse und die Vermarktung der entwickelten Sensorik zu unterstützen, werden stetig weitere Fördermöglichkeiten in Marokko und Deutschland recherchiert. Die Identifizierung und Nutzung dieser Fördermöglichkeiten sollen dazu beitragen, die Verwertung und den Markteintritt der entwickelten Technologien zu beschleunigen und die Nachhaltigkeit des Projekts sicherzustellen.

Offene Punkte für Nachfolgeprojekte:

- Langzeitbewertung der Sensorik
- Integration von Maschinellen Lernen für datengetriebene Verschmutzungsanalyse
- Selbstreinigende Sensorik und Beschichtungen
- Skalierbarkeit für die optimierte Betriebsführung in Großsystemen

## **Stand des Vorhabens im Vergleich zur Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung**

Das Projekt lief zu großen Teilen entsprechend der anfänglichen Planung.

Für den konstanten Wissensaustausch und gemeinsame Steuerung der Projekthinhalte wurden regelmäßige Projekttreffen durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle führt dabei die absolvierten regulären Gesamttreffen auf. In diesen Treffen wurden jeweils aktuelle Aufgaben sowie Ergebnisse präsentiert und diskutiert. Darunter befanden sich auch die Vorstellungen der Arbeiten der PhD Studentin Frau Maryam Mehdi und Herr Nabil Ammari.

**Tabelle 3:** Übersicht der Hauptprojekttreffen im Projekt

<b>Datum</b>	<b>Zweck</b>	<b>Art der Durchführung</b>
21.01.2021	Offizieller Projektstart	Virtuell
28.04.2021	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
24.05.2021	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
30.06.2021	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
28.07.2021	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
25.08.2021	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
29.09.2021	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
27.10.2021	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
24.11.2021	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
31.05.2022	Internes Projekttreffen	Virtuell
08.06.2022	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
20.06.2022	Internes Projekttreffen	Virtuell
23.09.2022	Internes Projekttreffen	Virtuell
06.10.2022	Reguläres Projekttreffen	Virtuell
19.10.2022	Reguläres Projekttreffen	Virtuell

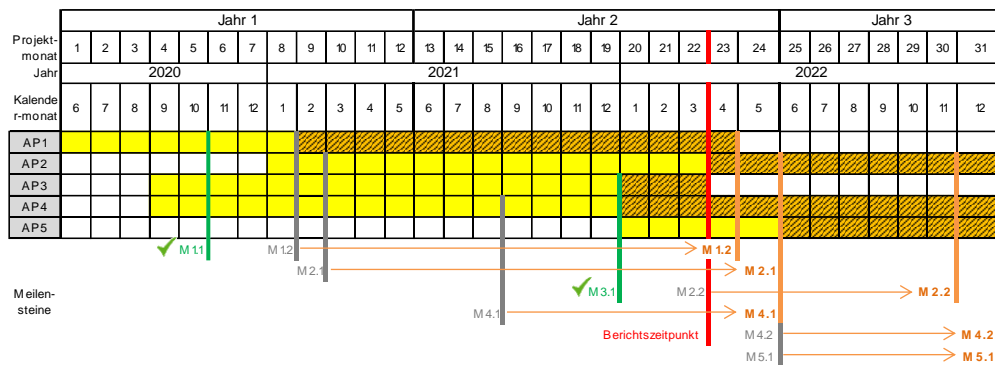
Der ursprüngliche Projektplan von SoDeCo wurde Ende 2019 entworfen. Aufgrund der durch die Pandemie hervorgerufenen Einschnitte in die Arbeitsweise aller Partner sowie den erschwerten Lieferbedingungen wurden weitere Anpassungen im Projektplan und dem weiteren Vorgehen getroffen.

Aufgrund der Neukonzeptionierung des Sensorkonzepts seitens der marokkanischen Partner musste die Komponenten- und Geräteliste angepasst werden. Entsprechend dieser Änderungen und der dafür benötigten Bestandteile wurde im Juni 2021 eine Umwidmung einzelner Positionen beim Projektträger beantragt.

Die Arbeiten aus WP1 verzögern sich insgesamt um 15 Monate und wurden im Frühjahr 2022 abgeschlossen. Dies hat Auswirkungen auf den Beginn der Arbeiten in WP2, die Inbetriebnahme der Prototypen und weiteren Sensorik an den verschiedenen Messorten sowie der Aufzeichnung von Messdaten, die für WP4 und WP5 benötigt werden.

Für einen erfolgreichen Abschluss des Projektes wurde beim Projektträger eine kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2022 beantragt. Dadurch ergeben sich weitere Anpassung im Zeitplan, wie in Abbildung 8 zu sehen ist.





**Abbildung 8:** Aufgrund der unvorhersehbaren Engpässe mussten Anpassungen im Zeitplan vorgenommen werden (Änderungen in Orange, Schraffur: Verlängerung der Arbeitspaket Dauer)

## Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

### *Personal (Position 0812)*

Die im Projekt durchgeführten wissenschaftlichen und organisatorischen Arbeiten (siehe Beschreibung der Arbeitspakete 1 bis 5), einschließlich Beschaffung, Koordination und Administration, wurden durch drei Mitarbeitenden der Hochschule Anhalt ausgeführt.

### *Gegenstände (Position 0831) und sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben (Position 0843)*

Für die erfolgreiche Umsetzung des Projekts "SoDeCo" waren verschiedene Verbrauchsmittel und Arbeitsmittel unerlässlich.

Im Rahmen der Sensorentwicklung und Prototypenfertigung wurden moderne Elektronikkomponenten, Sensoren und Mikrocontroller benötigt. Zusätzlich waren verschiedene Arbeitsmittel erforderlich, um Messungen und Analysen vor Ort und im Labor durchzuführen.

Die Labor- und Freifeldtests erforderten eine Vielzahl von Komponenten, Geräten und Dienstleistungen, einschließlich des Baus eines Fundaments in Marokko. Die Komponenten wurden für qualitative und quantitative Messungen sowie zur Dokumentation der Abläufe benötigt. Zur Kalibrierung wurden ebenfalls Messgeräte verwendet, um die Korrektheit und Genauigkeit der Messungen und Daten zu gewährleisten.

Die Auswahl und Beschreibung der zu beschaffenden Artikel erfolgte durch den marokkanischen Preisträger und Partner in Marokko. Die Beschaffung dieser Verbrauchsmittel und Arbeitsgegenstände erfolgte auf deutscher Seite durch die Hochschule Anhalt. Dabei wurden die spezifischen Anforderungen des Projekts, die Anforderungen der Weiterleitung sowie die Einhaltung der rechtlichen und kaufmännischen Vergaberichtlinien und öffentlichen Vorgaben berücksichtigt.

Bei der Auswahl und Umsetzung wurde sorgfältig die angestrebte Nutzung kritisch diskutiert und jeweils im Rahmen des Projektbudgets und der wissenschaftlichen Ziele argumentiert. Dadurch sollten Fehlinvestitionen oder vermeidbare Einkäufe vermieden werden. Dies trug maßgeblich dazu bei, die Forschungsziele effizient zu erreichen, die Qualität der Ergebnisse sicherzustellen und die Kosten einzuhalten.

#### *Vergabe von Aufträgen (Pos. 0835)*

Entsprechend der im Voraus abgeschlossenen Verträge (Weiterleitungs- und Kooperationsvertrag) zwischen deutschen und marokkanischen Projektpartnern wurde die Zusammenarbeit geregelt, und die dafür vorgesehenen Mittel, hauptsächlich für Personalkosten, wurden weitergeleitet.

Zusätzliche wissenschaftliche Forschungsleistungen wurden vom Fraunhofer IMWS in Halle (Saale) durchgeführt. Deren Expertise in der mikrostrukturellen Charakterisierung von Gläsern und PV-Modulen, unter anderem im Hinblick auf Soiling und Abrasion, lieferte dem Projekt bedeutende Erkenntnisse. Dazu gehören einerseits die Bewertung der Beobachtungen zum Verstaubungsverhalten sowie der Abrasions- und Reinigungseigenschaften und andererseits die Eignung und Verwendbarkeit der angedachten Lichtsensoren.

## **Notwendigkeit und Angemessenheit des geleisteten Projektarbeiten**

Die durchgeführten Projektarbeiten sind von entscheidender Bedeutung, um die definierten Forschungsziele im Rahmen des Vorhabens zu erreichen. Die Entwicklung des Sensornetzwerks zur Verschmutzungserkennung für PV-Systeme in semi-/ariden Klimaten erfordert nicht nur fachliche Expertise, sondern auch Ressourcen für Konzeption, Prototypenentwicklung, Outdoor-Tests und Laboruntersuchungen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus Labor- und Freifeldtests sowie die Integration adaptiver Algorithmen sind entscheidend, um effizientere Solarenergiesysteme zu entwickeln und die Wirtschaftlichkeit der Projekte zu gewährleisten.

Die Mittel, die für dieses deutsch-afrikanische Vorhaben bereitgestellt wurden, sind daher notwendig und angemessen, da keine alternative Finanzierungsmöglichkeit zum Zeitpunkt der Projektentwicklung zur Verfügung stand, die eine derartige unabhängige, dezentrale und umfängliche Forschung ermöglicht hätte. Die Angemessenheit der bereitgestellten Zuwendungsmittel (in Form, Widmung, Umfang) wird durch die präzise Ausrichtung auf die spezifischen Anforderungen des Projekts gewährleistet. Dies ermöglicht eine effektive Nutzung und Optimierung der Solarenergie in semi-/ariden Klimaten und unterstützt die lokale afrikanische Produktentwicklung.

## **Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse und Fortschreibung des Verwertungsplans**

Die Umsetzung des Sensornetzwerks zur Erfassung der Verschmutzungsintensität erfolgte in mehreren gut definierten Schritten, beginnend mit der Konzeption und Überarbeitung des Sensorkonzepts bis hin zum Bau der Sensoren für das Messnetzwerk. Die sorgfältige Planung, Entwicklung und Evaluierung führte zu einem

zuverlässigen und leistungsfähigen Sensornetzwerk, das in der Lage ist, wertvolle Daten über die Umweltbedingungen zu erfassen und damit einen wichtigen Beitrag zur Umweltüberwachung und -forschung leistet.

Die Umsetzung der weiteren Schritte der Soiling-Messung mittels Sensornetzwerks ermöglichte die Erfassung wertvoller Daten an verschiedenen Standorten. Die Kombination aus Überprüfung und Auswahl von Standorten, dem Ausbringen der Sensoren, der Überprüfung und Analyse der Messdaten sowie der Pflege der Standorte führte zu aussagekräftigen Ergebnissen. Die Auswertung und der Vergleich der standortbezogenen Soiling-Daten liefern Einblicke in das Verhalten von PV-Modulen unter unterschiedlichen Umweltbedingungen und unterstützen die Entwicklung effizienterer Solarenergiesysteme.

Die Durchführung von Reinigungstests und -analysen sowie die Erstellung eines Anforderungs- und Fehlerkatalogs haben zu einer optimierten Reinigungsstrategie für PV-Module in Marokko geführt. Die Auswahl geeigneter Reinigungsmethoden und die Berücksichtigung des Schädigungspotenzials gewährleisten eine weniger aggressive Soiling-Entfernung, ohne die Oberfläche der PV-Module zu stark zu gefährden. Diese Erkenntnisse sind von großer Bedeutung für die nachhaltige und effektive Nutzung der Solarenergie in Marokko und können auch in anderen Regionen mit ähnlichen klimatischen Bedingungen von Nutzen sein.

Die optimierten Reinigungsintervalle tragen dazu bei, den Energieertrag der PV-Anlagen zu maximieren und gleichzeitig den Reinigungsaufwand zu reduzieren. Das maschinelle Lernen Modell zur Verschmutzungsvorhersage ermöglicht eine rechtzeitige Planung von Reinigungsmaßnahmen, um den negativen Einfluss von Soiling auf die Leistung der PV-Module zu minimieren. Die Ergebnisse dieser Forschung bieten wertvolle Erkenntnisse für die Solarindustrie und tragen zur Förderung erneuerbarer Energien in Marokko und darüber hinaus bei.

Die Marktrecherche und -analyse für Produkte zur Soiling-Detektion ermöglichte eine fundierte Bewertung der Wettbewerbssituation und potenzieller Anwendungsbereiche für die entwickelten Sensoren und Reinigungsmetrik. Das weiterführende Verwertungskonzept bietet eine klare Strategie für die Integration und Vermarktung der Technologien in unterschiedlichen Märkten.

Die Integration der entwickelten Sensoren und Reinigungsmetrik in bestehende Überwachungssysteme oder als eigenständige Lösung wurden geprüft, um die Mehrwerte und Alleinstellungsmerkmale hervorzuheben.

## **Relevante Ergebnisse Dritter**

Es liegen aktuell keine Ergebnisse von dritter Seite vor, welche für die Durchführung von entscheidender Relevanz sind.

## **Veröffentlichungen**

- (1) Nabil Ammari, Maryam Mehdi, Ahmed Alami Merrouni, Hicham El Gallassi, Elmiloud Chaabelasri, Abdellatif Ghennioui. Experimental study on the impact of soiling on the modules temperature and performance of two different PV technologies under hot arid

climate. Heliyon. Volume 8. Issue 11. November 2022. e11395. ISSN 2405-8440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11395>.

- (2) Maryam Mehdi, Nabil Ammari, Ahmed Alami Merrouni, Hicham El Gallassi, Mohamed Dahmani, Abdellatif Ghennioui. An experimental comparative analysis of different PV technologies performance including the influence of hot-arid climatic parameters: Toward a realistic yield assessment for desert locations. Renewable Energy. Volume 205. March 2023. Pages 695-716. ISSN 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.082>.
- (3) BMBF Internationales Büro. Projekt SoDeCo (2020) – Verschmutzungserkennung für PV-Anwendungen und Reinigungsoptimierung in ariden und semiariden Gebieten Nordafrikas. May 2023. URL: [https://www.internationales-buero.de/de/gaiaa\\_gefoerdertes\\_projekt\\_sodeco.php](https://www.internationales-buero.de/de/gaiaa_gefoerdertes_projekt_sodeco.php). Zuletzt aufgerufen am 24.11.2023
- (4) Maryam Mehdi, Nabil Ammari, Ahmed Alami Merrouni, Aboubakr Benazzouz, Mohamed Dahmani. Experimental investigation on the effect of wind as a natural cooling agent for photovoltaic power plants in desert locations. Case Studies in Thermal Engineering. Volume 47. July 2023. 103038. ISSN 2214-157X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103038>.
- (5) Ahmed Alami Merrouni, Ammari Nabil, Hicham Elgallassi, Aboubakr Benazzouz, Klemens Ilse, Ralph Gottschalg. SoDeCo: Soiling Detection for PV application and Cleaning Optimization in arid and semi-arid areas of North Africa. WAITRO summit 2022. November 2022. Cape Town.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Verschmutzungserkennung für PV-Anwendungen und Reinigungsoptimierung in ariden und semiariden Gebieten Nordafrikas		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2022	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hochschule Anhalt	
9. Ber. Nr. Durchführende Institution	10. Förderkennzeichen 01DG20003	
	11. Seitenzahl 20	
	12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	
13. Literaturangaben	14. Tabellen	
	15. Abbildungen	
	16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung In diesem Sachbericht werden die umfassenden Fortschritte und Ergebnisse des Forschungsprojekts SoDeCo zur Entwicklung eines Sensornetzwerks zur Verschmutzungserkennung für PV-Systemen in semi-/ariden Klimaten präsentiert. Die Umsetzung erfolgte durch mehrere gemeinsamen Schritte im Konsortium, von der Konzeption und Überarbeitung des Sensorkonzepts, Prototypenentwicklung und Outdoortest bis hin zur Bewertung von Reinigungsverfahren und der Vorhersage von Reinigungszyklen.		
19. Schlagwörter		
20. Verlag	21. Preis	