

AVUSpro Automatisierte in-situ Messung von Verschmutzung zur Standortbewertung und im Betrieb solarthermischer Kraftwerke

Gemeinsamer Schlussbericht

- öffentliche Fassung –

Förderkennzeichen: 03EE0529 A,B,C

Danksagung

Das Forschungsprojekt AVUSpro wurde in der Zeit vom 01.11.2019 bis zum 30.06.2023 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE0529 betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.}

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, PSE Instruments GmbH und TSK Flagsol Engineering GmbH gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung aller Teilprojekte im Sinne eines Gesamtberichts. Dieser umfasst so auch die folgenden Teilprojekte:

Teilprojekt A Fkz: 03EE0529 A

Teilprojekt B Fkz: 03EE0529 B

Teilprojekt C Fkz: 03EE0529 C

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

AVUSPro

Automatisierte in-situ Messung von Verschmutzung zur Standortbewertung und im Betrieb solarthermischer Kraftwerke

Gemeinsamer Schlussbericht

Teilprojekt A:

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg

Teilprojektleiter: Dr.-Ing. Gregor Bern; gregor.bern@ise.fraunhofer.de



Teilprojekt B

PSE Instruments GmbH in Freiburg

Teilprojektleiter: Dipl.-Ing. Jan Steinmetz; jan.steinmetz@pse.de



Teilprojekt C

TSK Flagsol Engineering GmbH in Köln

Teilprojektleiterin: M.Sc. Sonia Carolina Martinez Beltrán; sonia.martinez@flagsol.de



Förderkennzeichen: 03EE0529 A, B und C

Berichtszeitraum: 01.11.2019 – 30.06.2023

Gesamtprojektleitung: Dr.-Ing. Gregor Bern

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstr. 2

79110 Freiburg im Breisgau

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhalt

1. Ausgangssituation des Vorhabens.....	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	7
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	7
2.1.1 AP 1 Projektmanagement (AP-Leitung: ISE)	9
2.1.2 AP 2 Geräteentwicklung (AP-Leitung: PSE).....	9
2.1.3 AP 3 Standortcharakterisierung und Feldtests (AP-Leitung: ISE)	23
2.1.4 AP 4 Anwendung auf O&M im Solarkraftwerk (AP-Leitung: Flagsol)	41
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	48
2.3 Notwendigkeit der Arbeit.....	48
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse	48
2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite	49
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	49
3. Referenzen	50

1. Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Die Verschmutzung von Spiegeln oder Absorber-Elementen ist stark standortspezifisch und kann sogar innerhalb eines Kraftwerksstandorts signifikant variieren. Die verantwortlichen Prozesse hängen stark von der regionalen und lokalen Beschaffenheit der Erdoberfläche, natürlichen und anthropogenen Emissionen in der Umgebung und den Wetterbedingungen ab. Dies führt zu hohen Unsicherheiten bei der Ertragsprognose und bei den Betriebskosten. Da die mit Unsicherheiten verbundenen Finanzierungskosten, Ertragsminderungen sowie Kosten für Reinigung im Betrieb einen signifikanten Beitrag zur Wirtschaftlichkeit solarer Kraftwerke darstellen, ist eine bessere Kenntnis der Verschmutzungscharakteristika und -raten wichtig für Standortwahl und Qualifizierung eines Kraftwerksprojekts. Mit immer geringer werdenden Installationskosten, gewinnt das Thema Betriebskosten zunehmend an Gewicht. Eine automatisierte und kosteneffiziente tägliche Bestimmung des Verschmutzungsgrades im Kraftwerksbetrieb ermöglicht die Optimierung von Reinigungszyklen und die verbesserte Kurzzeitprognose des Ertrags während des Betriebs. Das für größere Praxisnähe noch weiter zu entwickelnde AVUS-Messgerät trägt durch Risikominderung und Betriebsoptimierung zur weiteren Senkung der Kosten solarer Stromerzeugung bei. Erste Prototypen wurden im Projekt AVUS (FKZ 0325693) entwickelt und erfolgreich getestet, allerdings wurde weiterer Forschungsbedarf identifiziert, den das vorliegende Projekt adressierte.

Ziele des Vorhabens war die Weiterentwicklung eines Gerätes zur automatisierten Erfassung von Verschmutzung, das Testen von Prototypen an Standorten mit unterschiedlichen Umweltbedingungen, die Entwicklung von Methoden zur verbesserten Standortcharakterisierung, die Entwicklung von Methoden zum verbesserten Betrieb solarthermischer Kraftwerke durch optimierte Reinigung und die Analyse von Verschmutzungsprozessen.

1.2 Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens

Aufgrund der Covid-19 Pandemie, die kurz nach Projektbeginn ausbrach, kam es zu Verzögerungen im Forschungsprojekt, welche nicht aufgeholt werden konnten. Die Auswirkungen der Pandemie waren vielfältig und haben sich auf unterschiedliche Bereiche des Projektes ausgewirkt, obwohl starke Anstrengungen unternommen wurden, zu reagieren und effizient voran zu schreiten.

Eine der Hauptursachen für die Verzögerungen war die längere Geräteentwicklung. Aufgrund der Pandemie kam es zu Engpässen bei der Verfügbarkeit von Bauteilen, die ausliefen und nicht mehr nachbestellt werden konnten. Dies führte zu erheblichen Lieferverzögerungen und zwang uns dazu, alternative Lösungen zu finden. Es mussten größere Anpassungen am AVUS-Messkopf und am pFLEX-Reflektometer durchgeführt werden, welche ursprünglich nicht geplant waren. Zudem waren die Lieferketten stark beeinträchtigt, was zu weiteren Lieferengpässen führte.

Ein weiterer Faktor, der zu deutlichen Anpassungen beigetragen hat, war die Verzögerung und der letztendlich weitgehende Stopp des Noor Midelt Projekts. Diese Ausschreibung hatte direkte Auswirkungen auf unser Projekt und führte zu einer Unterbrechung des Fortschritts, da dieser zweite Standort nicht für die AVUS-Stationen genutzt werden konnte. Aufgrund all dieser Faktoren war es unumgänglich, das Projekt kostenneutral um 8 Monate zu verlängern. Meilensteine mussten nach hinten verschoben werden, um den neuen Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

Die wesentlichen Projektziele konnten mit diesen Anpassungen erfolgreich umgesetzt und erreicht werden. Die AVUS-Geräte konnten weiterentwickelt und an zwei Standorten erprobt werden. Umfangreiche Datensätze wurden erarbeitet und analysiert. Leider konnten aufgrund der Verzögerungen letzte Simulationen nicht innerhalb der geplanten Projektlaufzeit durchgeführt werden. Eine detaillierte wirtschaftliche Abschätzung des Potentials für eine optimierte Reinigungsstrategie war somit nicht möglich. Trotzdem konnten wir eine datenbasierte Abschätzung vornehmen, welche einen verbesserten Kraftwerkswirkungsgrad erlauben.

Nachfolgend ist das Gantt-Diagramm des Projektes aufgeführt, mit den Meilensteinen wie sie nach Anpassung geplant und erreicht wurden.

		19	2020				2021				2022				2023	
		No v	Ja n	Ap r	Ju l	Ok t	Ja n	Ap r	Jul	Okt	Jan	Ap r	Ju l	Okt	Ja n	Apr
1 2 3 4	AP Quartal	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
	Titel Monat	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42
	Projektmanageme nt	M1.1														
	Geräte- entwicklung						M2.2	M2.1	M2.3							
	Standort- und Feldtests								M3.1	M3.2			M3.5	M3.3	M3.4	
	Anwendung O&M im Solarkraftwerk										M4.1					M4.2

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Bestimmung von Verschmutzung und die Optimierung von Reinigung ist ein zunehmend wichtiges Thema für den zuverlässigen und optimierten Betrieb von solarthermischen Kraftwerken und für die verbesserte Ertragsprognose [1]. Derzeit wird der Status von CSP-Solarfeldern meist mit dem mobilen Reflektometer Reflektometer15R-RGB von Devices&Services (D&S) [2] überwacht. Alternativ haben Fraunhofer und PSE das pFFLEX-Reflektometer entwickelt, das gegenüber dem D&S Gerät weniger fehleranfällig in der der Anwendung ist. Derartige Reflektometer-Instrumente geben präzise Cleanliness-Werte, allerdings ist die manuelle Messung für die betriebsbegleitende Erfassung oder die Standort-Untersuchung in abgelegenen Wüstenzonen personell und wirtschaftlich aufwändig.

Ein automatisiertes System, welches auf Standardbauteile von Meteostationen aufbaut, wurde mit dem TraCs-Instrument [3] eingeführt. Hierbei werden zwei Pyrheliometermessungen verglichen, wobei eines über einen exponierten Spiegel die direktnormale Einstrahlung vermisst, das andere direkt. TraCs benötigt intensive Wartung und tägliche Reinigung der Pyrheliometer, ist also für den mit AVUSpro geplanten Zweck nicht verwendbar. Vor allem für die Verschmutzung von PV-Modulen stellte Suntrace 2014 das HelioScale Soiling Assembly auf der Intersolar vor. Kipp+Zonen hat 2017 den neuartigen Verschmutzungssensor DustIQ für Anwendungen in der Photovoltaik vorgestellt, welcher auch ohne Direkteinstrahlung Ergebnisse erzielen soll und der neben einem PV-Modul installiert und gereinigt wird. Auch hier ist eine Anwendung für die in AVUSpro adressierten Ziele nicht gegeben. Ein weiterer Sensor, der sich noch in der Entwicklung befindet, ist das low-cost CSP-Soiling-Messgerät von IK4-Tekniker(Spanien).

Der Transfer zwischen der Verschmutzung am realen, nachgeführten Kollektor, stichprobenartigen Messungen mit mobilen Reflektometern und Messergebnisse, wie sie das AVUS Gerät erzeugt ist als wichtiger Forschungsbedarf im Projekt AVUS identifiziert worden. Erste Untersuchungen hierzu wurde von Fraunhofer ISE im EU-Projekt MinwaterCSP und in einer Kooperation mit DLR und Ciemat im Rahmen des EU Projektes SFERA-II durchgeführt. Es gab jedoch bis zum Beginn des Forschungsprojektes AVUSpro keine abschließende Methode oder Veröffentlichungen. Die Ergebnisse aus dem Vorläuferprojekt AVUS (FKZ 0325693) ergaben noch weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der Übertragbarkeit und Ableitung von optimalen Kenngrößen (spektral, geometrisch) für andere Staubverhältnisse. Der Weitergehende Untersuchung zur Anhaftung von Staub in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen (Feuchte, Wind, Temperatur), Chemismus, Partikelgröße und Form. Und der Vorhersage von Verschmutzung und Winkelabhängiger Reduktion von Reflexion im Solarfeld.

Die Reinigung des Solarfeldes und der Wasserverbrauch während des Betriebes ist ein zunehmend wichtiges Thema für Ausschreibungen und Betrieb von Kraftwerken in ariden Gebieten mit geringem Regen und Grundwasservorkommen, wie zum Beispiel in den NOOR-Kraftwerken in Ouarzazate in Marokko. Studien beschäftigten sich bisher zum Beispiel mit dem Vergleich verschiedener Reinigungsverfahren [4]. Zur Optimierung und techno-ökonomischen Analyse von Reinigungszyklen im Solarfeld gibt es Veröffentlichungen, zum Beispiel von Kearney [5], Heimsath [6], die sich jedoch nicht auf eine große Anzahl aus Messdaten aus dem Solarfeld stützen, sondern vereinfacht eine homogene Verschmutzung im Solarfeld annehmen. Im Rahmen des EU Projektes MinwaterCSP wurde in einer ersten

Studie von Rohani und Heimsath das hohe Potential von flexiblen Reinigungsstrategien basierend auf orts aufgelösten Solarfelddaten aufgezeigt, basierend auf Messwerten mit dem AVUS Messgerät im Kraftwerk Andasol3. Der Ertrag kann sich demnach um bis zu 2% jährlich erhöhen, die Reinigungskosten um 17% sinken [7].

Im Vorläuferprojekt AVUS (FKZ 0325693) wurde ein vollständig neuartiges automatisiertes Messkonzept vorgestellt. Drei wesentliche Verbesserungen gegenüber bestehenden Systemen wurden mit dem AVUS-Konzept adressiert: Messungen können unabhängig von der Sonneneinstrahlung durchgeführt werden. Wolkendurchzug oder Tageszeit haben beim AVUS-System keinen Einfluss auf die Messergebnisse. Durch die im System integrierte Referenzprobe und die vergleichende Messung mit demselben Messkopf ist der Kalibrieraufwand deutlich verringert. Der Aufwand für die präzise Nachführung mit der Sonne durch einen teuren und aufwändig zu betreibenden Sonnen-Tracker entfällt, da diese nicht als Strahlungsquelle benötigt wird. Somit kann das System in einfachere und kostengünstigere Meteostationen integriert werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Dieses Projekt wurde als Verbundprojekt mit PSE Instruments GmbH (Fkz: 03EE0529 B) mit Schwerpunkt der Geräteentwicklung, TSK Flagsol CSP Technologies GmbH (Fkz: 03EE0529 C) mit dem Fokus auf der Anwendung im Kraftwerk und dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE für Messkopffentwicklung und wissenschaftlicher Analyse (Fkz: 03EE0529 A) durchgeführt.

Darüber hinaus war insbesondere die Dornier Suntrace GmbH im Unterauftrag des Fraunhofer ISE stark involviert und unterstützte maßgeblich bei der Auslegung der Meteostationen, der Integration und der automatisierten Datenbereitstellung und Qualitätsprüfung. Darüber hinaus führte die Dornier Suntrace GmbH im Unterauftrag die Wartungsmissionen durch. Auch bei der Suche nach alternativen Standorten und der Vorprüfung war Dornier Suntrace involviert. Insgesamt trug der Beitrag im Rahmen des Unterauftrags maßgeblich zum Gelingen des Forschungsprojektes bei.

Für die Bereitstellung der Messdaten aus dem Kraftwerk Shagaya wurde ein Vertrag zwischen TSK Flagsol und dem Kuwait Institut for Scientific Research KISR geschlossen, welche eine Nutzung der Messdaten erlaubt. KISR ist Eigentümer des Kraftwerks.

In wissenschaftlicher Hinsicht bestand Austausch zum EU-Projekt SFERA-III sowie mit der Optik-Arbeitsgruppe der IEA SolarPACES Task III, bei welchen Fraunhofer ISE mitarbeitet. So konnten Ergebnisse aus dem AVUS-Projekt in die Erarbeitung einer ersten Guideline für die Vermessung von verschmutzten Reflektoren für die CSP-Anwendung einfließen.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Das Projekte AVUSpro konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die Ziele konnten im Rahmen der bereitgestellten Mittel und nach Gewährung einer kostenneutralen Verlängerung erreicht werden. Nachfolgend sind die gestellten Ziele und erreichten Ergebnisse kurzgefasst aufgelistet. Darauf folgt die eingehende Beschreibung der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse des Forschungsprojektes anhand der einzelnen Arbeitspakete.

Tabelle 1: Zusammengefasste Ziele und Ergebnisse des Projektes

Arbeitspaket	Ergebnis
AP 2	Erweiterte AVUS Prototypen gebaut mit verbesserter Zuverlässigkeit hinsichtlich Umwelteinflüssen und qualifiziert (PSE und ISE) Das Ziel wurde erreicht. Die Zuverlässigkeit wurde an zwei Standorten über mehr als 12 Monate demonstriert. Kleine weitere Verbesserungspotentiale wurden identifiziert und bereits umgesetzt.
	Reduzierung der Produktionskosten durch den Einsatz von Standardkomponenten (PSE und ISE) Das Ziel konnte ebenfalls erreicht und bereits in den Prototypen demonstriert werden
	Autonome Datenübertragung des AVUS Geräts zum unabhängigen Einsatz (PSE) Die AVUS-Geräte erlauben sowohl die Datenanfrage über MODBUS TCP, als auch die autonome Bereitstellung der Daten über mobile Daten (LTE) über einen Server. Die Geräte sind somit vollständig autonom einsetzbar.
	Erweiterte pFlex Prototypen gebaut mit Bestimmung der Messposition durch den Einsatz von GPS Empfängern (PSE) und qualifiziert (ISE) Die Erweiterung und Verbesserung des pFLEX-Prototypen wurde erfolgreich umgesetzt. Der Einsatz von GPS, kostengünstig über das Mobiltelefon, welches zur Datensicherung und Steuerung verwendet wird, wurde implementiert und qualifiziert.
	Neues Messverfahren zur Analyse großflächiger Verschmutzung auf Spiegeln am Fraunhofer Institut getestet (ISE) Die Messung anhand eines kamerabasierten Messverfahrens wurde umgesetzt und am Fraunhofer ISE getestet.
	Konzept für Meteostationen für AVUSpro erweitert (ISE) Das Konzept wurde erweitert und eine Integration, gemeinsame Abfrage und automatisierte Auswertung mit Monatsberichten wurde erstellt.
	Verschmutzungsmonitoring mit AVUS Messgeräten demonstriert (PSE) Das Verschmutzungsmonitoring wurde mit insgesamt 6 Geräten an zwei Standorten über mehr als 12 Monate demonstriert.
	Korrosionsträchtigkeit von zwei Standorten geprüft (ISE) und Auswirkungen auf CSP Technologie untersucht (TSK) Die Korrosionsträchtigkeit wurde für den Standort Shagaya in Kuwait untersucht und ausgewertet. Der zweite Standort konnte nicht wie geplant untersucht werden, da aufgrund von Verzögerungen des kommerziellen Projektes und politischer Differenzen kein Zugang möglich war.
	Verschmutzungsverhalten an zwei Standorten über bis zu 2 Jahre gemonitort und wissenschaftlich bewertet (ISE) Das Verschmutzungsverhalten wurde an zwei Standorten gemonitort und wissenschaftlich untersucht und bewertet. Dies umfasste den Standort Shagaya mit 1,5 Jahren und Freiburg mit 1 Jahr.
AP 4	Verschmutzungsmonitoring auf Betrieb im Solarkraftwerk angewendet und Methode zur Übertragbarkeit zu Verschmutzung von Kollektoren entwickelt (ISE) Das Verschmutzungsmonitoring wurde über 1,5 Jahre durchgeführt und die Übertragbarkeit wurde anhand von Handmessungen überprüft. Darüber hinaus wurden Transferfunktionen untersucht.
	Verschmutzungsverhalten mit Proben von zwei Standorten am Teststand untersucht (Flagsol) Das Verschmutzungsverhalten wurde für den CSP-relevanten Standort Shagaya untersucht.
	Reinigungsstrategie optimiert und Kosten- Wasserspar- und Ertragspotential untersucht (ISE, Flagsol) Verbesserungen der Reinigung wurden anhand der AVUS-Messungen und Handmessungen untersucht und verschiedene Optimierungsszenarien wurden analysiert. Eine separate Studie zur Optimierung von Kosten- und Wasserspar- sowie Ertragspotential für Shagaya konnte im Rahmen des Projektes nicht abgeschlossen werden. Es wurde auf weitere Studienergebnisse zurückgegriffen.

2.1.1 AP 1 Projektmanagement (AP-Leitung: ISE)

MS- Nr.	Erzieltes Ergebnis (Kommentar)	Erreicht am
M1.1	Kick-Off Abgehalten in Freiburg, Protokoll liegt vor (planmäßig abgeschlossen)	11.2019

Im Arbeitspaket 1 wurde das Projektmanagement zusammengefasst. Dies umfasst die Organisation regelmäßiger Arbeitstreffen, teilweise im Rhythmus von 2-3 Wochen, aber auch der Projekttreffen in Freiburg und Köln. Neben den Projekttreffen vor Ort wurden, insbesondere aufgrund der Covid-19 Pandemie, vermehrt Projekttreffen online durchgeführt. Die Kommunikation und, auf Basis der Rahmenbedingungen, Anpassungen im Projekt wurden mit dem Projektträger und dem Konsortium diskutiert und vorbereitet.

Der Zugang zu Standorten für die Installation und die Bereitstellung der Daten, sowie die vertraglichen Rahmenbedingungen wurden als Teil des Managements von TSK Flagsol und Fraunhofer ISE vorangetrieben. Als erster Standort für die Erprobung im relevanten Umfeld wurde das Kraftwerk Shagaya in Kuwait gewählt, welches durch TSK Flagsol entwickelt und betrieben wurde.

Als zweiter Standort für die Untersuchung von drei weiteren Messstationen war der Ort des geplanten Kraftwerks Noor Midelt vorgesehen. Die Installation wurde durch TSK Flagsol geplant und detailliert vorbereitet. Aufgrund der Verzögerungen im Projektfortschritt von Noor Midelt konnte die Installation nicht durchgeführt werden. Verschiedene alternative Standorte wurden untersucht.

Im Interesse der Effizienz und um Ressourcen nicht ungenutzt zu lassen, wurde beschlossen, die drei AVUSpro Geräte während der Standortsuche für einen Zeitraum von mehr als einem Jahr auf der Freifläche des Fraunhofer ISE zu installieren. Diese Entscheidung wurde getroffen, um die Geräte dort zur weiteren Entwicklung in Bezug auf Hardware und Software zu nutzen. Auf diese Weise konnten Messdaten für ein industrielles Umfeld gewonnen werden und die Sensoren konnten parallel zu weiterer Sensorik, welche für Photovoltaikanwendungen eingesetzt werden, betrieben werden.

Die Freifläche des Fraunhofer ISE bietet eine vorteilhafte Umgebung für die Fortführung von Tests, Optimierungen und Weiterentwicklungen. Durch diese Maßnahme konnte die Zeit sinnvoll genutzt werden, um die Geräte auf ihre maximale Leistungsfähigkeit zu optimieren und mögliche Verbesserungen an Hard- und Softwarekomponenten vorzunehmen. Die Möglichkeit, die Geräte über einen längeren Zeitraum auf der Freifläche des Fraunhofer ISE zu nutzen, ermöglichte es dem Projektkonsortium, kontinuierlich an deren Verbesserung zu arbeiten und Entwicklungsschritte gezielt umzusetzen.

2.1.2 AP 2 Geräteentwicklung (AP-Leitung: PSE)

MS- Nr.	Erzieltes Ergebnis (Kommentar)	Erreicht am
M2.1	Erweiterter pFlex Prototyp fertiggestellt (leicht verspätet abgeschlossen)	08.2021
M2.2	Erweiterter AVUS Prototyp fertiggestellt (planmäßig abgeschlossen)	04.2021
M2.3	Kamerabasierte Messtechnik in Freiburg getestet (leicht verspätet abgeschlossen)	10.2021

Im Folgenden werden die Entwicklungen am AVUS Gerät und am pFlex Gerät getrennt betrachtet werden. Darüber hinaus werden die Arbeiten anhand der Projektpartner genannt, welche die Entwicklung maßgeblich vorantrieben, während eine enge Zusammenarbeit und gegenseitig Unterstützung im Konsortium praktiziert wurde.

Entwicklung AVUS Gerät (PSE)

Ziel der Geräteentwicklung umfasste die nachfolgenden Arbeitspunkte:

- Kostenreduktion des AVUS--Prototyps durch Integration von Standardkomponenten
- Überarbeitung des Betriebskonzeptes, Erhöhung der Zuverlässigkeit, Maßnahmen zur bedarfsweisen Vermeidung von Tau und Reif auf den Proben
- Überarbeitung der Elektronik, um gegenseitige Beeinflussung von Mechanik und optischer Sensorik zu unterbinden
- Implementierung einer Mobilfunklösung zum Stand-Alone-Betrieb.
- Direkter Anschluss und Einbindung eines Sensors um Regenereignisse zu detektieren
- Überprüfung und Erhöhung der Mindestverfügbarkeit der Messdaten

- Weiterentwicklung einer Kamera-basierten Technik zur vollflächigen Verschmutzungsmessung

Die zweite Basis für die Entwicklung des erweiterten AVUS Prototyps war die eingehende Untersuchung des im Projekt „AVUS - Automatisierte In-situ Messung von Verschmutzungsraten und -spektren“ FKZ 0325693B gebaute Prototyp 2. Dieser Prototyp war auch noch nach Ende des Projekts auf dem Freifeld vom Fraunhofer ISE im Einsatz, da die PSE ihn kostenfrei zur Verfügung gestellt hat. Bei der Untersuchung wurden die folgenden Punkte festgestellt:

- Hoher Aufwand für die Montage des Geräts, sowohl mechanisch als auch elektrisch
- Hohe Fehleranfälligkeit durch die Art der Verkabelung der Platine, des Messkopfs und der externen Komponenten
- Detektor für die Erfassung der Endlage des Expositionsarm sehr fragil
- Austausch von defekten Komponenten z.T. sehr schwierig.
- Häufiger Wasser im Gehäuse, durch tau and den Proben aber auch durch nicht korrektes schließen der „Probenschleuse“

Im internen Projektteam wurden verschiedenen Entwicklungsteam gebildet, die Anforderungen kategorisiert und in drei Hauptkategorien abgebildet:

- Entwicklung Elektronik und Messtechnik
- Entwicklung Mechanik
- Softwareentwicklung

Alle Teilaspekte wurden unter der Prämisse betrachtet die Kosten zu reduzieren und Zuverlässigkeit zu erhöhen und dabei die hohen Anforderungen and Datenzuverlässigkeit und geringem Stromverbrauch zu realisieren.

Da die Elektronik und Messtechnik durch z.B. die Wahl des PC oder den Einbau von Sensoren die Teilbereiche Softwareentwicklung und Mechanik beeinflusst, wurde die Entwicklung hier gestartet. Es wurden intern die folgenden APs definiert:

- Auswahl Regensensor
- Auswahl PC und Router für die Datenerfassung
- Optimierung der Elektronik in Hinsicht auf Zuverlässigkeit, Stromverbrauch und Reduzierung der Kosten

Die Ergebnisse werden nachfolgend ausgeführt:

Auswahl Regensensor

Die Analyse des ersten AVUS-Prototypen ergab, dass eine Information über Regenereignisse für eine präzise Auswertung erforderlich ist. Nach Diskussion mit den Projektpartnern wurde entschieden, kostengünstige Regenmelder anstelle von Sensoren zur Messung von Regenmengen zu verwenden, der hauptsächlich die Dauer von Regenereignissen erfasst. Es wurden drei Regenmelder mit unterschiedlichen Messprinzipien identifiziert. Für die Erfassung der Signale wurde eine einfache Elektronik entwickelt, welche die Signale über einen Embedded PC erfasst und am Fraunhofer Testfeld erprobt (Abbildung 1).



Firma Hydreon
Reflexionsänderung



Firma Thies
Transmissionsänderung



Firma B&B
Kapazitätsänderung



Abbildung 1: Links: Ausgewählte Sensoren mit Messprinzipien für die Vermessung auf dem ISE Testgelände. Rechts: Regenmelder mit Elektronik und Embedded PC auf dem Freigelände des Fraunhofer ISE

Basierend auf den Messergebnissen wurden zwei potenzielle Kandidaten identifiziert, die ähnliche Ergebnisse lieferten und im Kraftwerksbetrieb getestet werden sollten. Am Ende des Projekts sollte festgestellt werden, welcher Sensor die geringste Alterung aufweist und sich bewährt hat. Aufgrund des zum Abschluss des Projektes noch nicht abgeschlossenen Rücktransports der Geräte bis zur Berichtsabgabe kann noch keine finale Aussage dazu getroffen werden.

Auswahl PC und Router für die Datenerfassung

Im vorherigen Projekt wurde ein Raspberry PI für die Steuerung der Geräte genutzt. Es wurden gute Erfahrungen im Betrieb gemacht. Der weite Temperaturbereich, der für das AVUS Gerät nötig ist, liegt jedoch außerhalb der Spezifikationen des Geräts, was ein Ausfallrisiko im Anwendungsgebiet bedeutet. Deswegen wurde zunächst neue Embedded PC in Hinsicht auf Temperaturbereich und Stromverbräuchen identifiziert und dann eine Analyse des tatsächlichen Stromverbrauchs des Geräts durchgeführt. Es konnte ein IOT Gateway of Raspberry Basis identifiziert werden, dass für den Betrieb genutzt werden kann (Abbildung 2).

Für die Recherche des Routers wurde gleich vorgegangen. Da der Stromverbrauch von Standardroutern jedoch relativ hoch war, wurde entschieden, dass die Elektronik so realisiert wird, dass der Router nur 1 Stunde pro Tag gestartet wird um die Daten automatisiert an einen Server zu übertragen. Für eine remote Support, bei Problemen mit dem Gerät wurde zusätzlich ein Knopf eingebaut, der es ermöglicht den Router dauerhaft mit Energie zu versorgen.

Optimierung der Elektronik in Hinsicht auf Zuverlässigkeit, Stromverbrauch und Reduzierung der Kosten

Die Zuverlässigkeit zu erhöhen konnte vor allem dadurch erhöht werden, dass die Anzahl der Kabelverbindungen reduziert wurde. Außerdem wurde störanfällige Elektronik mit Filtern ausgestatte und die Messdatenerfassung direkt am Messkopfrealisiert und dort direkt von einem Analogen Signal in ein digitales Signal umgewandelt und dieses dann an den PC übermittelt. Es wurde zunächst ein erster Prototyp der Platine entwickelt und getestet und anschließend eine weiter Version gebaut. Diese Version ermöglichte es dann die Steuerungsplatine direkt auf dem Embedded PC zu platzieren. Die Optimierungen sind in Abbildung 2, rechts, gezeigt.

Die Kostenoptimierung wurden vor allem dadurch erzielt, dass die Platinen nicht mehr manuelle gefertigt werden müssen sondern durch die Wahl von SMD Bauteilen nun extern und automatisiert gefertigt

werden können. In der folgenden Darstellung ist der erste Prototyp der Platine mit SMD Bauteilen dargestellt.

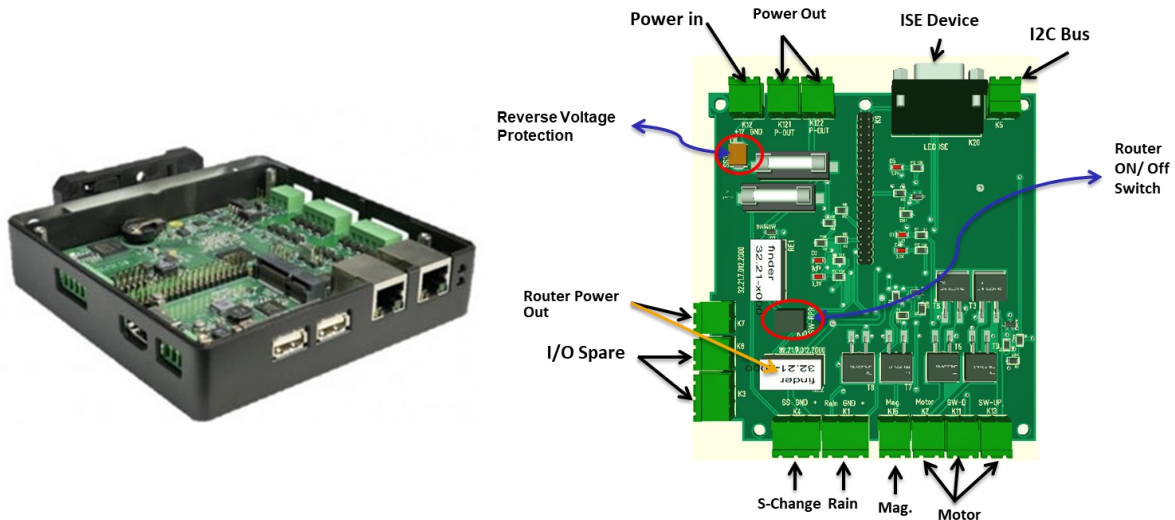
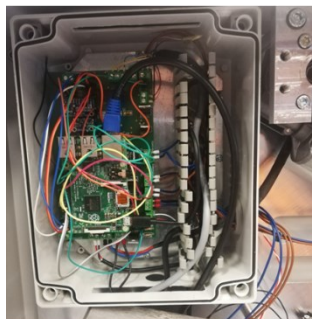


Abbildung 2: Links: Industrial Pi: Steuerungs- und Datenerfassungsmodul des AVUSpro-Sensors. Rechts: Basisplatine für Motorsteuerung, Router-Kontrolle, Regensensor, Sample-Change und Messkopf-Interface zur direkten Installation of dem Industrierechner.

Eine weiter Kostenreduktion konnte durch die Kombination der Platine mit dem Embedded PC erreicht werden, da so keine weiteren Gehäuse mehr nötig waren.

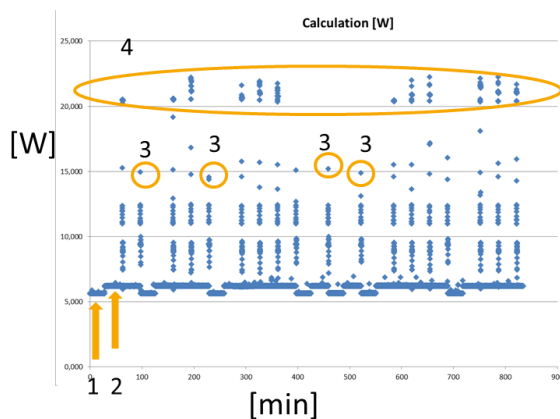
AVUS



AVUSpro



Abbildung 3: Überarbeitung des Steuermoduls des ersten AVUSpro Prototypen zur AVUSpro Steuereinheit
Ein wichtiger Parameter, der noch untersucht wurde, ist der Stromverbrauch. Im Dauerbetrieb sollte weniger als 10 W/h verbraucht werden. Die Untersuchung wurde durchgeführt, nachdem Software und Mechanik fertig entwickelt waren. In der folgenden Abbildung ist der Stromverbrauch des Geräts über neuen Messzyklen dargestellt.



Was sieht man?

1. Wenn wir nicht messen verbraucht das Gerät ca. 5,8W ohne Modbus
2. Wenn die LED eingeschaltet wird sind es ca. 0,5W mehr
3. Wenn alle Funktionen richtig laufen benötigen wir ca. 15-16W wenn der Arm fährt
4. In diesem Fall gab es einen Defekt am Relais/Endschalter, so dass der Arm nicht gestoppt wurde als er unten war, das lag an der alten Mechanik

Abbildung 4: Stromverbrauch des AVUSpro-Geräts über mehrere Messzyklen. Durchschnittlich werden weniger als 10W benötigt, mit Spitzen von bis zu 16W bei Armbewegung.

Man kann erkennen, dass der Stromverbrauch konstant bei ca. 6W liegt. Wenn der Arm für die Messung bewegt wird steigt der Verbrauch auf ca. 15-16 W an, da die Bewegung weniger als 30 Sekunden dauert, ist die Anforderung vom Durchschnittlichen Verbrauch unter 10 W/h erfüllt.

Softwareentwicklung

Die Hauptaufgaben im Projekt für die Softwareentwicklung waren die Folgenden:

- Bereitstellen einer Modbus-Schnittstelle zur Kommunikation mit externen Wetterstationen
- Automatisierte Upload der Messergebnisse in einen Cloud Dienst zur Erhöhung der Datenzuverlässigkeit
- Verbesserung der Möglichkeiten zur Fehleridentifikation der Operator, sowie Verbesserung der Usability des Geräts.

Für die Modbus Schnittstelle wurde mit den Projektpartner festgelegt, welche Parameter des AVUS Geräts an Wetterstationen übermittelt werden sollen.

Neben der Soiling rate sollten z.B. die Rain Duration und die Zeit seit der letzten Reinigung übergeben werden. Nach der Implementierung auf dem Embedded PC wurde dieser mit einem Router erweitert und nach Hamburg zu Suntrace gesendet, um die Kommunikation im Zusammenspiel mit dem Datenlogger von HelioScale-Stationen im Dauerbetrieb zu testen, bevor die Geräte ins Feld geschickt wurden.

Die Tests wurden in Hamburg über mehrere Wochen durchgeführt und konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Im Feld konnten diese Tests nicht erweitert werden, da der Kraftwerksbetreiber in Shagaya keine physische Verbindung des AVUS Geräts zur bereits bestehenden Wetterstation zuließ. Ein weiterer Punkt für die Weiterentwicklung der Software war die automatische Anbindung für den Upload der Daten in die Cloud, sodass sie nicht mehr per USB abgerufen werden müssen.

Um den Upload zu realisieren, wurden verschiedenen Möglichkeiten diskutiert. Realisiert wurde am Ende der automatisierte Upload der Daten auf einen Server in Deutschland. Der Router wird einmal pro Tag für eine Stunde eingeschaltet und die Daten in diesem Zeitfenster hochgeladen. Von dem Server konnten sowohl Fraunhofer ISE als auch Suntrace die Daten automatisiert abrufen. Bei einer bestehenden Internetverbindung hat das Konzept zuverlässig funktioniert.

Eine weitere wesentliche Aufgabe war die Erhöhung der Usability für die Betreiber des Geräts. Im AVUS Projekt hatte der Nutzer keine Möglichkeit über ein Userinterface die Geräte zu bedienen, Messintervalle zu konfigurieren oder eine Fehlerdiagnose durchzuführen. Um dies zu verbessern wurde ein Webinterface entwickelt, über das der Operator das AVUS Gerät bedienen kann. Um das Webinterface zu erreichen, muss sich der Operator ausschließlich in das vom Gerät bereitgestellten WLAN einwählen (Access Point) und dann die IP Adresse eingeben. Alle für den Betrieb relevanten Einstellungen des Gerätes können dann vom Operator vorgenommen werden. Außerdem können alle Bewegungen und Messungen manuell durchgeführt werden, um ggf. Fehler im Betrieb zu analysieren. Ein Screenshot der Software ist im folgenden Bild dargestellt.

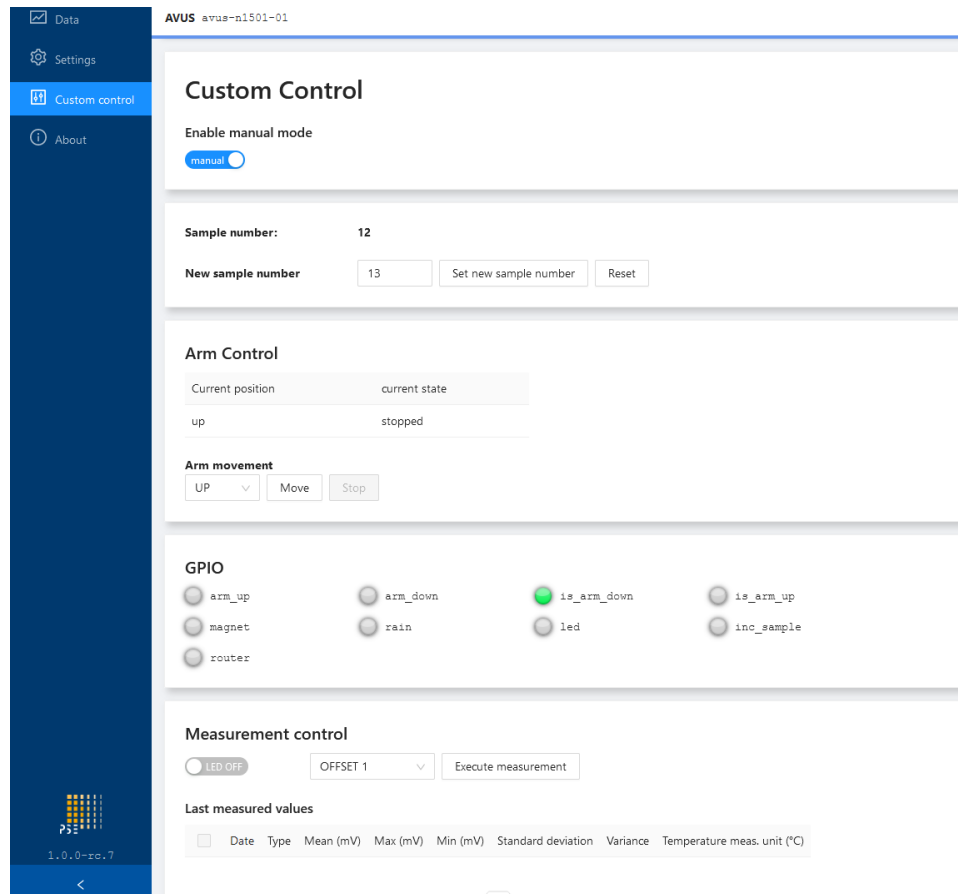


Abbildung 5: Konfigurationsschnittstelle und Statusanzeige des AVUSpro-Geräts in Form einer Weboberfläche, welche man bei LTE oder WLAN-Verbindung über das Internet oder im Access-Point-Modus erreichen kann.

Konstruktion Mechanik

Für den fehlerfreien Betrieb über lange Zeit war auch die Weiterentwicklung der Mechanik sehr wichtig. Dabei sollten die folgenden Punkte realisiert werden:

- Konstruktion eines AVUSpro Geräts in Hinsicht auf Probleme aus den ersten Geräten
- Fertigung der Teile
- Kombination der neuen Mechanik, mit der alten Elektronik aus dem ersten AVUS Projekt um Probleme in Elektronik und Mechanik getrennt voneinander untersuchen zu können
- Exposition des Geräts
- Fehleranalyse nach 6 Wochen Exposition
- Optimierung der Mechanik

Alle Punkte konnten während der Projektlaufzeit abgeschlossen werden. Bei der Neukonstruktion der Mechanik wurden folgende Punkte verbessert:

- Die Montage des Motors wurde optimiert
- Die Schleuse für das Einbringen der Probe ins Gehäuse wurde komplett erneuert, da es im alten Projekt Problem mit der Montage sowie Undichtigkeiten gab
- Der Endlagendetektor für den Arm wurde ins Gehäuse gelegt
- Der Magnet für das Halten des Arms in der Endposition wurde abgedeckt
- Der Arm wurde zur Gewichtsreduzierung aus Aluminium gefertigt, um trotzdem magnetisch den Arm halten zu können wurde Klotz aus magnetischem Edelstahl eingesetzt
- Einbau eines Ablaufs für den Fall das Wasser ins Gehäuse eindringt

Nach der Fertigung des neuen Prototyps wurde dieser auf einem Freifeld des Fraunhofer ISE getestet. Im folgenden Bild ist der neue Prototyp vorne im Bild zu sehen.



Abbildung 6: 3 AVUSpro-Prototypen am Soilingteststand auf dem Außentestfelds Fraunhofer ISE in Freiburg

Im ersten Feldtest wurde die alte Mechanik mit der neuen Elektronik gegen die neue Mechanik mit der neuen Elektronik verglichen. Das neue Gerät hatte eine sehr hohe Zuverlässigkeit, trotzdem mussten noch Kleinigkeiten (Rost am magnetischem Edelstahl und Abdeckung des Magnet) korrigiert werden, bevor die Geräte in die Langzeitexposition nach Shagaya Versand wurden.

Anpassung der AVUSpro Measurement Unit (ISE)

Mehrere Verbesserungsvorschläge und Erfahrung aus dem AVUS Projekt sind in die Elektronikentwicklung und Weiterentwicklung der gesamten AVUSpro Measurement Unit eingeflossen. Die Elektronik des AVUS-Messsystems wurde grundlegend überarbeitet mit dem Ziel, die Interferenzen zwischen der Elektronik zur Steuerung der Mechanik Komponenten und der Messelektronik der optischen Sensorik zu eliminieren (Abbildung 7 und Abbildung 8). Folgende Verbesserungen wurden umgesetzt:

- Ein überarbeitetes Layout der Platine wird eingeführt, um kürzere Leitungswege zu den Sensoren zu gewährleisten. Dies ermöglicht eine effizientere Signalübertragung und bietet die Möglichkeit einer verbesserten elektromagnetische Abschirmung. Dafür wurde der Teil der Messelektronik der optischen Sensorik von der Gesamtplatine der AVUS-Station separiert und die Daten nun nicht mehr analog, sondern Störungssicher in digitaler Form mittels I2C Protokoll an die zentrale Einheit übergeben.
- Um eine unerwünschte Beeinflussung zu verhindern, wurde der optische Teil des Systems, sprich die Sensoren, galvanisch von der Hauptplatine getrennt. Dadurch wurde sichergestellt, dass Störungen oder elektromagnetische Interferenzen nicht auf die optischen Sensoren übergreifen können.
- Für eine zuverlässige und effektive Verbindung zwischen der AVUSPro Messkopfplatine und der AVUSPro Hauptplatine wird eine robuste D-Sub 9-polige (DE9) Steckverbindung implementiert. Diese Steckverbindung gewährleistet eine sichere und stabile Kommunikation zwischen den Hauptkomponenten des Systems. Außerdem wird dadurch der Austausch der Messeinheit wesentlich vereinfacht, da nun nur noch der Stecker nicht aber alle Verbindungsleitung einzeln ein/ausgeschraubt werden müssen.

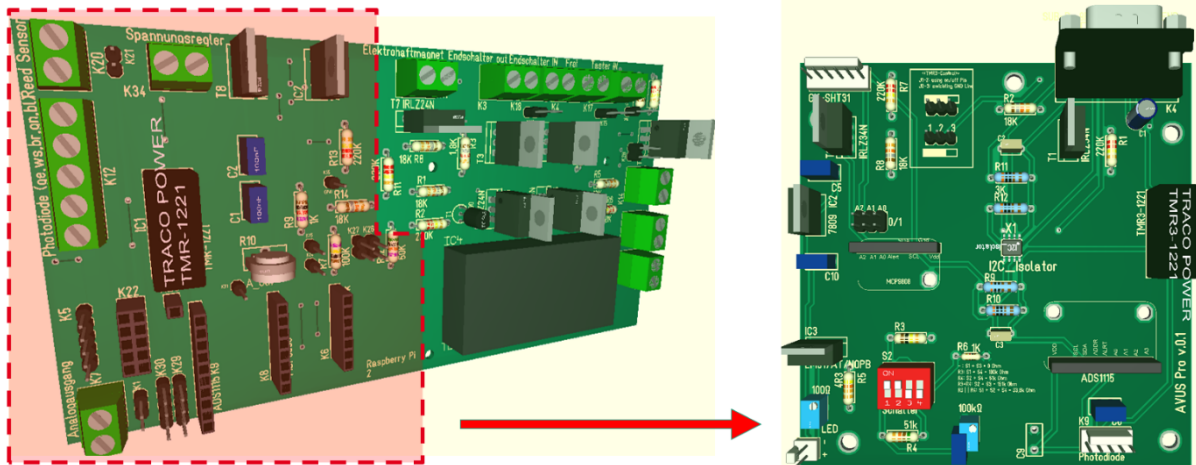


Abbildung 7: Gesamtplatine der AVUS-Station (links) die in Rot maskierte Fläche enthält den Messelektronikanteil der optischen Sensorik und wurde separiert. Das finale Design der Platine der AVUSpro Measurement Unit (rechts), ist der überarbeitete und angepasste Teil auf einer extra Platine überführt.

Die Produktion von 6 Measurement Units für das AVUSPro-Messgerät wurde erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurden umfassende Funktionsprüfungen sowie erweiterte Indoor- als auch mehrmonatige Outdoortests auf dem Freigelände des Fraunhofer ISE durchgeführt, um die Qualität und Leistungsfähigkeit der Geräte sicherzustellen.



Abbildung 8: AVUSpro Measurement Unit, finales Design und Aufbau. Das finale CAD Design der AVUSpro Measurement Unit (rechts) und Bilder der fertigen Measurement Unit (links) mit Lichtquelle, Sensoreinheit und Platine in offenem und geschlossenem Zustand.

Die entwickelten Funktionstests zur Qualitätssicherung beinhalten vielfältige Routinen, die speziell darauf ausgerichtet sind, die einzelnen Einheiten zu überprüfen. Ihr Hauptziel besteht darin, sicherzustellen, dass die Measurement Units gemäß den Spezifikationen in Tabelle 1 funktionieren. Die Außentests im Freigelände des Fraunhofer ISE in Freiburg dienen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der AVUSPro-Messgeräte unter realen Bedingungen. Ziel der dieser umfassenden Tests, sowohl im Labor als auch Außentests, ist die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Measurement Units gemäß den definierten Spezifikationen zu gewährleisten, um einen reibungslosen und präzisen Betrieb des AVUSPro-Messgeräts sicherzustellen.

Tabelle 2: Spezifikationen der AVUSPro-Measurement Unit

Technical specifications	
Directional reflectance measured at wavelength	660nm
Incidence angle	8°
divergence light source (half angle)	0.344°
Measurement field	Ø 10mm
Accuracy (determined from test measurements at 21°C)	
Maximal Deviation / repeatability (single measurements without averaging the values)	+/- 0.13 %
Precision (Standard deviation of repeatability)	+/- 0.03 %

Weiterentwicklung des pFlex-Reflektometers, Kostenreduktion und erweiterte Funktionalität der Auswerte-App (Zuordnung der Verschmutzungsorte über GPS) (ISE)

Im Zuge der Weiterentwicklung wurden Kostenreduktion durch den Einsatz von 3D gedruckten Bauteilen für Abdeckungen und Gehäuse aber auch als Ersatz für teure präzisionsgefräste Aluminium bzw. optomechanische Bauteile untersucht. Der Einsatz von 3D-Drucktechnologien hat in vielen Branchen exponentiell zugenommen.

Klassische 3D-Drucker, die auf der Schmelzschichtung (Fused Deposition Modeling, FDM) basieren, haben aufgrund ihrer begrenzten Genauigkeit Einschränkungen bei der Herstellung optomechanischer Bauteile. Nach einer ausführlichen Versuchsreihe wurde deutlich, dass die erforderliche Präzision für diese Bauteile nicht erreicht werden konnte. Aufgrund der Limitationen von FDM-Druckern wurden alternative Methoden untersucht. Dabei wurden Selective Laser Sintering (SLS) / Selective Laser Melting (SLM) und die klassische Stereolithografie (SLA) als hochpräzise, aber kostspielige Verfahren identifiziert. Als vielversprechende Alternative wurde das neue Verfahren mittels kostengünstige DLP (Digital Light Processing) LCD UV Resin Drucker ausgewählt und eingehenden Testreihen zur Druckgenauigkeit und Handhabung unterzogen.

Im Rahmen der Testreihen wurden 2 DLP Drucker unterschiedlicher Hersteller verglichen und mehrere Proben gedruckt und die Genauigkeit der erstellten Bauteile analysiert. Es wurde festgestellt, dass einer der DLP-Drucker eine bemerkenswerte Genauigkeit aufwies und in der Lage war, anspruchsvolle optomechanische Teile herzustellen. Darüber hinaus erwies sich die Handhabung des DLP-Druckers als einfach und benutzerfreundlich, was die Produktivität und den Einsatz in der Produktion unterstützt. In Abbildung 9 ist der im Projekt verwendete DLP Drucker und vergleichende Testdrucke beider 3D Drucker dargestellt. Die Unterschiede der Druckgenauigkeit ist dabei eindeutig zu erkennen. Es wurden jedoch im späteren Einsatz in Messgeräten Probleme an diesen Bauteilen durch thermische Ausdehnung und Festigkeitsprobleme der Bauteile bei mechanischer Belastung festgestellt, auf die in folgenden Abschnitten noch einmal eingegangen wird.

Aufgrund zweier vom Hersteller abgekündigter Komponenten wurde im Projekt die Lichtquelleneinheit des Reflektometers pFlex (siehe Abbildung 9) mit 3D-gedruckten Bauteilen und Lichtleitereinheit neu designt und nach Fertigung getestet.

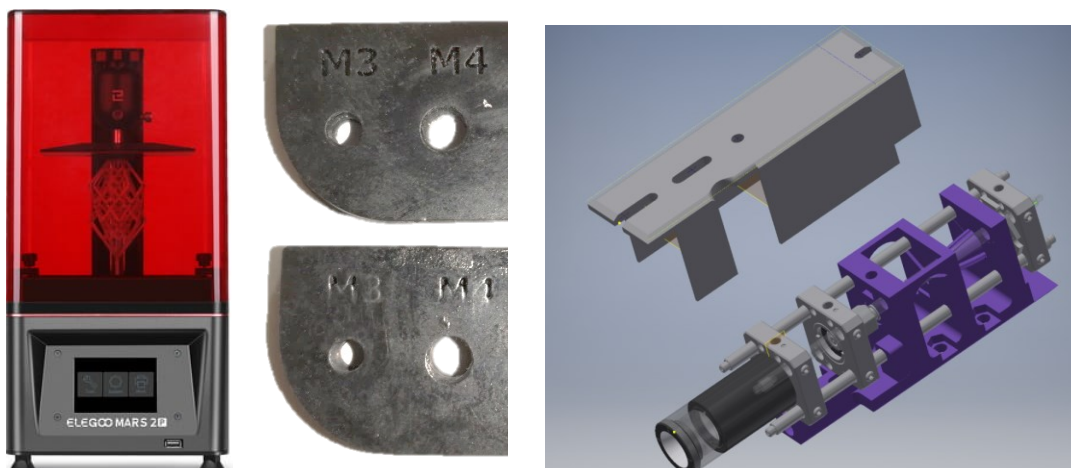


Abbildung 9: Im Projekt angeschaffte DLP Drucker (links) und vergleichende Testdrucke beider 3D Drucker (mitte), sowie eine Lichtquelleneinheit 3D-Druckteil (lila) des Reflektometers pFlex mit Lichtleiter (rechts)

Anpassung Filterschaltung und Auswahl neuer Komponenten

Im Projekt wurden Tests von neuen Schaltungskonzepten für die Ansteuerung der LEDs im pFlex Gerät zur Verbesserung der Temperaturstabilität durchgeführt und auf der Basis eine neue Filterschaltung ausgelegt. Um die Vor- und Nachteile der Schaltungskonzepte zu analysieren wurden 4 unterschiedliche Platinenlayouts entworfen und die Schaltungen wurden auf Stabilitäts- und Temperaturverhalten analysiert.

Darüber hinaus wurde eine verbesserte Ansteuerung der LED zur weiteren Optimierung der Fremdlichtunterdrückung zur realisieren.

Anpassung des Lichtquellendesign und Auswahl neuer Komponenten

Es wurde während des Klimakammertests festgestellt, dass am monolithisch 3D-gedruckte Bauteil in der Lichtquelleneinheit, das als Führungs- und Stützstruktur des Lichtleiters fungiert und als Teil des Kollimators in der Lichteinheit verwendet wird, Ausdehnungen auftreten. Diese Ausdehnungen führen zu einer Veränderung der abgegebenen Intensität des Lichts. Diese leichten Veränderungen in der Geometrie des monolithischen 3D-gedruckten Materials traten während der Temperaturänderungen auf die auch im realen Einsatz in Kraftwerksstandorten (klimatisiertes Auto mit 20°C zu 40°C Außentemperatur) relevant sind. Dies wiederum beeinflusst die Lichtübertragung im Lichtleiter, der für die Fokussierung des Lichts verantwortlich ist. Die Variationen in der Intensität können die Konstanz der Lichteinheit beeinträchtigen, was zu unerwünschten Ergebnissen oder Abweichungen bei der Messung führte.

Es war wichtig, die Ursache dieser Ausdehnungen genauer zu untersuchen, um geeignete Lösungen zu entwickeln. Als Konsequenz wurden das Lichtleiterkonzept mit 3D gedruckter Faserführung verworfen. Es wurde auf ein Konzept mit kommerziellen präzisionsgefrästen optomechanischen Bauteilen, die auch in Laserlaboraufbauten verwendet werden, zurückgegriffen, um die Stabilität und Zuverlässigkeit der Lichtquelleneinheit sicherzustellen. Eine Anpassung im Design und Untersuchung unter Verwendung von 3D Druckmaterialien mit geringerer thermischer Ausdehnung wurde aus Zeitgründen im Projekt verzichtet. Durch weitere Tests und Analyse könnte eine Lösung gefunden werden, um temperaturinduzierte Intensitätsschwankungen zu minimieren und die Konsistenz der Lichtabgabe im Kollimator mittels Lichtleiter zu gewährleisten.

Zusammenfassung:

Die Übertragung eines wissenschaftlichen Prototyps in die Serienproduktion für pFlex brachte spezifische Herausforderungen, die angegangen werden mussten. Die Anpassung des Designs an die nicht verfügbaren Bauteile und die Bewältigung der unerwarteten Temperaturabhängigkeit stellten wesentliche Herausforderungen dar. Es bedurfte einer gründlichen Analyse und neuer Lösungsansätze, um eine Vorserienproduktion von pFlex erfolgreich zu gestalten. Letztendlich konnten die Herausforderungen jedoch erfolgreich gelöst und umgesetzt werden.



Abbildung 10: pFlex 2.0 auf einem Spiegel (links) und pFlex 2.0 mit neuem Transportkoffer entwickelt von der PSE Instruments GmbH (rechts)

Erweiterungen der Software für den pFlex Prototyp

Die Software des pFlex Prototyps am Fraunhofer ISE wurde erweitert, um die Erfassung und Verarbeitung von Reflexionsdaten sowie die gleichzeitige Aufzeichnung von GPS-Koordinaten zu ermöglichen. Die wichtigsten Schritte zur Erweiterung des Prototyps waren:

- GPS-Koordinatenintegration: Die Software wurde angepasst, um auf den GPS-Sensor des Smartphones zuzugreifen und die Standortdaten parallel zur Reflexionsmessung zu erfassen. Diese Daten wurden mit den Reflexionsdaten synchronisiert. Um dies zu realisieren wurde die App "ReflectUI" erweitert, um GPS-Koordinaten in Echtzeit zu erfassen und anzuzeigen.
- Automatisches Messprotokoll: Zusätzlich wurde ein automatisches Messprotokoll implementiert, um die gesammelten Daten einschließlich Reflexionsgrad und GPS-Koordinaten für spätere Analysen und Berichte zu speichern.
- Tests zur Standortgenauigkeit der gemessenen Reflexionsdaten:
Um die Standortgenauigkeit der gemessenen Reflexionsdaten zu überprüfen, wurden die gesammelten GPS-Koordinaten in Google Maps importiert. Zwischen den gemessenen Standorten und den tatsächlichen Fundamentecken auf Dach R des Fraunhofer ISE wurden die Abweichung in Metern ermittelt und bewertet.

■ Test zu GPS Genauigkeit am Beispiel Dach R

Point number	Latitude	Longitude	Accuracy	Deviation to Google Maps [m]
1	48.00976517	7.83264972	6	2.04
2	48.00975527	7.83264861	8	3.65
3	48.00978403	7.83262526	6	2.73
4	48.00976757	7.83261782	4	1.45
5	48.00975488	7.83258454	12	1.14
6	48.00969442	7.83264809	6	0.95
7	48.0096879	7.83253157	6	0.79

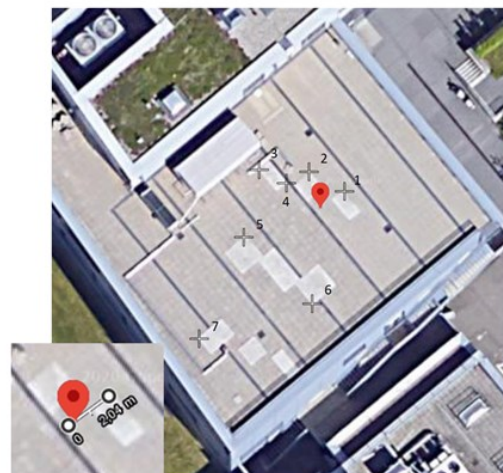


Abbildung 11: Testmessungen auf dem Gebäude Dach R des Fraunhofer ISE zur Bestimmung der Genauigkeit der GPS Koordinaten, die während einer Messung durch das Smartphone des pFlex Reflektometer erfasst und dem Reflexionsmesswert zugeordnet werden.

Die Ergebnisse der Standortgenauigkeitstests zeigten, dass die GPS-Koordinaten, die mit dem erweiterten pFlex Prototyp und der "ReflectUI"-App erfasst wurden, ausreichend genau waren. Die Abweichungen lagen innerhalb akzeptabler und erreichbarer Grenzen, was die Verlässlichkeit der Standortdaten bestätigt. Die Erweiterungen ermöglichen eine ausreichend präzise Erfassung von Reflexionsdaten in Verbindung mit genauen Standortinformationen, was für eine spätere räumliche Messdatenzuordnung von großer Bedeutung ist. Das automatische Messprotokoll erleichtert die Datenverwaltung und -analyse erheblich und stellt einen großen Mehrwert zu anderen am Markt existierenden Geräten dar.

Implementierung der Batterieladeanzeige mit verbessertem Batteriemanagementsystem in der App

Eine weitere von vielen Testnutzern empfohlene Verbesserung war die Integration der Statusanzeige des Ladezustandes der Gerätebatterie in der App. Um dies zu ermöglichen, wurden sowohl hardwaretechnische Anpassung auf der pFlex-Platine durchgeführt als auch Anpassungen an der App vorgenommen. Die Batterieladeanzeige und das verbesserte Batteriemanagementsystem wurde mit anderen Informationen in die Statusleiste der App interaktiv hinterlegt. Die verschiedenen Zustände der Statusanzeige sind im Folgenden dargestellt.

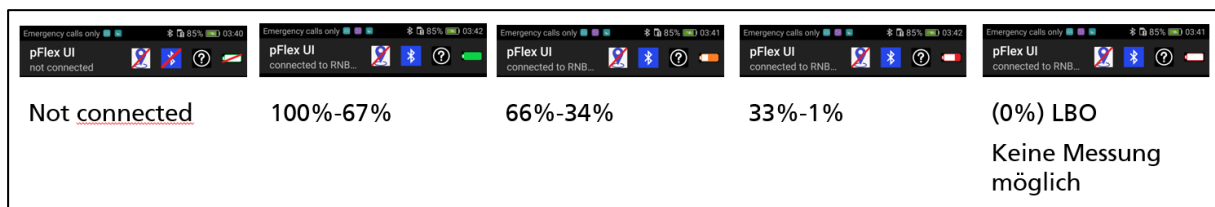


Abbildung 12: Verschiedenen Zustände der Statusanzeige für Ladezustand der Gerätebatterie und Verbindungsanzeige/Aktivierungsanzeige (Bluetooth, GPS)

Implementierung der Standort spezifischen Akzeptanzwinkel-Transferfunktion in der pFlex App

Eine weitere Neuerung in der App ist die Integration der Transferfunktion für unterschiedliche Akzeptanzwinkelabhängigkeit (Vergl. AP3). Mithilfe dieser in Abbildung 13 dargestellten und in der App integrierten Transferfunktion können die Sauberkeitswerte (Cleanliness), automatisch in Echtzeit von dem festen bauartbedingten Akzeptanzwinkel des pFlex auf einen Akzeptanzwinkel eines spezifischen Anwendungsfall im Solarkraftwerk übertragen, dargestellt und gespeichert werden. Dies ermöglicht eine relevantere Bewertung der Cleanliness für den tatsächlichen Einsatz.

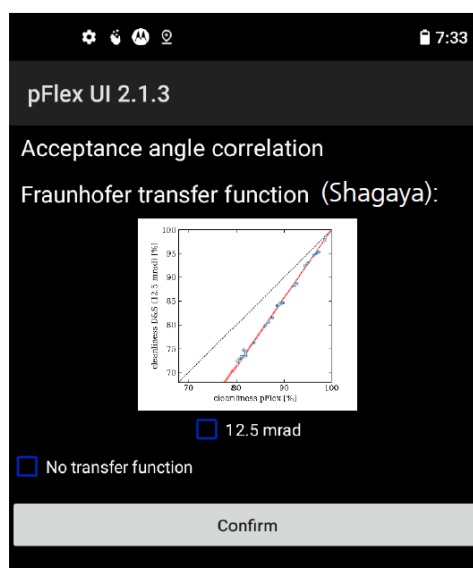


Abbildung 13: Screenshot der Implementierung der Standort spezifischen Akzeptanzwinkeltransferfunktion in der pFlex-App

Fazit:

Im AVUSpro Projekt wurden somit erfolgreich verschiedene grundlegende Verbesserung an der pFlex App durchgeführt. Speziell die Integration der GPS-Standortkoordinaten stellt ein Alleinstellungsmerkmal dar und wurde so noch in keinem kommerziell erhältlichen Reflektometer realisiert.

Kamerabasierte Reflexions-Messtechnik (ISE)- Weiterentwicklung einer Kamera-basierten Technik zur vollflächigen Verschmutzungsmessung

Für die Untersuchungen einer Kamera-basierten Technik wurden in Testreihen an verschiedene Konfigurationen und Anordnungen Messungen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Verfahrens zu beurteilen.

Die Untersuchung konzentrierte dabei sich auf die großflächige Erfassung von verschmutzten Spiegeln verschiedener Cleanliness Level angeordnet auf einem Testboard auf dem Dach des Fraunhofer ISE mittels einer für Strahlungsmessungen kalibrierten Leuchtdichtkamera.



Abbildung 14: Kamerabasierte Soilingmessung auf dem ISE Dach R. Das Testboard (1) mit verschmutzten Spiegeln verschiedener Cleanliness Level wurde mittels einer speziell kalibrierten Leuchtdichtkamera (2) in verschiedenen Setups untersucht.

Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn die Leuchtdichtkamera den dunkelblauen Teil des wolkenlosen Himmels über den Spiegel aufnahm, während das Testboard von der Seite direkt von der Sonne angestrahlt wurde und somit nicht abgeschattet war. Dadurch wurde das Sonnenlicht durch den Staub auf den Spiegeln gestreut. Die Verschmutzten Spiegel erscheinen gegenüber dem dunkelblauen Himmel heller. Eine Korrelation aus dem Streuverhalten und der Cleanliness kann für relative Messungen erreicht werden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt eine Skizze des Aufbaus, ein Kamerabild und die Auswertung. Die Spiegel 1,2,13 und 14 in Abbildung 15 sind gereinigte Spiegel und werden zur späteren Korrektur der unterschiedlichen Helligkeit des Himmels verwendet.

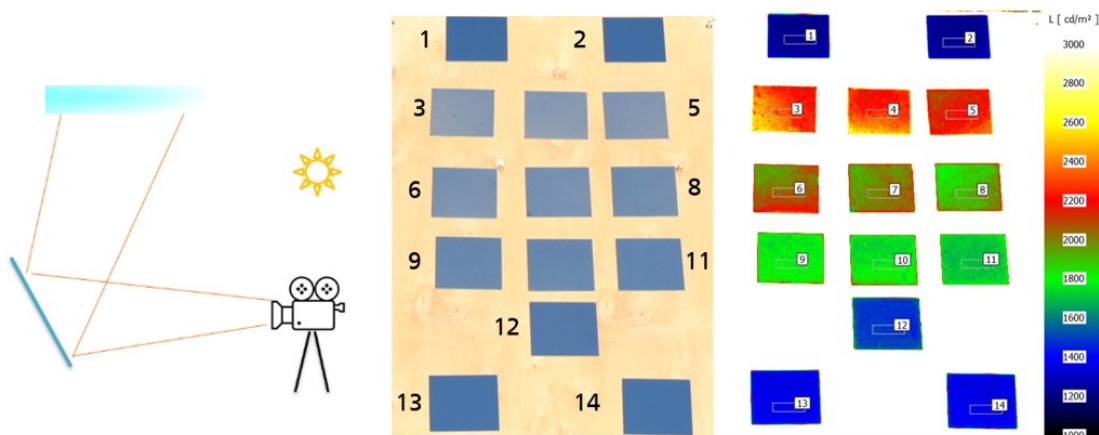


Abbildung 15: Kamerabasierte Soilingmessung mittels Leuchtdichtemessung der Streuung. Messanordnung „direkte Beleuchtung“ (links), das Testboard mit verschmutzten Spiegeln als Kamerabild (Mitte) und als ausgewertete Leuchtdichtedarstellung (rechts).

Die gemessene Leuchtdichte wurden jeweils in einem rechteckigen Bereich des Spiegels gemittelt und anschließend mittels Reflektometer an mehreren Punkten die Cleanliness bestimmt. Mit diesen Daten wurde eine Korrelation aufgestellt die in Abbildung 16 aufgetragen ist. Mittels der 4 gereinigten Spiegel konnte eine Korrektur der unterschiedlichen Leuchtdichte des Himmels an der Position der Spiegel angewendet werden, wodurch die Ergebnisse signifikant verbessert werden konnten.

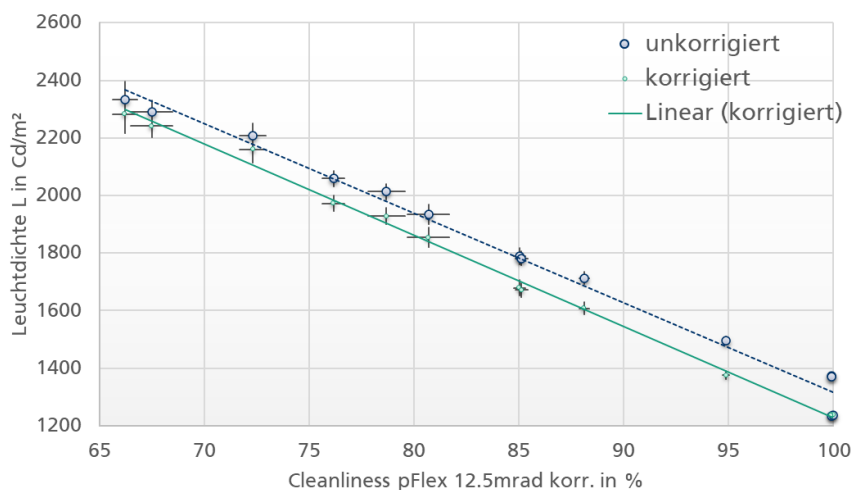


Abbildung 16: Korrelation zwischen der Cleanliness pFlex zur gemessenen Leuchtdichte mit und ohne Korrektur der unterschiedlichen Helligkeit des Himmels.

Fazit:

Im AP 2.3 konnte die Eignung der Kamera-basierten Technik zur vollflächigen Verschmutzungsmessung mittels Leuchtdichtekamera nachgewiesen werden. Korrekturen der unterschiedlichen Leuchtdichten des Himmels verbessern die Ergebnisse dabei signifikant. Umsetzung in einem solaren Kraftwerk zum Beispiel mittels Drohne war nicht Teil des Projektes wäre aber in einem Folgeprojekt gut vorstellbar. Auch eine direkte Integration in die AVUSpro Stationen ist vorstellbar. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass auf diese Art nur eine relative Messung, bzw. Korrelation erhoben werden kann und nur für ähnlich ausgerichtete Flächen unter kleinen Sichtwinkeln. Bei größeren Abweichungen dieser Voraussetzungen wird der Lichtweg derart verändert bzw. divers, dass die Integration eines Streumodells der Staubsorte und Informationen über Einfalls- und Sichtwinkel notwendig werden würde, was meist bei den bekannten Entwicklungen vernachlässigt wird. Auch werden Einträge durch diffuses Licht vernachlässigt, was eine Absolutmessung beeinflusst. Verteilungen und Charakteristiken der Ablagerungen können jedoch hoch aufgelöst ermittelt werden.

2.1.3 AP 3 Standortcharakterisierung und Feldtests (AP-Leitung: ISE)

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Überwachung der Verschmutzung an relevanten Kraftwerksstandorten und die Entwicklung von Methoden zur Standortbewertung. Erhobene Daten sollen dann zur Verbesserung des Kraftwerksbetriebes (AP4), z.B. Untersuchungen zur Reinigungsfähigkeit und Optimierung von Reinigungszyklen, beitragen.

MS-Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am
M3.1	Meteostationen installiert und Messungen in MET Data Base integriert und Qualitätssicherungssystem entwickelt	12.2021
M3.2	Prozessor zur Erstellung von Monatsberichten für Verschmutzungs-Monitoring fertiggestellt und für beide Standorte demonstriert.	02.2022
M3.3	AVUS Prototypen aufgestellt und mindestens 12 Monate erfolgreich im Betrieb	11.2022
M3.4	Studie zur Korrosion an beiden Standorten erstellt.	06.2023
M3.5	Prozedur zur Erstellung von Jahresberichten mit Ergebnisanalysen erarbeitet und für beide Standorte angewendet.	08.2022

Vorbereitung, Versand, Installation und Betrieb der Avus Messstationen (TSK-Flagsol)

Durch TSK Flagsol wurde der Zugang zum solarthermischen Kraftwerk Shagaya organisiert und mit Unterstützung durch das O&M-Personal vorbereitet.

Das 50-MW-Parabolrinnenkraftwerk Shagaya in Kuwait (Abbildung 17) war der erste gewählte Standort für den Einsatz der AVUS-Sensoren. Die Verschiffung und die Zollformalitäten wurden durch TSK Flagsol organisiert und abgewickelt.



Abbildung 17: Shagaya Solarkraftwerk in Kuwait

Die Feldmessungen wurden an drei Standorten innerhalb des Kraftwerks TSK / Flagsol durchgeführt. So wurden die ersten drei AVUSpro-Einheiten im CSP-Kraftwerk Shagaya installiert (siehe Abbildung 21). Die AVUSpro-Einheiten wurden neben oder in der Nähe von bereits installierten HelioScale-Systemen des Typs phi (Tier 2) und omega (Tier 1) installiert, um weitere relevante Kenngrößen wie Regen, Wind, DNI, Korrosion in der Datenanalyse berücksichtigen zu können.

Drei AVUS-Geräte wurden durch das lokale Personal von TSK in Empfang genommen, geprüft und nach Anleitung von PSE, Fraunhofer ISE und dem Unterauftragnehmer Dornier Suntrace erfolgreich installiert. Abbildung 18 zeigt eines der installierten Geräte im Nordwesten des Kraftwerks. Im Hintergrund ist die Meteostation mit Turm zur Wartung zu sehen, sowie die exponierten Korrosionscoupons.



Abbildung 18: AVUS-Geräte in Shagaya

Installation der Korrosionscoupons zur Evaluierung der Korrosivität des Standortes

Durch das Fraunhofer ISE bereitgestellte Korrosionscoupons wurden an den drei Standorten der AVUS-Sensoren in Shagaya installiert und nach der Exposition zur Untersuchung ans Fraunhofer ISE versendet



Abbildung 19: Korrosionscoupons in Shagaya

Erprobung, Wartung und Datentransfer im Kraftwerk (TSK)

Ursprünglich war eine Einbindung der AVUSpro-Geräte über die Infrastruktur des Kraftwerks vorgesehen. Zu diesem Zweck wurden die AVUS-Geräte mit MODBUS-Funktionalität ausgestattet. Darüber hinaus verfügen sie über die Möglichkeit die Daten vor Ort herunterzuladen oder sie automatisch über LTE an einen Server zu Schicken. Es stellte sich heraus, dass eine direkte Einbindung in die bestehende Infrastruktur aufgrund von Sicherheitsbedenken durch den Eigentümer nicht umgesetzt werden konnte. Stattdessen wurden die Daten durch TSK Mitarbeitende abgerufen und regelmäßig bereitgestellt. Durch das monatliche Hochladen der Meteo-Daten aus Shagaya konnten die Monatsberichte entwickelt und die Auswertungen verfeinert werden.

Durch TSK wurde ein Vertragsabschluss mit dem Kraftwerkseigentümer erzielt werden, welcher dem Projektkonsortium die Nutzung der im Kraftwerk aufgezeichneten Daten erlaubte. Der Vertragsabschluss mit dem Kraftwerkseigentümer in Kuwait (KISR) war ein wichtiger Meilenstein nach zähen

Verhandlungen. In diesem Vertrag wurden die Rechte und Pflichten des AVUSpro-Konsortiums und von KISR klar geregelt.

Über die Messdaten der AVUS-Geräte hinaus stellte TSK reguläre manuelle Verschmutzungsmessdaten zur Verfügung um die Messungen zu bewerten und zu korrelieren.

Nach vorheriger Absprache fand eine zyklische Reinigung der Spiegel durch das Kraftwerkspersonal von TSK für jeden AVUSpro-Sensor in Shagaya statt. Die Reinigung sollte in demselben Zyklus durchgeführt werden, wie die Reinigung des Solarfeldes, was allerdings nicht immer umgesetzt werden konnte.

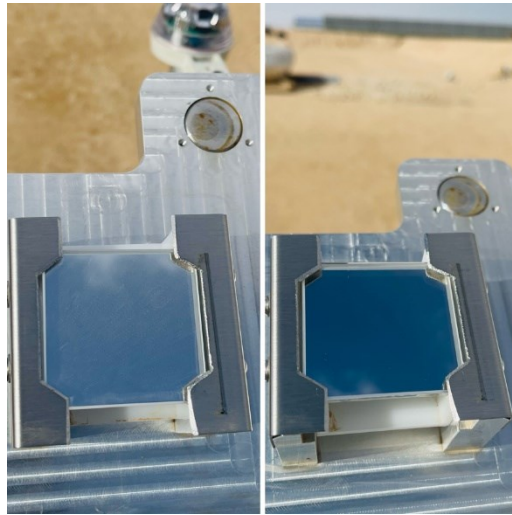


Abbildung 20: Spiegel vor und nach der Reinigung in Shagaya

Die Mitarbeiter von TSK in Shagaya haben mit Unterstützung von Suntrace die notwendigen Arbeiten durchgeführt, damit die entsprechende Wartung der AVUS-Geräte erfolgreich umgesetzt werden konnte.

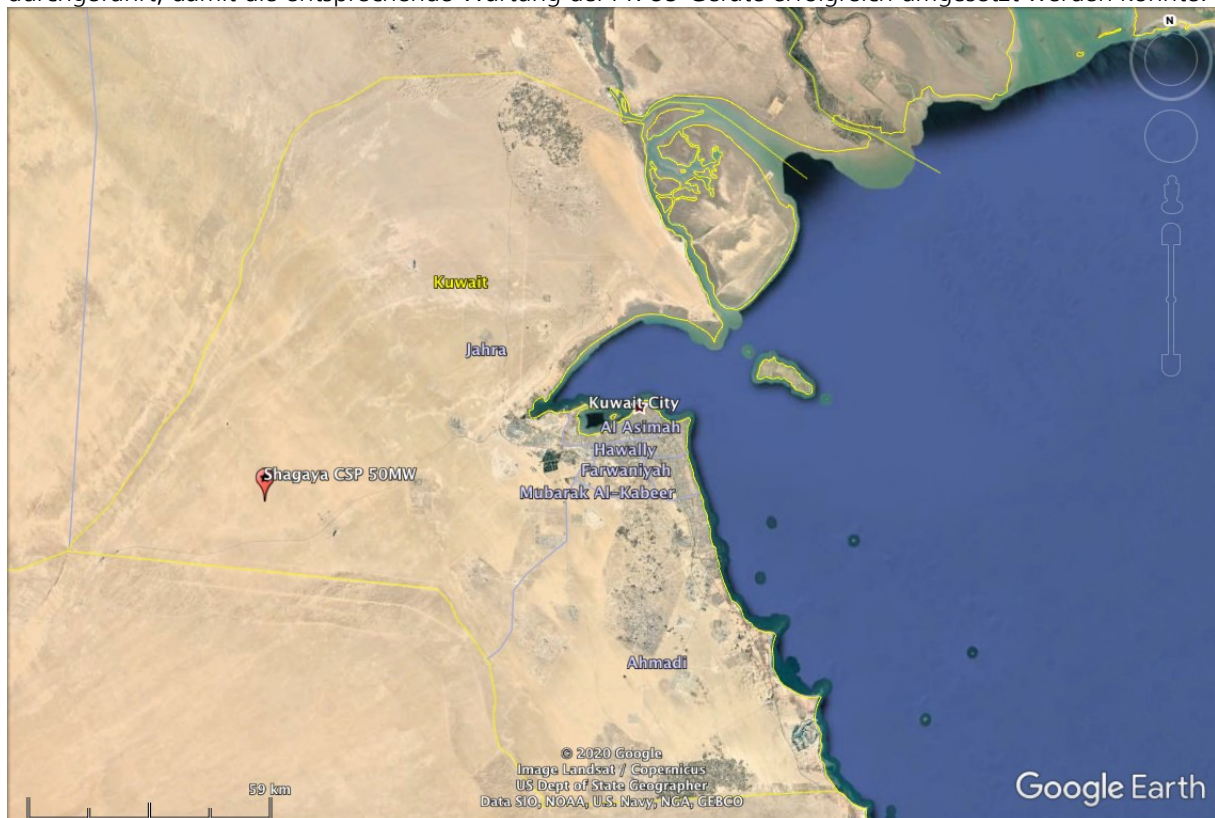


Abbildung 21 Satellitenbild des Standorts des CSP-Kraftwerks.

Überblick: Feldmessung Standort Shagaya. (Suntrace / Fraunhofer)

Das CSP-Kraftwerk befindet sich in der Shagaya-Wüste im Nordwesten Kuwaits. Diese Region zeichnet sich durch ihre reichliche Sonneneinstrahlung aus, was sie zu einem idealen Standort für Solarstromerzeugungsprojekte macht. Die Verschmutzung aufgrund der heißen und ariden atmosphärischen Bedingungen beeinträchtigt die Effizienz der Stromerzeugung. Insbesondere CSP-Technologien erfahren signifikante Verluste aufgrund von Verschmutzung, was die Notwendigkeit der Messung unterstreicht.

Verschmutzungsmessungen am Standort finden bislang manuell statt. Somit kann der Betrieb des Kraftwerkes auch durch die (semi-) automatische Messung profitieren.

Abbildung 21 zeigt den Standort der CSP-Anlage Shagaya in Kuwait. Am Standort Shagaya sind zur Betriebsüberwachung bereits 3 meteorologische Messstationen aufgebaut: 2 Systeme vom Typ HelioScale phi (Tier 2) und 1 vom Typ HelioScale omega.

Um eine möglichst gute Abdeckung der Anlage zu erzielen, wurden bei allen drei meteorologischen Messstationen AVUSpro-Einheiten aufgebaut. Die Standorte der meteorologischen Messstationen, sowie AVUSpro-Einheiten ist in Tabelle 3 und Abbildung 22 gegeben. Die Messkampagne wurde über einen Zeitraum von 20 Monaten (November 2021 bis Juni 2023) durchgeführt.

Tabelle 3: Standorte der AVUSPro-Einheiten.

	Zentral (C)	Nordwest (NW)	Südost (SE)
Meteostation ID (HS)	KWS1M	KWS1S	KWS2S
AVUSPro ID (Avus)	N1501-04	N1501-05	N1501-01
Koordinaten	29.19803 N, 47.04744 E (Avus); 29.193820 N, 47.047659 E (HS)	29.20168 N, 47.03859 E	29.19142 N, 47.05607 E
Kurzbeschreibung Standort	Hauptgebäude (HS) & Freifläche (Avus)	Bereich Plattform 1	Bereich Plattform 8



Abbildung 22: Standort der AVUSPro Messgeräte am Standort TSK Shagaya, Kuwait.

Überblick: Installierte Messgeräte.

Innerhalb der Shagaya CSP-Anlage in Kuwait sind derzeit drei meteorologische Stationen in Betrieb. Zwei dieser Stationen sind mit RSI-Sensoren ausgestattet und befinden sich in den Feldern 1 und 8 (NW bzw. SE). Die dritte Station (C) befindet sich auf dem Zentralgebäude und ist mit einem Pyrheliometer und RSI-Sensor ausgestattet. In das Layout dieser drei meteorologischer Messstationen wurde je eine AVUSpro-Einheit eingebunden.

Für die Implementierung wurden technische Zeichnungen angefertigt. Abbildung 23 zeigt links das allgemeine Design der Tier-1 Stationen: Über einen Datenlogger werden meteorologische Sensoren, wie Windmesser, Regenmesser, Strahlungssensoren und PV-Referenzzellen zusammengeführt. An Baugruppe 1 wird die direkte normale Bestrahlungsstärke (DNI) mit einem Pyroheliometer erfasst, die globale horizontale Bestrahlungsstärke (GHI) und die diffuse horizontale Bestrahlungsstärke (DHI) werden mit zwei Pyranometern gemessen. Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren sind Teil der Baugruppe. In Baugruppe 2 werden Bestrahlungsmessungen (GHI, DHI & DNI) durch ein RSP gemessen. Zur Windmessung wird ein 10m hoher Mast errichtet (3). Der Regenmesser wird freistehend installiert (4).

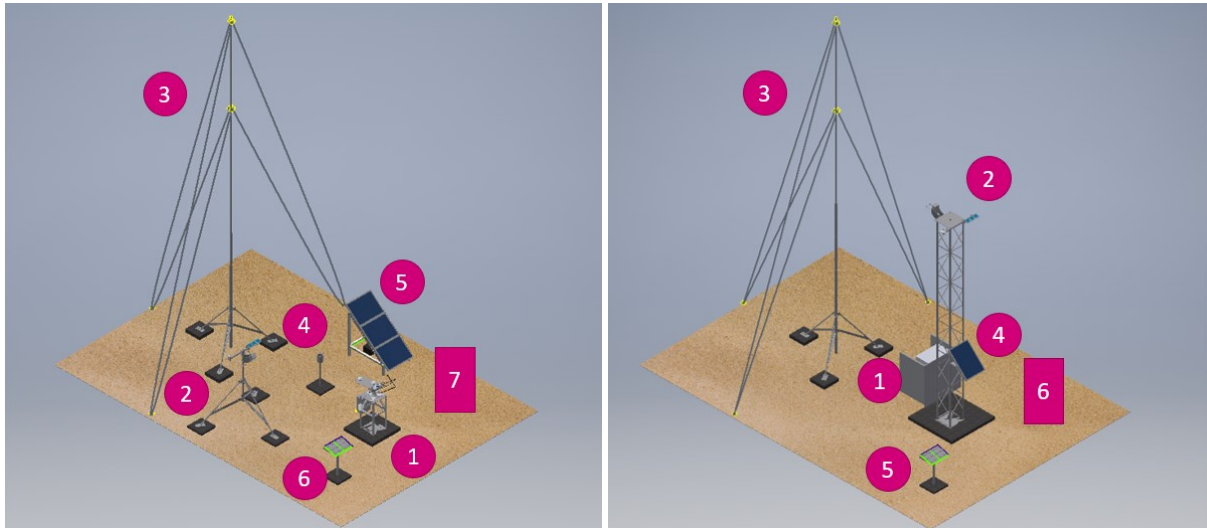


Abbildung 23: Layout der Tier-1 (links) und Tier 2 (rechts) meteorologischen Messstation.

In Abbildung 23 rechts ist das geplante Layout der Tier-2 Station gezeigt: Die Tier-2 Messungen hingegen sollen zwischen den Loops der CSP-Anlage ermöglicht werden. Um deren Höhe zu überkommen, sollen Strahlungsmessungen in einer Höhe von 6 Metern über dem fertigen Bodenniveau vorgenommen werden. Strahlungsmessungen werden mit dem einem RSP erfasst, welches GHI, DHI und DNI aufzeichnet. Zusätzlich erfasst das Pyranometer höheren Standards GHI-Daten. Um die Wartung durchführen zu können wurde ein Gerüst mit Plattform hinzugefügt (Abbildung 18)

Verfahren zur Datenübertragung (Suntrace /Fraunhofer ISE)

In diesem speziellen Fall war entgegen der ersten Planung die direkte Anbindung der AVUSpro-Einheit an die meteorologischen Messstationen aufgrund der IT-Sicherheitsrichtlinien des Kraftwerksbetreibers nicht zulässig. Die vor Ort gemessenen Daten wie Cleanliness, GHI, DHI, DNI, relative Luftfeuchtigkeit etc. wurden somit separat von den AVUSpro-Messungen an die Server weitergeleitet und anschließend von der Dornier Suntrace in einem automatisierten Verfahren zusammengeführt. Diese Datenstruktur, die speziell für den Standort Shagaya implementiert werden musste, ist in Abbildung 24 schematisch dargestellt.

Da über die Anwendung am Standort Shagaya hinaus auch ein allgemeines Design (unabhängige Messung) entwickelt wurde, zeigt Abbildung 25 die Datenstruktur, bei der die AVUSpro-Einheit direkt an die HelioScale-Station angeschlossen wird. Zur Fernwartung ist ein direkter Zugang über einen SSH-Tunnel zur AVUSPro-Station vorgesehen.

In beiden Fällen werden die Daten zentral verwaltet und einer automatisierten Qualitätsanalyse unterzogen, um somit einen geeigneten Datensatz für den Kraftwerksbetrieb zu bieten. Erhobene Daten werden zum weiteren Gebrauch auf der webbasierten Plattform WebAccess zur Verfügung gestellt und veranschaulicht. Zur Kontrolle der Messung und Bewertung wurde dazu ein Semiautomatisches Verfahren zur monatlichen Berichterstattung entwickelt. Monatliche Berichte, welche einen Überblick über die Daten verschaffen, werden ebenfalls im WebAccess zur Verfügung gestellt.

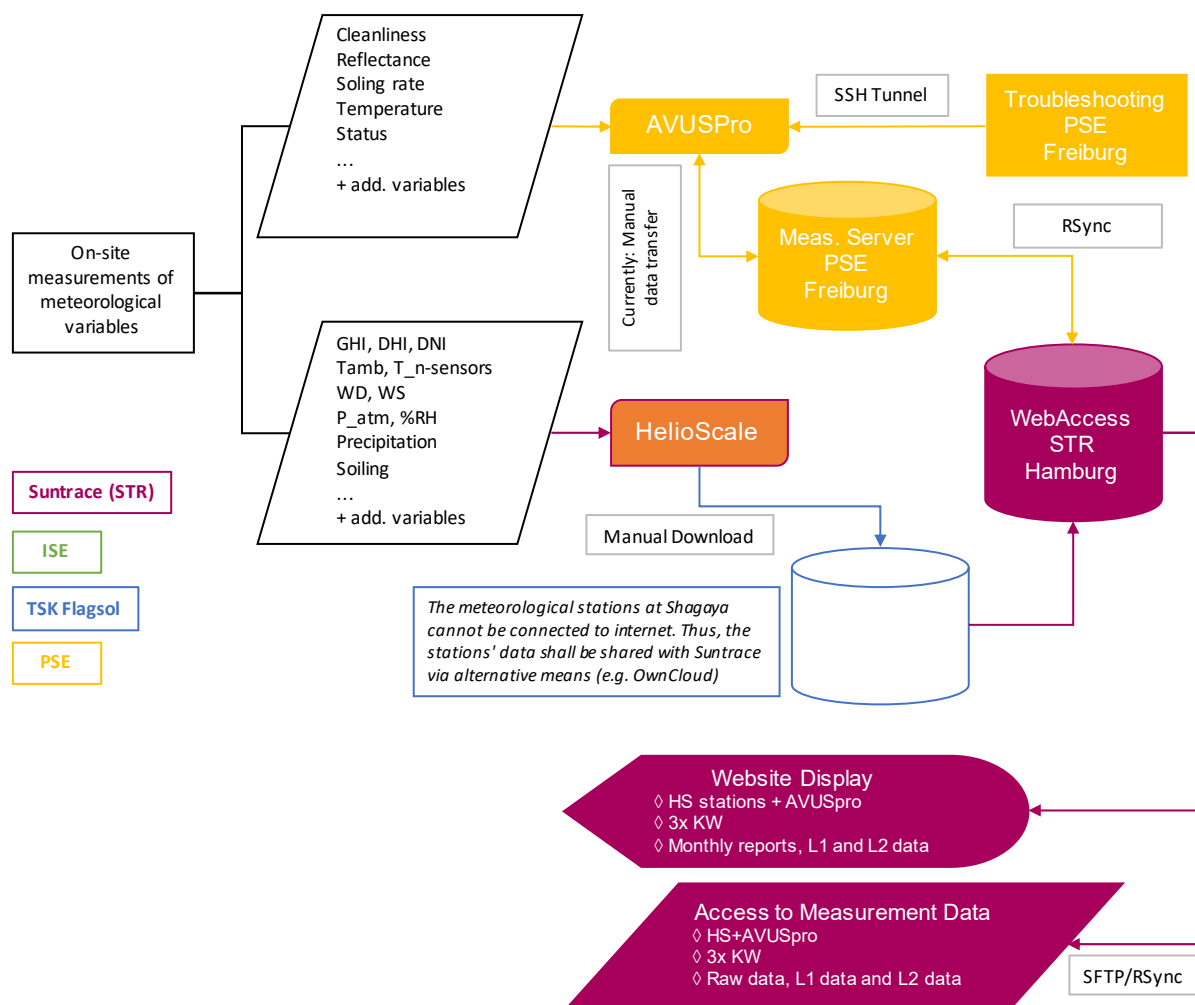


Abbildung 24: Datenstruktur am Standort Shagaya.

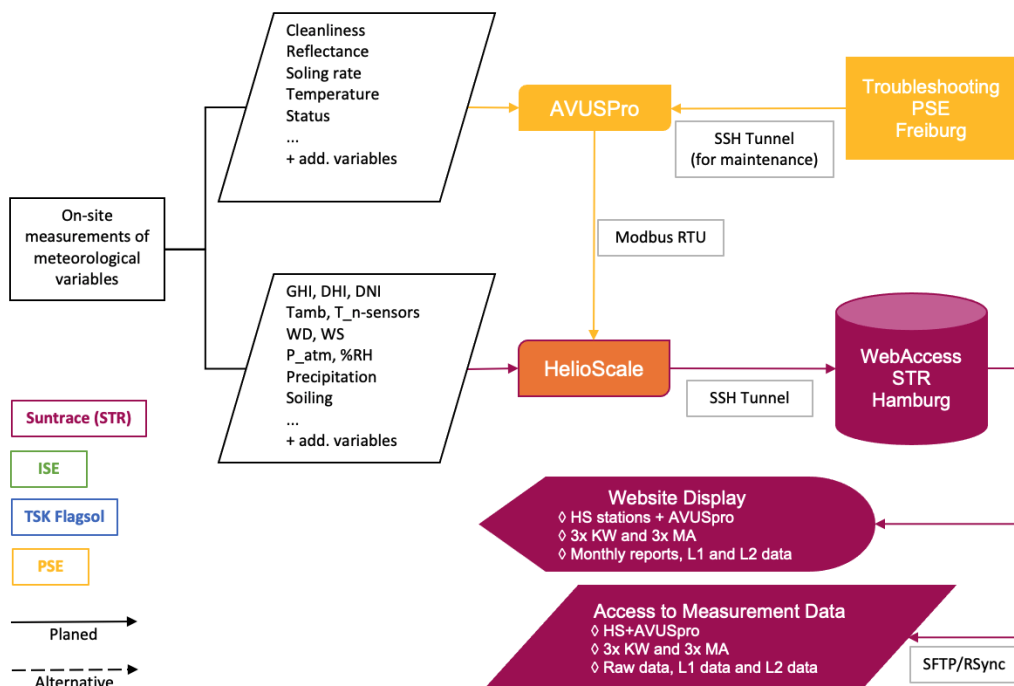


Abbildung 25: Allgemeine Datenstruktur.

Automatisierte Datenanalyse, Filterung und Bereitstellung (Fraunhofer ISE)

Der Messdatentransfer von den Geräten zu PSE, Fraunhofer ISE und Suntrace wurde bereits bei den Testläufen der Geräte am Außengelände des Fraunhofer ISE in Freiburg eingerichtet und getestet. Die Datenformate waren dabei in engem gegenseitigem Austausch definiert und auf allen Seiten automatische Routinen erarbeitet worden. Daher konnten die Daten aus Kuwait von Beginn der Messungen an aufgezeichnet und ausgewertet werden. Die Datenfilterung und Aufbereitung wurde durch Fraunhofer ISE erarbeitet und an den Unterauftragnehmer Suntrace zur Integration in die automatischen Auswertungsroutinen integriert. Um eine hohe Datenqualität zu sichern, werden die Rohdaten der Messgeräte nach verschiedenen Kriterien geprüft und gegebenenfalls verworfen. Kriterien sind z.B. sehr starke Schwankung der Messwerte durch Feuchte/Tau auf dem Probenspiegel, detektierte Regenereignisse und basierend auf Plausibilitätsprüfungen.

Aus der gemessenen Sauberkeit der Spiegel wird eine tägliche ‚Soiling Rate‘ berechnet. Diese liegt für den Kraftwerksstandort für die meisten Tage um 1 % (Abnahme) pro Tag. In Ausnahmefällen kann es zu einer deutlich höheren Abnahme der Cleanliness kommen. Die schnelle Detektion derartiger Ereignisse ist für den Kraftwerksbetrieb unbedingt notwendig, um umgehend und, soweit möglich, gezielt Reinigungsmaßnahmen durchführen zu können und damit erhebliche Einbußen in der thermischen Leistung des Solarfelds an den kommenden, ggf. wieder „sonnigen“ Tagen, zu vermeiden. Starke Regenereignisse hingegen können zu einem starken Reinigungseffekt der Spiegel führen, sodass kostensparend auf eine Reinigung verzichtet werden kann.

Monatliche Berichterstattung und WebAccess (Suntrace / Fraunhofer ISE)

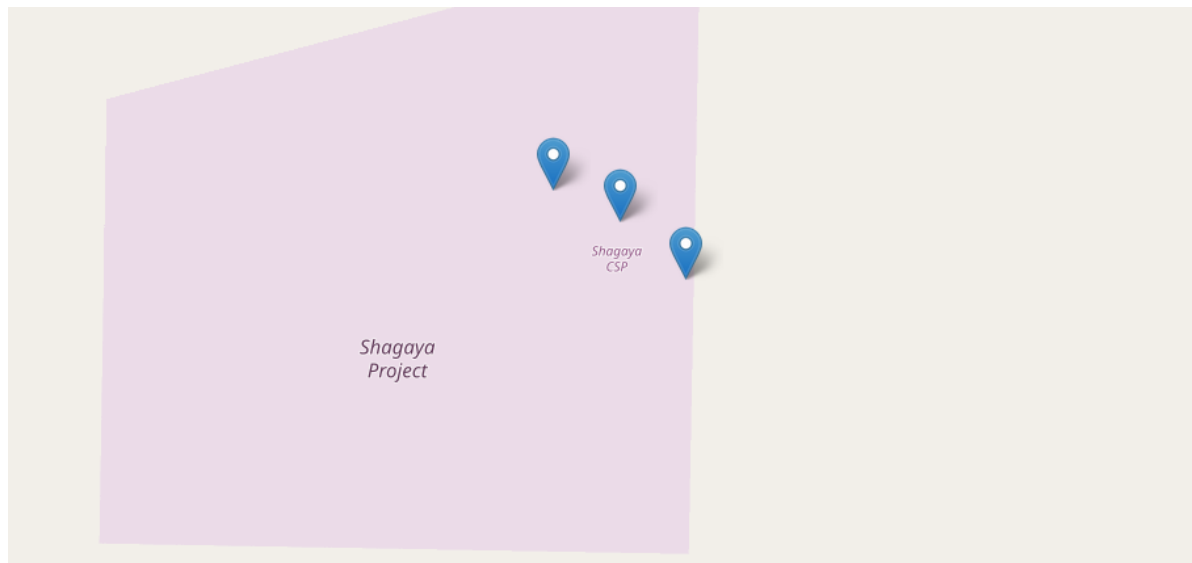
Dornier Suntrace führte im Auftrag des Fraunhofer ISE eine monatliche Datenanalyse, sowie Überwachungsdienste durch. In Monatsberichten werden verschiedene Datenstatistiken, einschließlich Durchschnittswerte, Summen, Minimal- und Maximalwerte, grafisch dargestellt, um Kunden zu helfen, Datentrends leicht zu erfassen. Die Werte für die globale horizontale Bestrahlungsstärke und die direkte normale Bestrahlungsstärke werden in Bezug auf die durchschnittliche tägliche Verteilung berechnet und ebenfalls visualisiert. Zusätzlich wird die Datenqualität visualisiert: Hierbei werden standardisierte Filterfunktionen und Algorithmen auf die Daten angewandt und nach dem Prinzip des Datenflagging deren Ergebnis festgehalten und ggfs. automatisiert korrigiert.

Darüber hinaus erleichtert der Bericht eine qualitative Bewertung der bewölkten und sonnigen Perioden im Laufe des Monats durch die Darstellung der Einstrahlungswertverteilungen. Ergänzende Messungen wie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit sind nicht nur für die Abschätzung der Solarstromerträge wichtig, sondern auch für eine gründliche Analyse der Solarmessungen, insbesondere wenn Anomalien auftreten. So können z.B. für Solarkraftwerke relevante Prozesse wie die Taubildung unter Berücksichtigung der atmosphärischen Bedingungen betrachtet werden. Zudem wurde die Berichtsstruktur um die AVUSpro-Messung erweitert, sodass die Verschmutzungsmessung in direkten Kontext zu weiteren meteorologischen Parametern gesetzt werden kann.

Die Messungen können hierbei aus der Ferne konfiguriert, überwacht und über ein Webportal auf die Daten zugegriffen werden. Bevor die Endnutzer Zugang zu den Daten erhalten, werden sie strengen Qualitätsprüfungen unterzogen, um deren Qualität und Genauigkeit zu gewährleisten.

Abbildung 26 zeigt das WebAccess Interface beispielhaft für den Standort Shagaya: Die Endnutzer haben Übersicht über alle Messstationen an ihrem Standort und sehen auf einen Blick deren Status. Durch die Auswahl „Measurements“ erhält man direkten Zugang zu den Messungen und deren Darstellungen. Prozessierte Daten und Monatsberichte sind im Bereich „Downloads“ zur Verfügung gestellt.

Somit kann der Kunde die Daten über das Portal meteo.suntrace.de in Echtzeit abrufen und analysieren oder alternativ herunterladen und in einer Datenbank verwalten. Die Messdaten werden mehrmals täglich per FTP und RSYNC übertragen. Bei Unterbrechungen wird der Nutzer per E-Mail benachrichtigt.



Station	Meta	Status*	Access
KWS1M -Kuwait-	Latitude	29.19803 °N	Radiation Sensors
	Longitude	47.047440 °E	
	Elevation	237 m	Auxiliary Sensors
	Station Type	HS-omega	Battery
			Data Upload
		OFFLINE	Measurements
		OFFLINE	Downloads
KWS1S -Kuwait-	Latitude	29.20168 °N	Radiation Sensors
	Longitude	47.03859 °E	
	Elevation	245 m	Auxiliary Sensors
	Station Type	HS-phi	Battery
			Data Upload
		OK	Measurements
		FAILURE	Downloads
KWS2S -Kuwait-	Latitude	29.19142 °N	Radiation Sensors
	Longitude	47.05607 °E	
	Elevation	237 m	Auxiliary Sensors
	Station Type	HS-phi	Battery
			Data Upload
		OK	Measurements
		FAILURE	Downloads
		OK	
		NORMAL	

Abbildung 26: WebAccess Interface.

Wartungsmissionen (Suntrace / Fraunhofer ISE)

Im Mai und November 2022 besuchte die Dornier Suntrace, im Rahmen des Unterauftrags mit Fraunhofer ISE, das Kraftwerk Shagaya CSP zur Wartung der AVUSpro. Dabei wurde eine Untersuchung der installierten HelioScale-Systeme durchgeführt. Die Beobachtungen bezüglich dieser HelioScale-Systeme wurden direkt mit dem Wartungsteam von TSK Shagaya kommuniziert und weiter in einem Wartungsbericht im Rahmen des Forschungsprojektes berücksichtigt.

Wie in Abbildung 27 zu sehen ist, wurde Kuwait von schweren Sandstürmen betroffen. Im Mai 2022 gab es 30 Tage mit Sandstürmen, was ihn zu einem der staubigsten Monate der letzten 25 Jahre machte. Während des DSR-Besuches kam es zu aufsteigendem Staub und zeitweise zu kleinen Staubstürmen.



Abbildung 27 Blick über den CSP Shagaya vom SW-Station.

Während der Wartungsbesuche wurden folgende Aktivitäten durchgeführt:

- Allgemeine Wartung der Stationen und Dokumentation
- Datensicherung und anschließende Auswertung
- Austausch der Probenspiegel
- Austausch ermüdeter Teile der AVUS-Stationen (Sprungfedern der Öffnungsklappe)
- Implementierung einer Simkarte für Datentransfer (2. Besuch)
- Besprechung und Auffrischung der Stationswartung mit örtlichem Personal

Angesammlter Sand auf den Instrumenten konnte nur teilweise gefunden werden und technisches Versagen der Stationen war nicht auf die harschen Bedingungen zurückzuführen. Technische Mängel, wie beispielsweise gebrochene Sprungfedern, wurde vor Ort behoben. Stationsausfälle wurden von PSE ferngewartet. Während des zweiten Wartungsbesuches wurden zudem Simkarten in die AVUSpro-Einheiten eingesetzt und somit die direkte Verbindung via GSM ermöglicht. Die ausgebauten Probenspiegel wurden zu Fraunhofer ISE zur weiteren Untersuchung gesendet. Ein detaillierter Wartungsbericht wurde im Rahmen des Arbeitspakets angefertigt.

Ergebnisse der Feldmessungen (Suntrace / Fraunhofer ISE)

Die Feldmessungen wurden an drei Messstandorten in der von TSK/Flagsol betriebenen Shagaya CSP Anlage in Kuwait durchgeführt. Im Folgenden werden die Messergebnisse und Beobachtungen dargestellt.

Trotz der sehr sandigen Bedingungen waren alle Spiegel in gutem Zustand. Alle drei Spiegel waren vor dem Austausch in gutem Zustand. Es konnten nur einzelne, kleine Kratzer beobachtet werden. Aber auch gelagerte Spiegel wiesen Mikrokratzer auf. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Ersatzspiegel nicht angemessen in ihrer Aufbewahrungsbox gelagert wurden. Drei weitere Spiegel wurden an das Fraunhofer ISE zurückgeschickt und mikroskopisch untersucht. Sandansammlungen auf und in den Instrumenten konnten nur teilweise beobachtet werden.

Im Folgenden werden die Daten der AVUS-Geräte dargestellt. Die Datenqualität und -Vollständigkeit wurde im Abgleich mit meteorologischen Messdaten der HelioScale-Systeme ausgewertet. Die Datenwerte wurden in der Darstellung herausgenommen, da es sich um vertrauliche Interna des Kraftwerks handelt. Die relative Darstellung erlaubt jedoch die Betrachtung im Rahmen dieses Berichts.

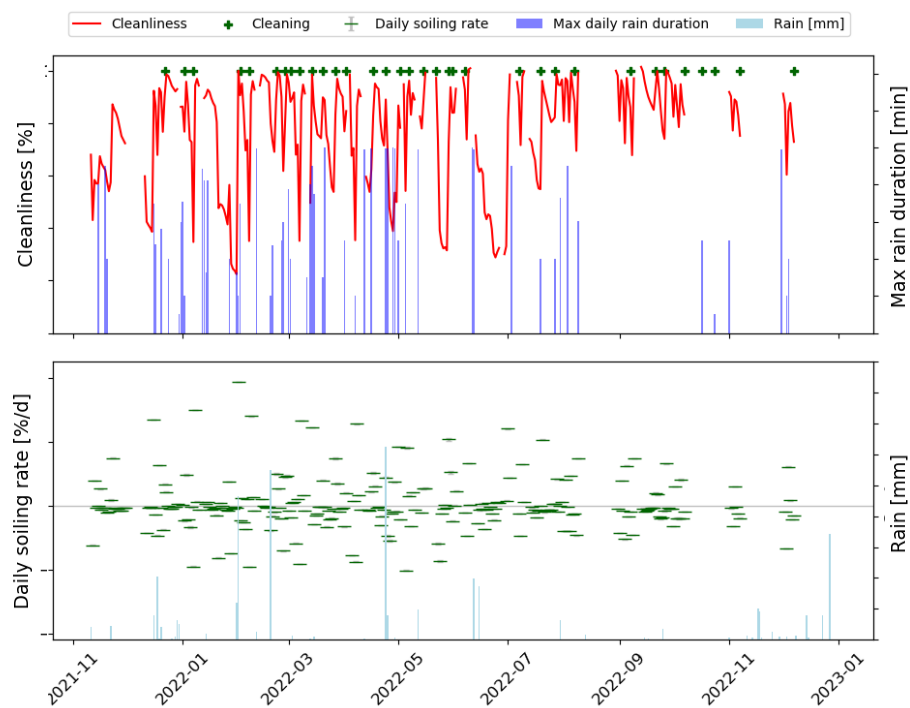


Abbildung 28: AVUSPro-Messung am Standort C.

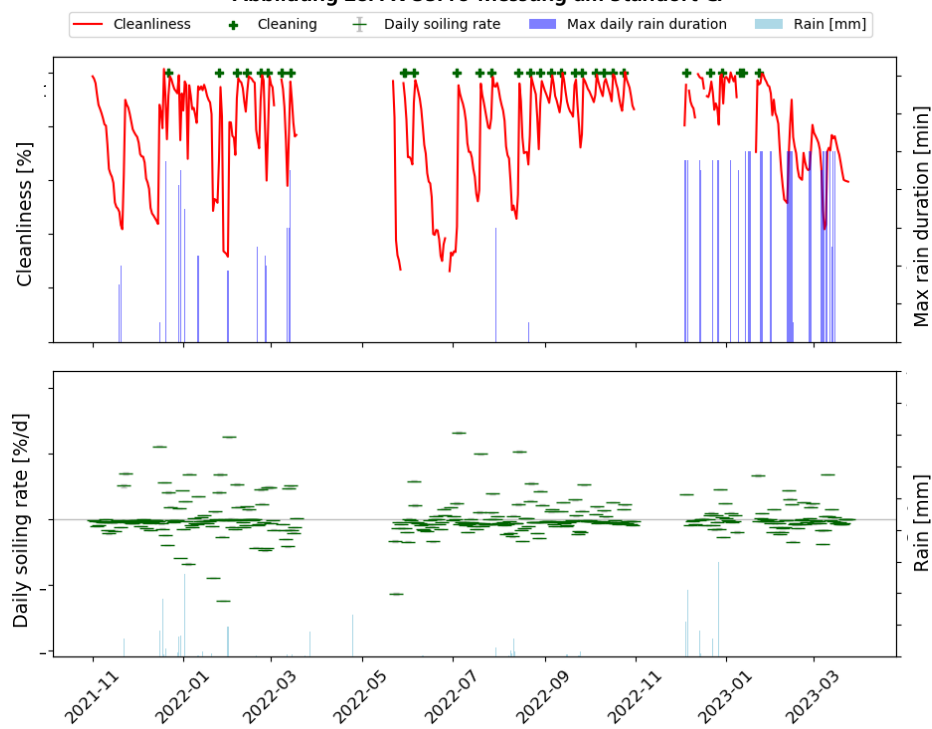


Abbildung 29: AVUSpro Messung am Standort SE.

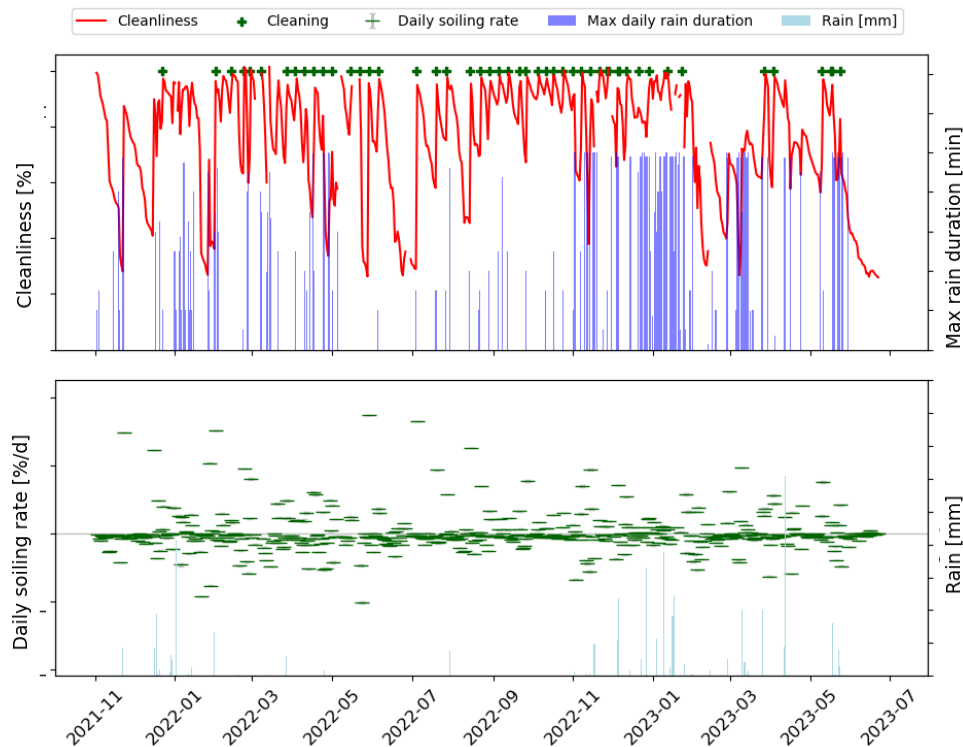


Abbildung 30: AVUSPro-Messung am Standort NW.

Abbildung 28 bis Abbildung 30 zeigen die AVUSPro-Messungen an den Standorten C, SE und NW für den Zeitraum 2. November 2021 bis 30. Juni 2023. Dargestellt sind jeweils:

- In oberer Abbildung: Tageswerte der Sauberkeit der Probenpiegel (Cleanliness), Putzen der Spiegel (Cleaning), maximale Regendauer pro Tag (Max daily rain duration), alle entsprechen der AVUS-Messung. Die Werte wurden herausgenommen, da es sich um Betriebsinterna handelt.
- In unterer Abbildung: Tägliche Verschmutzung der Probenpiegel (Daily soiling rate, AVUS-Messung) und Tagesniederschlagsmenge (Precipitation HelioScale-Messung).

An allen drei Stationen waren die Verschmutzungsereignisse deutlich zu erkennen und zeigten plausible Werte im Abgleich mit Stationswartung (Putzen der Probenpiegel), sowie Niederschlagsereignissen (natürliche Reinigung der Probenpiegel). In der implementierten Datenauswertung wurden Filterfunktionen angewandt. Die Qualität der Daten bzw. Anteil gefilterter Daten ist im Anhang dargestellt und beläuft sich auf 10 bis 20% der verfügbaren Daten. Darin berücksichtigt sind bereits Daten, die außerhalb des gewählten Wertebereichs der AVUS-Sensorik liegen. Signifikante Datenlücken ergaben sich an den Stationen C und SE, welche in der Regel mittels Neustarts behoben werden konnten. Station C konnte ab dem Mitte Dezember 2022 nicht mehr erreicht werden. Ein Kommunikationsfehler wird vermutet und wurde seitens PSE untersucht. Weitere Untersuchungen folgen außerhalb des Projektrahmens.

Insgesamt wurden an einem sehr ariden Standort mit extremen Temperaturen ($> 50^{\circ}\text{C}$), extremer Sonneneinstrahlung und starken Sandstürmen jedoch gute und plausible Ergebnisse erzielt. Deutlich zu erkennen ist ein Unterschied zwischen der detektierten Regendauer (AVUSpro) und Regenmenge (meteorologische Messstationen). Da Regenfall zur natürlichen Säuberung der Spiegel beiträgt, sind verlässliche Regenmessungen nötig. Somit ist die nähere Untersuchung dieser Diskrepanz empfehlenswert. Ferner führt auch Wind zu einem Abtragen von auf den Spiegeln akkumuliertem Sand.

Datenqualität der AVUSPro Messungen

Die Datenqualität wurde im Rahmen der Monatsberichte ausgewertet und statistisch untersucht. Dabei werden Daten entsprechend der auf die Daten angewandten Filter- und Datenanalysefunktionen mit sog. *Flags* entsprechend des Befunds versehen. In den automatisiert erstellten Monatsberichten werden AVUS-

Daten gemeinsam mit den Daten der meteorologischen Messstation dargestellt. Letztere wurden in einer detaillierten Datenauswertung berücksichtigt.

Es traten auch AVUS-Messungen auf, die das untere gewählte Limit von 60% unterschritten („< Min. Phys. Limit“, blau). Diese sind jedoch nicht als falsch zu Werten. Grenzwerte wurden derart gewählt, dass nur ein verlässlicher Wertebereich der verwendeten Sensorik berücksichtigt wird. Angesichts des sehr ariden Standortes, extremen Sandsturmereignissen und der damit verbundenen hohen Verschmutzung, ist es nicht verwunderlich, dass Werte mit hoher Verschmutzung detektiert wurden.

Erprobung des pFlex im Feld: (TSK Flagsol)

Im Rahmen des Projektes wurde je ein pFlex-Gerät an die Evora Molten Salt Plattform in Portugal und an das Kraftwerk Shagaya in Kuwait versendet und erfolgreich eingesetzt. Die Geräte funktionierten einwandfrei und wurden nach Abschluss der Projektlaufzeit an die Firma PSE in Freiburg zurückgeschickt. In Portugal arbeitet TSK Flagsol zusammen mit anderen Partnern an den Projekten HPS-2, MSOpera und EuroPatMoS, bei denen ein Kreislauf mit geschmolzenem Salz als Wärmeträger untersucht wird. Auch in Kuwait wurde das pFlex-Gerät erfolgreich eingesetzt.

Standortcharakterisierung im Kraftwerksstandort in Shagaya zur Analyse von Absorption und Streueigenschaften der Verschmutzung (Fraunhofer ISE)

Zu Beginn des Projekts wurden Spiegelproben über einen Zeitraum von 14 Tagen in Shagaya exponiert, wobei Proben für die Untersuchung entnommen wurden. Es erfolgte erstmalige eine standortspezifische Untersuchung zu den spektralen Eigenschaften von Verschmutzungen in Bezug auf Reflexion und Absorption. Die anschließende Streulichanalyse unter diffuser Beleuchtung der exponierten Spiegelproben und Messungen am Spektrometer wurde im Labor am Fraunhofer ISE durchgeführt, dabei konnte die Verschmutzung nach 1, 3, 7 und 14 Tagen Exposition im Solarfeld erfolgreich untersucht werden.



Abbildung 31: Box mit Behälter für feinen Staub für spätere künstliche Verschmutzung im Labor und weiterführende Analysen (links) und Spiegelexposition auf dem Schaltschrank der Wetterstation in Shagaya (rechts)

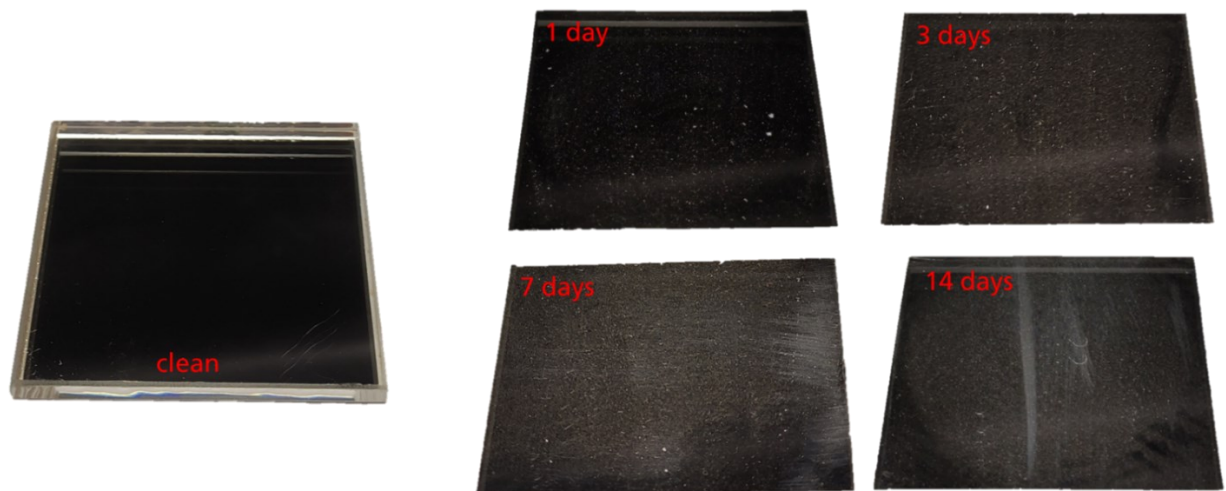


Abbildung 32: Streulichtanalyse bei diffuser Beleuchtung der exponierten Spiegelproben von Shagaya; Soiling nach 1; 3; 7; 14 Tagen Exposition im Solarfeld

Ein Aspekt dieser Untersuchung war die gezielte Analyse der spektralen Merkmale von Verschmutzungen an einem bestimmten Standort. Ein weiterer Schwerpunkt bestand darin, den Vergleich zwischen künstlich und natürlicher Verschmutzung auf den Spiegeln herzustellen. Dabei spielte auch die Überprüfung der Abhängigkeit der Akzeptanzwinkeltransferfunktion eine wichtige Rolle. Der Vergleich zwischen natürlichen und künstlich verschmutzten Proben zeigte, dass diese natürlichen verschmutzten Proben aus Shagaya dazu neigen, das Licht im Nahwinkel stärker zu streuen, im Vergleich zu künstlich verschmutzten Proben im Labor. Daher sind natürliche verschmutzte Proben vorzuziehen, wenn die Streueigenschaften bewertet oder analysiert werden, oder eine Akzeptanzwinkeltransferfunktion erstellt werden soll (Abbildung 33). Es konnte jedoch auch gezeigt werden, dass es deutliche Vorteile hat, eine Transferfunktion auf der Grundlage von künstlicher Verschmutzung zu verwenden, als überhaupt keine Transferfunktion zu nutzen, wenn keine natürlich exponierten Proben vorhanden sind.

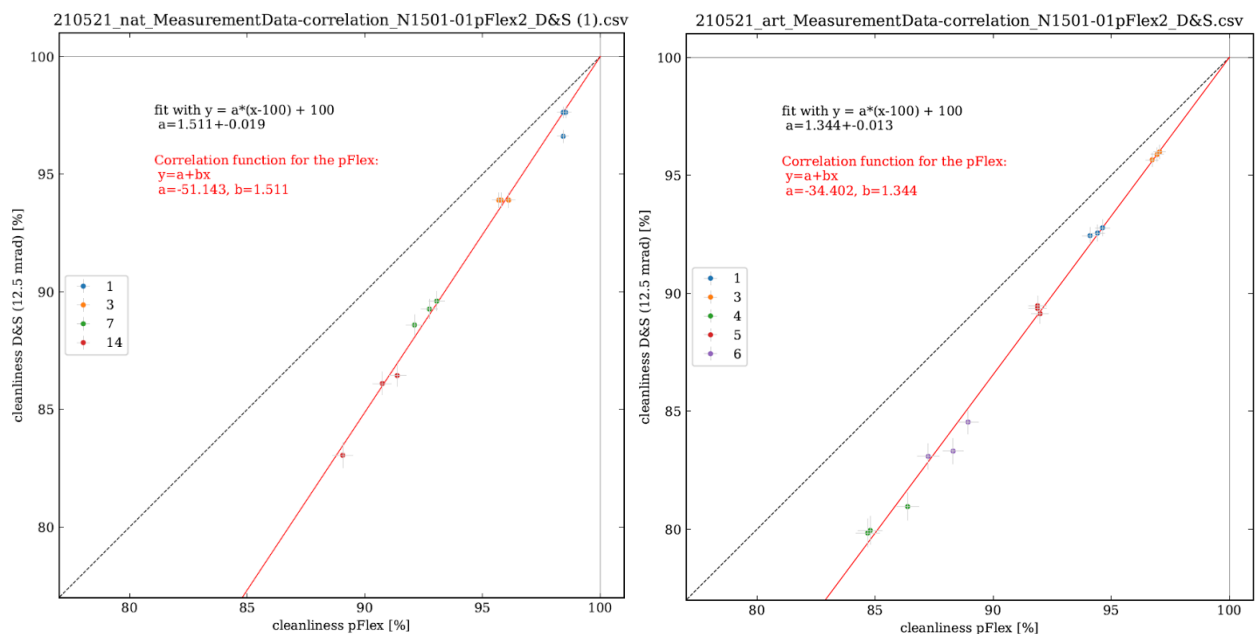


Abbildung 33: Akzeptanzwinkeltransferfunktion der exponierten Spiegelproben von Shagaya; Soiling nach 1; 3; 7; 14 Tagen Exposition im Solarfeld (links) und künstlich Verschmutzung (rechts)

Spektrale Analyse der exponierten Proben aus Shagaya:

Spektrale Vergleichsmessungen wurden zwischen dem gerichteten Reflexionsspektrometer mit einem Akzeptanz-Halbwinkel > 60 mrad und den D&S-Messungen bei einer Wellenlänge von 650 nm mit einem Akzeptanz-Halbwinkel von 12,5 mrad durchgeführt.

Abbildung 34 zeigt den spektral aufgelösten Verlauf des Reflexionsgrades. Nach einem starken Anstieg im kurzwelligen Bereich folgt ein Plateau, welches ab ca. 1500 nm leicht, ab ca 2200 nm dann stark abfällt. Bemerkenswert ist, dass der Verschmutzungsgrad keinen Einfluss auf den spektralen Verlauf zeigt und ein nahezu paralleles Verhalten aufweist. Dies deutet darauf hin, dass eine spektrale Transferfunktion mit nur einem Referenzpunkt (e.g. 650 nm) ausreicht, um bei Kenntnis des standortspezifischen Staubverhaltens eine Übertragung auf den solargewichteten Reflexionsgrad treffen zu können. Es ist darüber hinaus deutlich zu erkennen, dass es eine starke Akzeptanzwinkelabhängigkeit gibt, die durch Streuung verursacht wird. Diese Abhängigkeit wurde bereits in der Untersuchung zur Transferfunktion für die Akzeptanzwinkelkorrektur aufgezeigt. Der Reflexionsgrad steigt mit dem größeren Akzeptanzwinkel des Spektrometers. Erst bei einem sauberen Spiegel ohne Einfluss von Streuung sind beide Werte identisch.

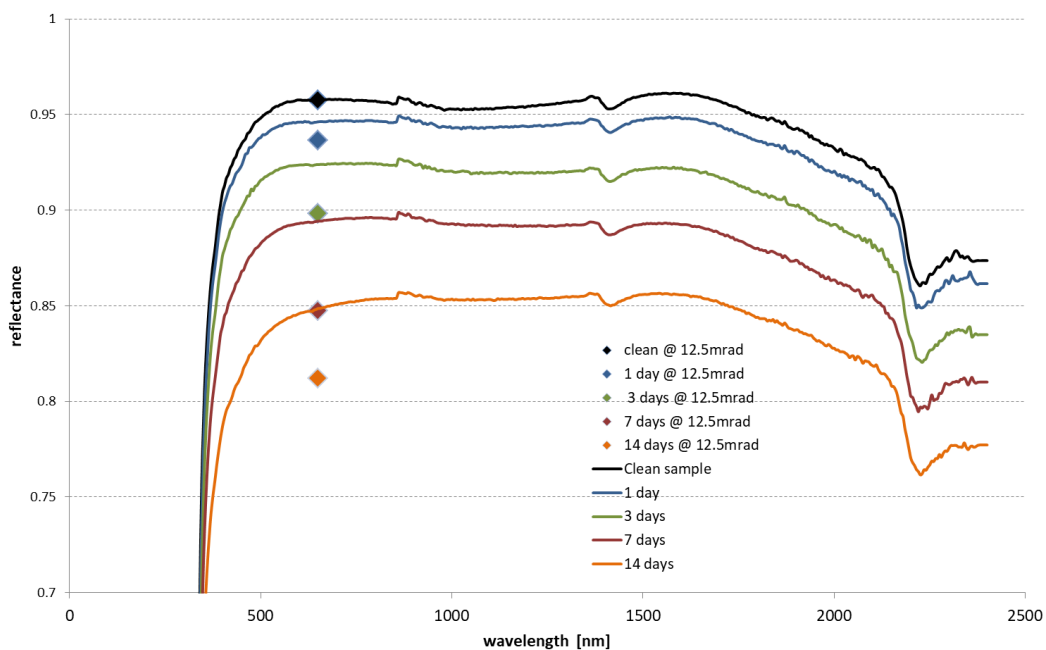


Abbildung 34: Spektrometrische Messungen des Reflexionsgrad und D&S-Messungen bei einer Wellenlänge von 650 nm mit einem Akzeptanz-Halbwinkel von 12,5 mrad

Die spektrale Untersuchung zeigte, dass der Anteil der Streuung um den Faktor 11 stärker ist als die Absorption und über das gesamte Spektrum relativ konstant bleibt, abgesehen von einem leichten Anstieg im kurzwelligen Bereich (blauem Licht). Im Gegensatz dazu steigt die Absorption im kurzwelligen Bereich stark an (Abbildung 35).



Abbildung 35: Analyse der spektrometrischen Messungen relative Absorption und Streuung der 14 Tage exponierten Probe

Statusbericht zu AVUS-Geräten und Fehlerdiagnose im Kraftwerksstandort in Shagaya und Freigelände Hochdorf (PSE)

Sämtliche Messdaten wurden erfolgreich von der PSE auf die Cloud-Server übertragen. Diese Daten mit einem 24h Delay stellen sicher, dass die Daten- und Diagnosetools frühzeitig Probleme erkennt und die Messstationen für weitere Analysen zugänglich sind.

Parallel zu den Geräten in Shagaya wurde die Aufstellung von drei weiteren Geräten für eine genaue Untersuchung auf dem Freigelände des ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme) in Hochdorf durchgeführt. Dieser Schritt wurde unternommen, um vertiefte Untersuchungen und Analysen durchführen zu können.

Die Entscheidung, diese Geräte auf dem ISE Freigelände aufzustellen, ermöglicht es uns, detaillierte Tests unter realen Außenbedingungen durchzuführen bei gleichzeitigem direktem Zugang.

Die Einrichtung der Datenverbindung und die Durchführung von Tests der AVUSpro-Prototypen auf dem Fraunhofer Testgelände in Hochdorf wurden erfolgreich abgeschlossen. Es wurden dabei unter anderem Defekte in den Federn aufgrund fehlerhafter Installation festgestellt, die nun ausgetauscht wurden. Der Austausch der defekten Federn in Shagaya wurde ebenfalls bereits erfolgreich durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der AVUSpro-Geräte sicherzustellen. Die PSE arbeitete aktiv daran, die noch ausstehenden Probleme zu lösen und die detaillierte Identifikation eines I2C-Bus-Defekts voranzutreiben.



Abbildung 36 kontinuierliche Analyse und Verbesserungen der AVUSpro-Stationen auf dem Freigelände des ISE z.B. der Detektion von Korrosion an Bauteilen

Studie zum Grad der Korrosion verschiedene Standorte im Solarkraftwerk (ISE)

Im Zuge des Projektes wurden Korrosions-Messsätze mit Korrosionscoupons nahe der drei Meteostationen, zwischen den Parabolrinnen-Loops im Nordwesten (NW) im zentralen Bereich nahe dem Kraftwerksblock und im Südosten (SO) des Solarkraftwerks Shagaya installiert, um Korrosion zu überwachen und zu bewerten (siehe Abbildung 22). Die Korrosionscoupons wurden an strategischen Stellen im Solarkraftwerk platziert, um den Grad der Korrosion zu bestimmen, dem das Metall ausgesetzt ist. Ziel war es Rückschlüsse der Umgebungseinflüsse an verschiedene Standorte im Solarkraftwerk, wie z. B. Feuchtigkeit, Salzgehalt, Temperaturänderungen oder chemischen Rückständen zu erhalten und durch die Platzierung von Coupons an diesen Stellen die Korrosionsreaktion in diesen spezifischen Umgebungen zu bewerten. Auf Abbildung 37 ist ein im Feld installierter Korrosions-Messsätze abgebildet, wobei die Fotoaufnahme links direkt nach der Installation und das Foto rechts nach ca. einem Jahr, während einer turnusmäßigen Wartung der AVUSpro Stationen erfolgte. Bei den Stahl- DC04 (1) und Kupfercoupons Cu DHP 99,9 % (2) ist ein Einfluss von Korrosion deutlich zu erkennen.

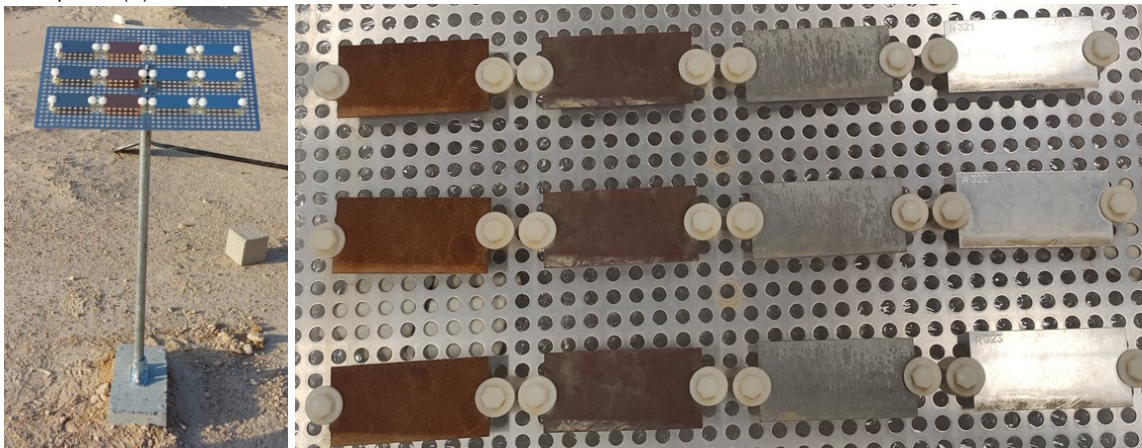


Abbildung 37: Im Solarkraftwerk Shagaya installierte Korrosionscoupons bei Installation (links) und nach ca. einem Jahr Exposition (rechts)

Die Korrosionscoupons wurden nach einjähriger Exposition zur Analyse zurück ans Fraunhofer ISE gesendet. Die Auswertung von Korrosionscoupons erfolgt durch verschiedene Analysemethoden entlang des Standards EN ISO 12944-2, um den Grad der Korrosion und die Art der entstandenen Schäden zu bestimmen. Im Korrosionslabor des Fraunhofer ISE wurde die Gewichtsverlustmessung als einer der gängigen Methoden verwendet. Dabei werden die Coupons gereinigt und je nach Art des Metalls unterschiedlich chemisch behandelt, um jegliche Oberflächenablagerungen und korrodierten Schichten zu entfernen. Anschließend wird ihr Gewicht mit hoher Präzision gemessen. Der Gewichtsverlust im Vergleich zum ursprünglichen Gewicht des Coupons gibt Aufschluss über die Korrosionsrate und die Korrosionsklasse. In Abbildung 38 ist am Beispiel von DC04B Korrosionscoupons die Entfernung der korrodierten Schichten vor (links) und nach (rechts) der chemischen Behandlung als Vorbereitung für die Gewichtsverlustmessung dargestellt.

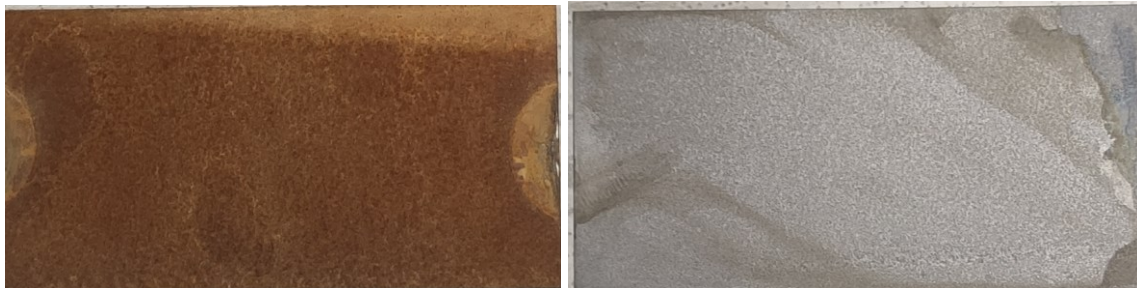


Abbildung 38: in Shagaya installierter Stahl DC04B Korrosionscoupons nach einjähriger Exposition vor (links) und nach (rechts) der chemischen Behandlung als Vorbereitung für die Gewichtsverlustmessung.

Die Korrosionsanalyse ergab für den Standort Shagaya gemäß EN ISO 12944-2 eine Korrosionskategorie C3 für Stahl DC04B und Kupfer Cu DHP 99,9 %. Die Korrosionsklasse entspricht einer moderaten Korrosionsbelastung. Es umfasst Bereiche mit mäßiger Industrieverschmutzung und Küstenbereiche mit leichter Salzbelastung.

	Copper DHP 99,9 %		DC04B		REINALUMINIUM Al99,5 hh	
NW	6.98 [g/m ² a]	C3	264.72 [g/m ² a]	C3	-0,05 [g/m ² a]	C1
CENTER	7.09 [g/m ² a]	C3	252.79 [g/m ² a]	C3	-0.14 [g/m ² a]	C1
SE	6.67 [g/m ² a]	C3	259.51 [g/m ² a]	C3	-0,07 [g/m ² a]	C1

In Umgebungen der Kategorie C3 können Stahlkonstruktionen in Solarkraftwerken einer erhöhten Korrosionsgefahr ausgesetzt sein, die entsprechende Schutzmaßnahmen erfordert, um die Lebensdauer der Anlagen zu verlängern. Dies kann die Verwendung von Beschichtungen oder anderen Korrosionsschutzmaßnahmen erfordern, die speziell auf die Bedingungen dieser Umgebung zugeschnitten sind.

Die Korrosionscoupons mit Reinaluminium (Al99,5%) ergaben gemäß EN ISO 12944-2 eine Korrosionskategorie C1. Die Korrosionsklasse beschreibt eine sehr geringe Korrosionsbelastung. Hierbei handelt es sich um Umgebungen mit sehr geringer Verschmutzung und minimaler Gefahr von Korrosion. Anlagen- und Bauteileteile aus Reinaluminium in Umgebungen der Kategorie C1 erfordern geringe bis keine Korrosionsschutzmaßnahmen.

Im Rahmen der Studie zum Grad der Korrosion verschiedener Aufstellorte im Solarkraftwerk konnten nur sehr geringe Unterschiede der ermittelten Gewichtsverluste ausgemacht werden. Die Gewichtsverluste zeigen nur minimale Varianz oberhalb der Messgenauigkeit der jeweiligen drei Korrosions-Messsätze pro

Standort. Die Unterschiede sind aber so klein dass eine wissenschaftlich fundierte Aussage über unterschiedliche Tendenzen nicht gemacht werden kann. Alle Korrosions-Messsätze lagen unabhängig von den Standorten im Kraftwerk stabil in ihrer jeweiligen Korrosionskategorie.

2.1.4 AP 4 Anwendung auf O&M im Solarkraftwerk (AP-Leitung: Flagsol)

MS-Nr.	Erzieltes Ergebnis (Kommentar)	Erreicht am
M4.1	Reinigbarkeit anhand von Proben zweier Standorten untersucht (mit leichter Verzögerung abgeschlossen)	02.2022
M4.2	Bestimmung des techno-ökonomischen Potentials von Reinigungsoptimierung und den im Projekt gewonnen Erkenntnissen (planmäßig in gegenüber Plan leicht reduzierter Form abgeschlossen)	06.2023

Reinigungseffizienz und Reinigbarkeit von Spiegel- und Staubproben (TSK)

In diesem Arbeitspaket wurde die Reinigbarkeit anhand von Proben von zwei Standorten untersucht. Aus den bereits oben beschriebenen Gründen wurde dies nur für einen Standort, Shagaya, durchgeführt. Diese Studie wurde in Zusammenarbeit mit der Firma IK4 durchgeführt. Wir haben ihr Angebot akzeptiert. Für seine Realisierung haben wir den Spiegel für die Reinigungsversuche wurde für den Test gekauft und die Arbeiter in Kuwait haben die für den Test benötigten 5 Kilogramm feinen Sand gesammelt.

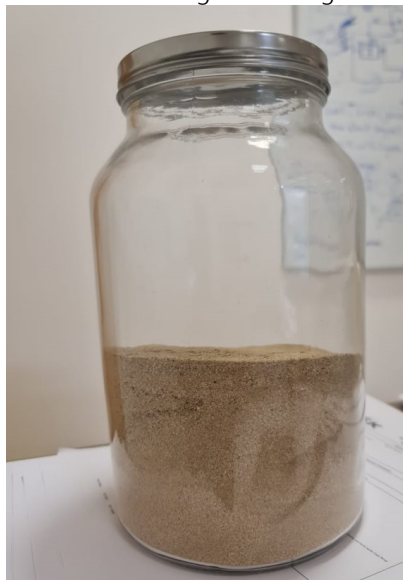


Abbildung 39: ein Teil des gesammelten Feinsandes

Die Studie wurde mit Shagaya-Sand auf dem Teststand der Firma IK4 Techniker durchgeführt:

1. Test 1: Shagaya-Sand, Reinigung nur mit Wasser (ohne Bürste)
2. Test 2: Shagaya-Sand, Verwendung von Bürsten bei der Reinigung.

Der Bericht bereits zu einem früheren Zeitpunkt während der Projektlaufzeit übermittelt wurde, doch im Folgenden werden die angewandte Testbedingungen, Methodik und die Ergebnisse kurz beschrieben:

Testbedingungen:

- Raumtemperatur: 22°C.
- % Luftfeuchtigkeit: 75%.
- Reinigungswasser: deionisiertes Wasser.
- Wassertemperatur: 30 ± 5 °C.
- Nenndruck des Reinigungswassers: 20 bar.
- Reinigungswassermenge: 0,33-0,55 l/m². 4,6 l/min
- Temperatur des Sandes: 30 °C.

- Sandgröße: $\leq 100 \mu\text{m}$.
- Sanddosierung: $2,05 \text{ mg/cm}^2$.
- Reinigungsbürste, Nenndrehzahl: 75 U/min.
- Spiegelgröße: $500 \times 500 \times 4 \text{ mm}$
- Translationsgeschwindigkeit: $1,5 \text{ km/h}$.
- Anpressdruck: der Abstand zwischen Bürstenrücken und Spiegel beträgt 750 mm



Abbildung 40: Reinigungsbürste aus Polyethylen

Methodik:

1. Messung des Reflexionsgrads eines sauberen Spiegels

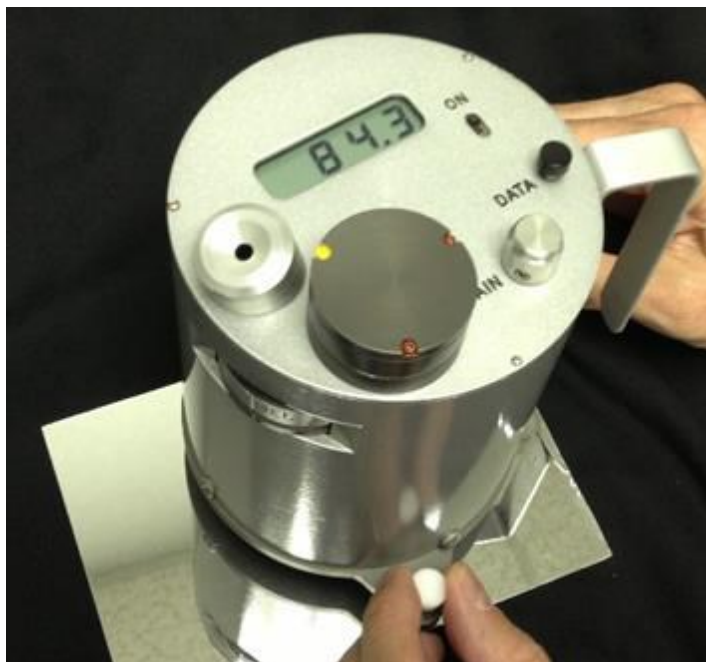


Abbildung 41: Spiegelreflektometer

2. Verschmutzung des Spiegels: Die Verschmutzung des Spiegels wurde durch die Verwendung von echtem Sand, der in Shagaya eingesammelt wurde, mit einer Korngröße von $\leq 100 \mu\text{m}$ simuliert. Die niedrigste auf dem Prüfstand erzielte Verschmutzung betrug $2,05 \text{ mg/cm}^2$. Der Staub wurde auf einen befeuchteten Spiegel aufgetragen und anschließend mit IR-Lampen getrocknet („angebacken“).
3. Messung des Reflexionsgrads des verschmutzten Spiegels: Nach der Verschmutzung der Spiegeloberfläche wurde der Reflexionsgrad mit einem tragbaren D&S-Gerät an 6 verschiedenen Positionen auf der zuvor verschmutzten Spiegeloberfläche erneut gemessen.

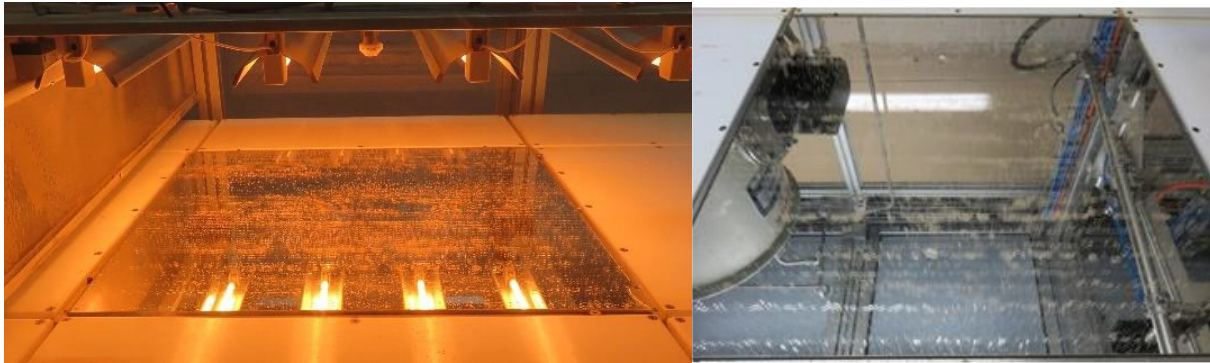


Abbildung 42: Bilder von verschmutzten Spiegeln

4. Automatische Spiegelreinigungszyklen auf dem Teststand: Nach der Messung des Reflexionsgrads auf der verschmutzten Oberfläche des Spiegels wurde ein erster Reinigungsvorgang nur mit Wasser durchgeführt und für eine unterschiedliche Anzahl von Zyklen wiederholt, bis ein Spiegelreflexionsgrad von 98 % des ursprünglichen Wertes erreicht war. Danach wurde ein zweiter Test mit einer Bürste durchgeführt. Dieser zweite Test wurde ebenfalls wiederholt, bis ein Reflexionswert von 98 % des ursprünglichen Wertes erreicht war. Die Testparameter wie Rotationsgeschwindigkeit, Translationsgeschwindigkeit, Bürstenanpressdruck, die Menge des für die Verschmutzung verwendeten Sandes und der Wasserdruck wurden in Anlehnung an die realen Reinigungsbedingungen in der Praxis ausgewählt.

Ergebnisse:

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse des ersten Tests (Shagaya-Sand, Reinigung nur mit Wasser, ohne Bürste)

Tabelle 4: Test 1 Ergebnisse

4.1. Initial reflectance	1	2	3	4	5	6	Mean	Standard deviation
	96.7	96.5	96.5	96.4	96.6	96.5	96.5	0.1
4.2. Soiled mirror reflectance	1	2	3	4	5	6	Mean	Standard deviation
	76.9	80.3	74.6	70.5	77.1	77.8	76.2	3.3
4.3. Final reflectance	1	2	3	4	5	6	Mean	Standard deviation
	96.4	96.5	96.4	96.5	96.5	96.5	96.4	0.05
Cleaning cycle 1	88.0	86.9	87.5	88.1	87.5	88.2	87.7	0.5
Cleaning cycle 2	89.9	88.7	92.2	91.0	89.9	89.8	90.2	1.2
Cleaning cycle 3	93.2	94.0	94.3	93.9	94.2	95.0	94.1	0.6
Cleaning cycle 4	95.3	94.0	95.0	95.1	95.0	95.0	94.9	0.4
Cleaning cycle 5	95.1	95.3	95.2	95.1	94.9	95.1	95.1	0.1
Cleaning cycle 6	95.4	95.5	95.3	95.4	94.8	95.3	95.2	0.2
Cleaning cycle 8	95.8	95.7	96	95.9	95.8	95.9	95.8	0.1
Cleaning cycle 10	96.2	96.0	96.0	95.9	96.0	96.1	96.0	0.1
Cleaning cycle 12	96.2	96.1	96.2	96.3	96.2	96.3	96.2	0.1
Cleaning cycle 14	96.4	96.5	96.4	96.5	96.5	96.5	96.4	0.05

Der anfängliche Reflexionswert betrug 96,5%. Beim Verschmutzungsprozess wird ein Reflexionsgrad von 76,2% erreicht, was 78 % des ursprünglichen Wertes entspricht. Nach den Wasserreinigungszyklen können wir sehen, dass im Reinigungszyklus 4 die Referenz zu 98% wiederhergestellt wird und wir 100% ihres Reflexionsgrades im Zyklus 14 der Wasserreinigung erhalten.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse des zweiten Tests (Test 2: Shagaya-Sand, Verwendung von Bürsten bei der Reinigung)

Tabelle 5: Test 2 Ergebnisse

5.1. Initial reflectance	1	2	3	4	5	6	Mean	Standard deviation
	96.7	96.5	96.5	96.4	96.6	96.5	96.5	0.1
5.2. Soiled mirror reflectance	1	2	3	4	5	6	Mean	Standard deviation
	78.9	75.6	75.5	79.8	70.5	74.7	75.8	3.3
5.3. Final reflectance	1	2	3	4	5	6	Mean	Standard deviation
	96.5	96.5	96.6	96.7	96.5	96.6	96.5	0.1
Cleaning cycle 1	87.0	90.2	90.4	88.5	89.0	90.0	89.1	1.3
Cleaning cycle 2	95.7	95.8	95.9	95.7	95.8	95.7	95.7	0.1
Cleaning cycle 3	96.0	96.2	96.3	96.1	96.0	96.2	96.1	0.1
Cleaning cycle 4	96.3	96.1	96.2	96.3	96.3	96.3	96.2	0.1
Cleaning cycle 5	96.4	96.5	96.6	96.5	96.5	96.5	96.5	0.06

In Test 2 wurden Reinigungszyklen mit der Bürste durchgeführt. Nach dem Verschmutzungsprozess, der auf die gleiche Weise wie in Test 1 durchgeführt wurde, wurde ein Reflexionswert von 75,8 % erreicht. Nach 2 Reinigungszyklen wurde ein Reflexionsgrad von 95,7 % erreicht, somit mehr als 98 % des ursprünglichen Reflexionsgrades. Nach 5 Reinigungszyklen wurden in diesem Fall 100 % des ursprünglichen Reflexionsgrades erreicht.

Ein umfangreicher Datensatz mit händischen Messungen der Cleanliness im Kraftwerk Shagaya wurde von TSK Flagsol zur Verfügung gestellt. Der Datensatz über 9 Monate wurde ausgewertet um Validierungen der AVUS-Messdaten und deren Vorhersage für das Gesamtfeld, sowie zur Überprüfung der Cleanliness-Vorhersage zu erlauben. Die Messungen erfolgten an nach einer definierten Prozedur zufällig gewählten Kollektoren im Feld unter Nutzung des D&S-Reflektometers. Anhand der Daten kann eine durchschnittliche Verschmutzung bzw. Sauberkeit des gesamten Feldes abgeschätzt werden. Abbildung 43 zeigt die mittels AVUS-Geräten gemessenen relativen Verschmutzungsraten über ein gesamtes Jahr, sowie die aus den D&S-Handmessungen ermittelten Verschmutzungsraten sowie deren Unsicherheiten. Die zahlenmäßige Achsenbeschriftung wurde entfernt, da es sich um Betriebsinterna des Kraftwerks handelt. Über weite Bereiche zeigen die Messungen einen ähnlichen Verlauf, während die Handmessungen teilweise etwas stärker hervortreten, z.T. aber auch Verschmutzungsereignisse nicht als solche detektieren können. Der Ausfall eines AVUS-Geräts im Mai, sowie die häufigen Regenereignisse erlauben für diesen Monat keine eindeutige Bewertung, wie nachfolgend weiter erläutert wird.

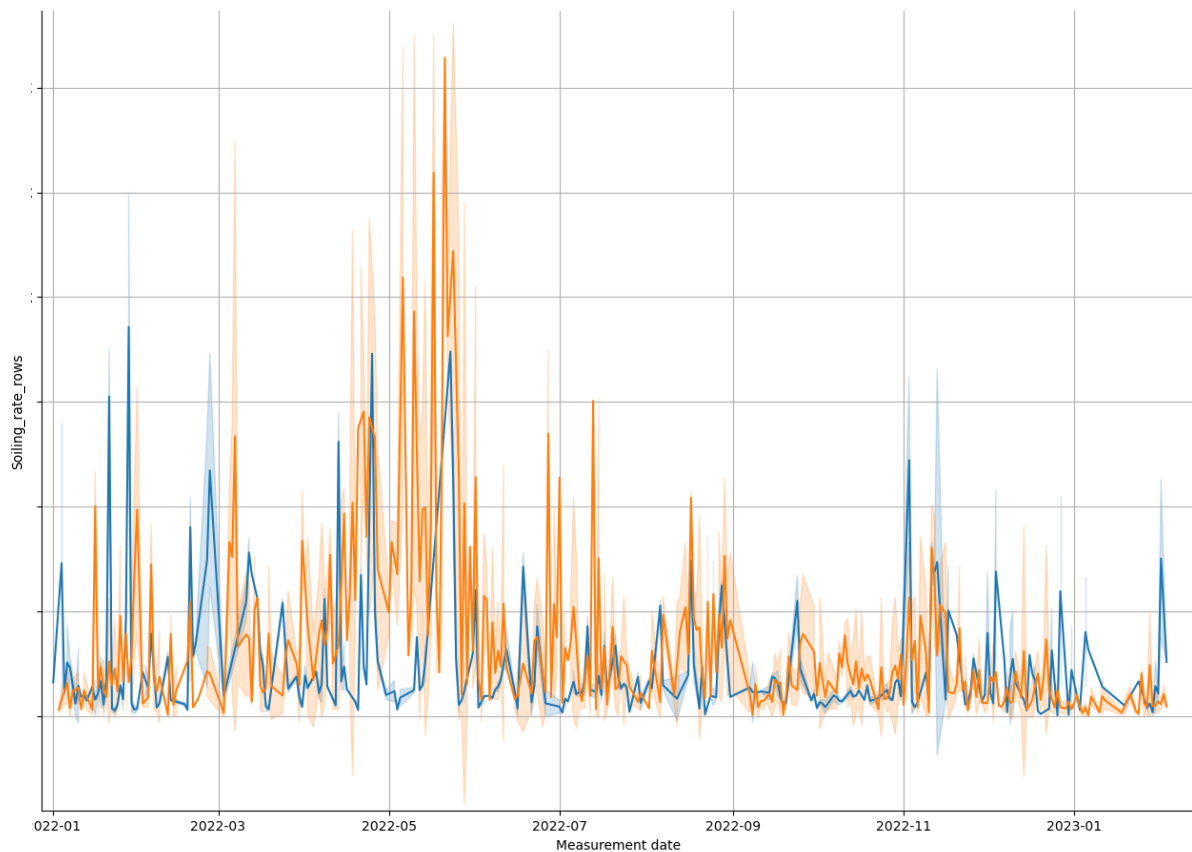


Abbildung 43: Relative Verschmutzungsrate gemessen mit den AVUS-Geräten (blaue Linie) und aus Handmessungen abgeschätzt (orangene Linie). Die Standardabweichung aus den herangezogenen Einzelmessungen ist jeweils als transparenter Bereich eingezeichnet.

Abbildung 44 zeigt eine Auswertung der mittels AVUS-Sensoren gemessenen relative Cleanliness (orange) und der ebenfalls ausgewerteten Verschmutzungsrate (grün). Die Absolutwerte wurden herausgenommen, da es sich um Interna des Kraftwerksbetriebs handelt. Neben den Messpunkten sind als halbtransparenter Bereich auch die Varianzen der Einzelmessungen als Standardabweichung eingetragen. Für den Zeitraum Januar bis August 2022 ist die aus den Handmessungen herangezogene Cleanliness darüber eingetragen. Hierbei ist wesentlich, dass die Handmessungen teilweise nur sehr lokale Effekte zeigen. So ist anzunehmen, dass zu Beginn des Jahres die Cleanliness überschätzt wird, da hier nur in kleinen Bereichen des Feldes gemessen wurde. Im Mai gibt es ebenfalls größere Abweichungen. Der Mai zeichnete sich als stürmischer und regnerischer Monat aus. Einerseits ist unklar, wie verlässlich die Handmessungen hier sind (Feuchtigkeit auf den Reflektoren während der Messung), andererseits sind hier in den AVUS-Messdaten Lücken zu verzeichnen, welche aufgrund eines Geräteausfalls und, funktionsgerecht, aufgrund von detektierter Feuchtigkeit herausgefiltert wurden. Darüber hinaus war in Zeitraum zuvor die ein- bis zweiwöchige Reinigung der AVUS-Stationen durch das lokale Personal ausgefallen, aufgrund von Feiertagen und anderen Aufgaben. Nach der Wiederinbetriebnahme des defekten Geräts nach der ersten Wartungsmission ab Ende Mai zeigen Handmessungen und AVUS-Daten einen übereinstimmenden Verlauf und können anhand der Überschneidungen als gleich angesehen werden.

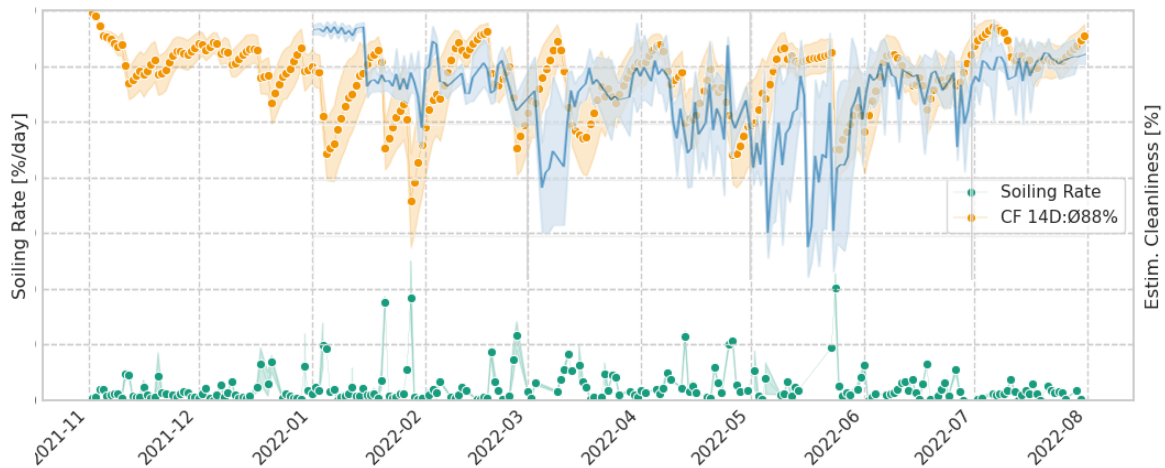


Abbildung 44: Verschmutzungsrate (Soiling Rate, grün, linke Achse) und Sauberkeit (Cleanliness Factor CF, orange, rechte Achse) bei einem angenommenen 14-tägigen Reinigungszyklus. In blau ist die händisch gemessene mittlere Cleanliness mit Standardabweichung für einen Zeitraum von 8 Monaten eingezeichnet.

Verschmutzungsdaten der AVUS-Messgeräte wurde herangezogen, um Analysen zur erreichbaren Sauberkeit anhand von Reinigungszyklen zu ermitteln. Beispielhaft ist in Abbildung 45 die theoretische abgeschätzte Gesamt-Cleanliness für den Fall eines siebentägigen regulären Reinigungszyklus über das gesamte Jahr abgebildet. Gezeigt sind die anhand der AVUS-Stationen ermittelte Soiling-Rate, sowie der Cleanliness Faktor. Über den betrachteten Zeitraum von Ende 2021 bis Mitte 2022 wird so ein mittlerer CF-Wert von 94% abgeschätzt. Bei einem fünftägigen Zyklus können über denselben Zeitraum theoretisch 96% erreicht werden. Eine mittlere Cleanliness von 98% wird mit einem viertägigen Zyklus erreicht. Es ist hervorzuheben, dass diese Ergebnisse keinesfalls das Optimum über mehrere Jahre anzeigen: Das Frühjahr 2022 war von ungewöhnlich starken und häufigen Sandstürmen geprägt. Die Reinigungsstrategie für den langjährigen Betrieb lässt sich anhand dieses Jahres alleine nicht umfassend bewerten. Sie bedarf eines erweiterten Monitorings.

Deutlich lässt sich aus der Analyse jedoch das Potential ermitteln. Die Sauberkeit des Feldes geht nahezu linear in den Wirkungsgrad ein, insbesondere in den Wintermonaten. Im Sommer spielt die Sauberkeit eine geringfügig kleinere Rolle, da hier durch das Überangebot teilweise Kollektoren defokussiert werden müssen. Neben der Sauberkeit selbst ist die Verteilung von großer Bedeutung: Ziel der Reinigungsstrategie muss es sein in jedem Subfield möglichst einen homogenen Reinigungszustand zu erreichen, um die maximale Header-Mischtemperatur zu erreichen.

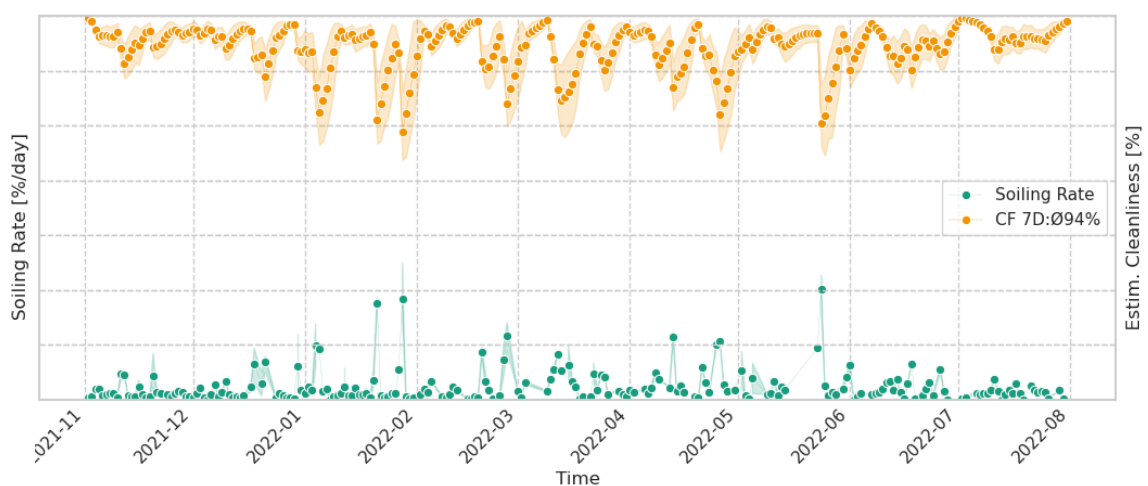


Abbildung 45: Gemessene Verschmutzungsrate (Soiling Rate, grün, linke Achse) und Abgeschätzter Cleanliness-Faktor (orange, rechte Achse) bei einem angenommenen Reinigungszyklus von 7 Tagen am Standort Kuwait, Shagaya.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt separat über die zentrale Verwaltung der Fraunhofer-Gesellschaft, bzw. über PSE Instruments GmbH und TSK Flagsol Technologies GmbH.

2.3 Notwendigkeit der Arbeit

Die Arbeiten waren notwendig und zielführend zum Erreichen der Ergebnisse

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden eine Vielzahl von Ergebnissen erzielt, die zum Teil bereits von **Fraunhofer ISE** in wissenschaftlichen Veröffentlichungen wie Zeitschriftenartikeln und Konferenzbeiträgen publiziert wurden. Das Fraunhofer ISE plant zudem weitere Veröffentlichungen, um die Erkenntnisse einem breiteren wissenschaftlichen Publikum zugänglich zu machen.

Die Projektergebnisse werden auch bei der Erarbeitung der nächsten Richtlinie zur Messung und Bewertung von Verschmutzung im Rahmen der IEA SolarPACES Task III durch das Fraunhofer ISE berücksichtigt. In diesem Zusammenhang wird auch das AVUS-Gerät als Alternative zu den Handmessgeräten diskutiert.

Für Fraunhofer ISE liegt die Verwertung vorwiegend in der wissenschaftlichen Fortschreibung und dem Aufbau auf die gewonnenen Erkenntnisse. Eine wirtschaftliche Verwertung erfolgt insofern, dass die Ergebnisse in nachfolgenden Forschungsprojekten gemeinsam mit Industriepartner genutzt werden und so dem Technologiestandort Deutschland wieder zugutekommen. Über Lizenzen für die entwickelten Messköpfe für das pFLEX-Reflektometer oder in Zukunft für die AVUSpro-Messeinheit wird wiederum Vorlaufforschung finanziert, welche ebenfalls die Entwicklung in der Industrie unterstützt.

Die Forschungsarbeit hat wesentliche Erkenntnisse für die Entwicklung von Optoelektronik hinsichtlich Störungsreduzierung und Temperaturstabilität geliefert. Zudem wurden Filterroutinen zur Auswertung und Bewertung von Verschmutzungsraten entwickelt. Auf dieser Erfahrung kann Fraunhofer ISE bei der Weiterentwicklung und bei der Entwicklung anderer Geräte mit und für Industriepartner aufbauen. Ein weiterer wichtiger Aspekt des Projekts ist die Erweiterung der Kompetenz bei der Bewertung und Optimierung von Reinigungsintervallen und Reinigungsstrategien. Diese Ergebnisse haben ein großes wirtschaftliches Potenzial für Forschungspartner und Kraftwerksbetreiber. Durch die gewonnenen Erkenntnisse hat das Fraunhofer ISE einen wissenschaftlichen Vorsprung gegenüber Mitbewerbern erzielt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden auch in andere Projekte wie HelioSense und weitere Projekte im Antrags- oder Skizzenstatus eingebunden. Das Fraunhofer ISE plant zudem die weitere Verwendung der Ergebnisse in internationalen Verbundprojekten. Im Verbundforschungsprojekt SmartCSP, welches ebenfalls durch das BMWK gefördert wird, kommt das AVUSpro-Gerät zu Forschungszwecken in Südafrika zum Einsatz und wird dabei weiter an einem alternativen Standort erprobt und der Betrieb durch das Fraunhofer ISE wissenschaftlich begleitet.

Interesse an einer Forschungszusammenarbeit wurde auch im Rahmen der SolarPACES-Konferenz bekundet. Dies zeigt das Potenzial für eine breitere Anwendung der Forschungsergebnisse. Insgesamt hat das Projekt die Expertise des Fraunhofer ISE bei der Bewertung von aktuellen und zukünftigen Standorten erweitert. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen somit zu einer verbesserten Standortbewertung und -optimierung bei. Die Forschungsergebnisse haben somit nicht nur wissenschaftlichen Mehrwert, sondern bieten auch konkrete Anwendungsmöglichkeiten und wirtschaftliche Potenziale für die Industrie und Forschungspartner, wie auch nachfolgend erläutert wird.

Die **TSK Flagsol Engineering GmbH** hat sich in wissenschaftlicher Hinsicht insbesondere mit der Reinigbarkeit von Spiegeln auseinandergesetzt. Wie in Abschnitt 2.1.3 dargestellt, hat sich gezeigt, dass die Reinigung mit der Bürste effektiver ist als die Reinigung mit Wasser allein. TSK Flagsol Engineering GmbH wird dieses Ergebnis nutzen, um die Reinigung der Solaranlagen zu optimieren.

Die TSK Flagsol Engineering GmbH gewinnt durch die intensive Auseinandersetzung mit den AVUSpro Geräten und ihren anlagenbaulichen Implikationen einen zeitlichen Vorsprung auf dem Markt, und hofft, dadurch einige Projekte in zukünftigen Wettbewerbsverfahren gewinnen zu können. Die genannten Verbesserungen im Reinigungsprozess, sowohl hinsichtlich der Reinigbarkeit als auch der Optimierung von Reinigungszyklen werden weiter untersucht und voraussichtlich auch eine Verbesserung der Performance erzielen, welche sich in der Wirtschaftlichkeit auswirkt. Die Erkenntnisse aus AVUSpro sollen darüber

hinaus für zukünftige Projekte einbezogen werden, wodurch eine verbesserte wirtschaftliche Vorhersage und daraus schließend eine bessere Kalkulation für TSK Flagsol und Kunden erstellt werden kann.

Die **PSE Instruments GmbH** konnte durch die Arbeiten im Projekt ihre Erfahrung in Elektronik und Kommunikation erweitern.

2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Während der Projektlaufzeit ist im internationalen Forschungsfeld zur Verschmutzungsmessung ebenfalls Fortschritt zu verzeichnen.

Im HelioCon-Projekt (gefördert durch das Department of Energy, USA) das Thema Verschmutzung und Verschmutzungsmessung als ein wesentlicher Bedarf, aber auch noch als Lücke ermittelt. Auch wurde ein kommerziell erhältlicher autonomer Verschmutzungssensor, wie das AVUS-Gerät, als wesentlich für die Standortbewertung befunden.

In der internationalen Forschung und Entwicklung wurden Methoden zur kamerabasierten Vermessung von Verschmutzung veröffentlicht, welche z.T. den im Rahmen von AVUSpro durchgeführten Experimenten ähneln. Eine grundlegende Lücke liegt bei vielen publizierten Ergebnissen in der Betrachtung des Strahlungsweges oder der Interpretation der Messergebnisse. So wird teilweise das lokal stark unterschiedliche Streuverhalten von Schmutzpartikeln vernachlässigt und durch Korrelation aus Farbeauswertung und Graustufen mit Reflektometern auf Verschmutzungswerte geschlossen, ohne Einfallswinkel und Akzeptanzwinkel einzubeziehen.

Im Rahmen des EU-Projektes SFERA-III, in welchem auch das Fraunhofer ISE mitgearbeitet wurden Untersuchungen zu Reflektometern durchgeführt. Erkenntnisse aus AVUSpro flossen auch dort mit ein. Im internationalen Konsortium wurde auch gemeinsam an den Richtlinien für die Bewertung von Messungen verschmutzter Solarspiegel gearbeitet, wie auch in Kapitel 1.5 erläutert. Hierbei wurden auch relevante Ergebnisse dritter erarbeitet.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

In folgende Veröffentlichungen sind die Inhalte des AVUSpro-Projektes eingeflossen oder haben dazu beigetragen:

Veröffentlichung einer Dissertation deren Inhalte in AVUSpro eingeflossen sind:

- A. Heimsath, Optical efficiency of concentrating solar collectors - Investigation of loss mechanism of solar reflectors, Dissertation, Fraunhofer IRB-Verlag, 2023.

Konferenzvortrag:

- G. Bern et. al. "AVUS - Automatic Soiling Rate Measurement Supporting O&M and Performance Prediction of Concentrating Solar Thermal Power Plants | Analysis of Soiling Events", 30.09.2022, SolarPACES 2022, Albuquerque

Workshop

- Ein Vortrag zu AVUSpro und dem Einfluss von Verschmutzung auf Ertragsergebnisse wurde im Rahmen eines durch den chilenischen CSP-Industrieverband organisierten Workshops vor 150-200 Interessierten gehalten

Guidelines

- F. Wolfertstetter, F. Sutter, E. Lüpfer, M. Montecchi, C. Pelayo, C. Heras, G. Bern, M. Bitterling, A. Heimsath, A. Fernández-García, J. Wette, C.-A. Asselineau, and G. Zhu, Recommendations for reflectance measurements on soiled solar mirrors (2022).
- Version 2 der Guideline ist in Vorbereitung

Presse:

- [Pressemitteilung](#): „AVUSpro: Sensor misst Verschmutzungsrate von Solarkraftwerken autonom“ C. Hanisch, G. Bern, Fraunhofer ISE mit Unterstützung des Konsortiums, 26.07.2022
→ Mehr als 10 Online-Portale griffen die Pressemitteilung auf

- [Interview](#) mit G. Bern im Deutschlandfunk: F. Grotelüschen „Saubere Solarspiegel: Sensortechnik optimiert Reinigungsintervalle „16. August 2022, Deutschlandfunk
- [Interview](#) mit G. Bern durch die Zeitschrift Physik: M. Vogel „Überwachte Verschmutzung | Ein autonom arbeitendes Reflektometer misst die Verschmutzung solarthermischer Kraftwerke.“ August 2022, Physik Journal
- [Projekt-Webseite](#): Die Projektwebseite wurde zu Beginn des Projektes durch Fraunhofer ISE erstellt und bereitgestellt: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/avuspro.html>

Geplante Veröffentlichung

- G. Bern et. al. "Impact of the acceptance angle on the prediction of soiling losses in CSP plants", in Vorbereitung, vorauss. in Solar Energy

Bachelor- und Masterarbeiten

- M. Mattenheimer "Optimierung des optoelektronischen Aufbaus eines mobilen Reflektometers für Solarkraftwerke", Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

3. Referenzen

1. L. Yanez and I. B. Salbidegoitia in *Proc. SolarPACES 2010* .
2. Devices and Services Company, *Devices and Services Portable Reflectometer Model 15R-RGB*, <<http://www.devicesandservices.com/prod04.htm>>.
3. F. Wolfertstetter, K. Pottler, N. Geuder, R. Affolter, A. A. Merrouni, A. Mezrhab, and R. Pitz-Paal, *Energy Procedia* **49**, 2422 (2014).
4. A. Fernández-García, L. Álvarez-Rodrigo, L. Martínez-Arcos, R. Aguiar, and J. M. Márquez-Payés, *Energy Procedia* **49**, 80 (2014).
5. G. Cohen, D. Kearney, and G. Kolb, *Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for Concentrating Solar Power plants* (1999).
6. A. Heimsath, M. Heck, G. Morin, W. Kiewitt, and W. J. Platzer, "Soiling of Aluminum and Glass Mirrors Under Different Climatic Conditions and Techno-economic Optimization of Cleaning Intervals," in (2010).
7. S. Rohani, *Reducing the water footprint of concentrating solar power plants. Techno-economic assessment of water saving solutions*, Doctoral Thesis, University of Freiburg, 2021.