

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Aquila Clean Energy GmbH Valentinskamp 70, 20355 Hamburg	Förderkennzeichen: 03EE1107H
Projekttitle: Verbundvorhaben: PVOptDigital - Erschließung von 5% Ertragspotential in PV-Kraftwerken über optimierte Betriebsführung durch Automatisierung und Digitalisierung sowie optische Inspektionsverfahren; Teilvorhaben: Erstellung einer Wartungsstrategie basierend auf einer Entscheidungsmatrix.	
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2021 bis 31.05.2024 verlängert auf 30.11.2025
Berichtszeitraum:	01.06.2021 bis 31.01.2025
Autor des Berichts	Sebastian Krull Head of Portfolio Management Aquila Clean Energy GmbH
Interims-Projektkoordinator	Veith Pietsch Technical Asset Management EMEA Aquila Capital Investmentgesellschaft mbH

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie* unter dem Förderkennzeichen 03EE1107H gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Kurze Darstellung zu Ansatzpunkten, Zielen und Durchführung des Projekts.....	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
2	Eingehende Darstellung	6
2.1	Zusammenstellung wichtiger Projektergebnisse	6
2.1.1	AP 1 Erfassung von Betriebsdaten, Systematisierung von Ursachen für Ertragsminderung	6
2.1.2	AP 1.1: Daten und Analysen zu Bestandsanlagen	6
2.1.3	AP 6.3 Datenaufbereitung, Key Metrics und Schnittstellen für die Betriebsführung	6
2.1.4	AP 7.2. Digitale Handlungsanweisungen	7
2.2	Zum zahlenmäßigen Nachweis.....	7
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	7
2.4	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	7
2.5	Fortschritte bei anderen Stellen.....	8
2.6	Veröffentlichungen	8

1 Kurze Darstellung zu Ansatzpunkten, Zielen und Durchführung des Projekts

1.1 Aufgabenstellung

Beim Betrieb von PV-Kraftwerken müssen drei wesentliche Aspekte erfüllt werden, damit diese ihren Beitrag zur Energiewende in Deutschland und weltweit leisten können: die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Betriebs, die Maximierung des Energieertrags und die Minimierung der Betriebskosten. Das Potenzial eines erhöhten Energieertrags durch eine optimierte und effizientere Betriebsführung sowie eine qualitative Erhöhung der Überwachungstiefe im automatisierten Monitoring liegt laut Einschätzung von Betreibern bei mindestens 5% des Gesamtertrags. Die Erschließung dieses Ertragspotentials der PV-Anlagen kann somit einen signifikanten Beitrag zur Energiewende leisten. Ein limitierender Faktor für eine Gewinnoptimierung ist derzeit die mangelhafte Verfügbarkeit von Informationen zum PV-System bis auf Modulebene, die nötig sind, um konkrete Handlungsanweisungen abzuleiten.

Das Projekt „PV Opt Digital“ adressiert zentrale O&M-Szenarien zur Optimierung von Performance und Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen durch kontinuierliche Qualitätssicherung, Fehlererkennung und Maßnahmenaktivierung, um ein zusätzliches Ertragspotential von bis zu 5% zu erschließen. Dafür wurden im Gesamt-Projekt folgende Aufgaben spezifiziert:

1. Automatisierung der Betriebsdatenerfassung, Analyse und Klassifikation nach Schadenspotentialen sowie Abweichungsanalyse für Ertragsverluste durch Nutzung neuronaler Netzwerke.
2. Verbesserung der optischen und elektro-optischen Inspektionsverfahren wie Nahfeld- und Rückstrom-IR-Bildgebung, Elektrolumineszenz (EL), Hyperspektrale Bildgebung und Kameras.
3. Optimierte Datenerfassung durch stationäre Kameras und Drohnen.
4. Entwicklung plattformübergreifender Digitalisierungs- und Automatisierungsansätze zur Ableitung von Maßnahmen zur Ertragsoptimierung basierend auf fortlaufenden Überwachungsdaten.

Das Teilprojekt der Aquila Clean Energy GmbH deckte dabei Aufgaben „Daten und Analysen von Bestandsanlagen“ sowie „Digitale Handlungsanweisungen“ ab.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Konsortium setzt sich aus fünf Industriepartnern, zwei Instituten und einen assoziierten Partner zusammen. Die durch ihre spezifischen Geschäftsfelder im Bereich der Sensorik (CSP-S, AePVI, Papendorf), PV-Betriebsführung (DISUN, Aquila) und der F&E zu PV-Anwendungen (F-CSP, DLR) bestehenden Kompetenzen der Projektpartner gewährleisteten, dass mit einem übergreifenden Optimierungsansatz alle Projektinhalte erfasst wurden. Die Projektziele des Projektes „PV Opt Digital“ zielten darauf ab, ein Ertragspotential von 5% in Photovoltaikanlagen (PV-Kraftwerken) durch optimierte Betriebsführung zu erschließen. Um dieses Vorhaben erfolgreich durchzuführen, mussten weitere Voraussetzungen gegeben sein. Dazu gehört die Verfügbarkeit organisatorischer und technologischer Infrastruktur, welche den sicheren Zugang zu modernen PV-Anlagen mit geeigneten Sensoren und Monitoring-Systemen ermöglicht. So gewährte die DiSUN Deutsche Solarservice den Zugang zu ihren Fernmonitoringsystemen. Damit konnte die Erfassung und Analyse von Betriebsdaten, einschließlich elektrischer Messdaten (Strom, Spannung) und meteorologischer Daten (Globalstrahlung) durch das F-CSP realisiert werden. Zudem war der direkte Zugang zu Solarparks z.B. in Bitterfeld oder dem Testfeld der DLR möglich, um verbesserte Inspektionsverfahren im Freifeld zu testen.

Die Bereitstellung innovativer Technologien wie hyperspektrale Bildgebung, Nahfeld-IR-Bildgebung, Kamera- und Elektrolumineszenz-Messungen erfolgte durch die Projektpartner AePVI, CSP-S, F-CSP und DLR.

Die Zusammenführung der vielfältigen und komplexen Daten wurde durch das interdisziplinäre Konsortium sowie die hohe Kompetenz der einzelnen Projektpartner realisiert. Dabei waren die Erfahrungen der Partner in der Entwicklung, Implementierung und Analyse von Monitoring- und Inspektionssystemen sowie in der Anwendung von digitalen Technologien zielführend.

Kurzfristige interne Personalwechsel führten Q3 2024 bei Aquila Clean Energy GmbH zu zwischenzeitiger Diskontinuität der bisherigen Arbeiten und Mehraufwand da keine interne Übergabe stattgefunden hat.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens erfolgte durch Bearbeitung der in Tabelle 1 dargestellten Arbeitspakete. Gleichzeitig stellt das Gantt Diagramm die Dauer der einzelnen AP's inkl. der geplanten PM's dar

Tabelle 1. Gantt-Diagramm des Gesamtprojektes

AP	Bezeichnung	Verantw AP	2021		2022				2023				2024				2025	Summe
			Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	
0	Projektkoordination	F-CSP	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	216,7	
1	Erfassung von Betriebsdaten, Systematisierung von Ursachen für Ertragsminderung	Aquila															11,1	
1.1	Daten und Analysen zu Bestandsanlagen (Aquila)		1,5	1,3	0,7												3,5	
1.2	Monitoring und Abweichungsanalyse (DISUN)		1,3	1,8	1,1												4,2	
1.3	Spezifische Fehlermodi (F-CSP)		0,8	1,5	1,3												3,5	
2	Automatisierung optische Bilderfassung	CSP-S															22,1	
2.1	Optimierung Drohenflug (CSP-S)		1,0	1,0	1,0	0,9	0,7										4,4	
2.2	Automatisierte Bilderfassung (AePVI)		2,5	3,1	2,9	2,3	2,3										12,9	
2.3	Stationäre optische Kamerasysteme (DISUN)		1,3	1,1	0,9	1,0	0,7										4,9	
3	Verbesserung optischer Inspektionsmethoden	DLR															29,1	
3.1	Verschmutzungsmessung (DLR)			3,1	2,1	1,9	1,0	0,7	1,2	1,1							11,0	
3.2	Thermographie mit Multiplexer-Bestromungssystem (AePVI)			1,0	1,6	1,6	1,6	1,1	2,0	2,0							10,9	
3.3	Validierung der neuen Methoden (CSP-S)					0,2	0,2	0,9	0,9	0,9	0,5	1,8	1,8				7,2	
4	Neue Messverfahren und Systemlösungen	F-CSP															56,1	
4.1	Modultechnologie-spezifische Leistungssensoren (Papendorf)		3,0	5,4	4,7	1,4	3,4	1,2	1,6	2,3	1,3	1,8	2,0	1,0	1,0	1,0	31,1	
4.2	Hyper- bzw. multispektrale Bildgebung zur erweiterten Fehlerklassifizierung (F-CSP)			1,4	2,4	0,4	0,1	2,4	2,4	2,8	1,8	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	18,3	
4.3	Neuartige Tracking-Routinen zur Ertragsmaximierung und Verschmutzungsminimierung (F-CSP)		0,5	0,1	0,1	0,6	0,1	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	6,7	
5	Automatisierung der Fehlererkennung und Impact-Quantifizierung	AePVI															27,4	
5.1	Automatisierte Fehlererkennung in Bilddaten (AePVI)				0,4	0,4	0,6	1,6	1,9	1,9	2,8	2,8	2,6				15,0	
5.2	Impact-Analyse durch Korrelation von Inspektions- und				0,5	0,9	0,7	0,7	1,7	1,9	1,7	1,7	1,7	1,0			12,4	
6	Digitalisierung der Abläufe und Schnittstellen	Papendorf															35,9	
6.1	Systematisierung Datenquellen und -arten für PV Parks		1,8	2,9	3,9	1,7	1,4	1,4	1,3	0,7	0,5	0,9	0,7	0,2			17,1	
6.2	Spezifizierung Schnittstellen und Datenaufbereitung			1,3	0,7	0,5	0,4	0,7	0,5	1,1	0,9	0,9	1,7	0,2			8,7	
6.3	Datenaufbereitung, Key Metrics und Schnittstellen für die			1,1	0,7	0,6	0,4	0,4	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4				5,3	
6.4	Vorbereitung Standardisierungsaktivitäten (F-CSP, DLR)			0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	1,0	1,0	1,0		4,8	
7	Maßnahmen und Geschäftsmodelle	DISUN															31,7	
7.1	Maßnahmenkatalog zu Fehlerfällen (DISUN)						2,1	1,6	1,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6		8,2	
7.2	Digitale Handlungsanweisungen (Aquila)						2,5	2,5	2,0	2,8	2,9	1,3	1,3	1,3	1,3		17,7	
7.3	Optimierter Messplan (CSP-S)						1,2	0,7	0,7	1,0	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4		5,8	
	Summe		12,1	22,6	25,1	17,1	14,3	17,5	19,9	19,9	15,6	16,1	14,6	9,7	6,3	5,9	217,0	

Im Projekt hatte das Aquila Clean Energy GmbH die in Tabelle 2 aufgelisteten Meilensteine zu erreichen.

Tabelle 2. Meilensteinplanung des bearbeiteten Teilprojekts

Arbeitspaket		Ziel Datum	Beschreibung
AP 1	Erfassung von Betriebsdaten, Systematisierung von Ursachen für	Q1 2022	Bereitstellung von realen Performance-Daten aus PV-Parks und Abgleich mit Soll-Werten; Systematisierung der Bedarfe an optischer Inspektion durch Aufstellung von zu erkennenden Defekten und Ursachen für Minderertrag.

	Ertragsminderung		
AP 1.1	Daten und Analysen zu Bestandsanlagen	Q1 2022	Ziel: Sammlung von Observablen in einem Datensatz mit Feld-Daten mit Klassifikation nach Schadenspotentialen und Beobachtbarkeit/Zugänglichkeit.
AP 7.2	Digitale Handlungsanweisungen	Q2 2024	Entwicklung eines Analyse Tools, dass Handlungsanweisungen basierend auf den Messdaten ableitet sowie Prozess-Implementierung für die automatische Unterstützung der Fehlerfrüherkennung.

Die Meilensteine wurden teilweise erreicht, siehe hierzu Kapitel 2.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Bau befindliche PV-Projekte, sowie Zusammenarbeit mit Betriebsführern.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Aktivitäten in den Arbeitspaketen waren hinsichtlich Informations- und Probenaustausch zwischen den Partnern eng verknüpft wie in der eingehenden Darstellung des Vorhabens beschrieben. Erzielte Teilergebnisse wurden regelmäßig in Arbeits- und Projekttreffen diskutiert. Darüber hinaus fanden halbjährlich Treffen aller Projektpartner (insgesamt 7 Treffen) statt, in denen die aktuellen Ergebnisse präsentiert und diskutiert sowie weitere Arbeiten geplant wurden. Aquila war außerdem im Austausch mit den Betriebsführern von entsprechenden PV-Parks, um die Branchenkenntnisse zu vertiefen und zielgerichtete praxisnahe Ergebnisse zu erarbeiten sowie um potenzielle Ortsbegehungen (site visits) im Rahmen des Forschungsprojektes vorzubereiten.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Zusammenstellung wichtiger Projektergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete dargestellt.

2.1.1 AP 1 Erfassung von Betriebsdaten, Systematisierung von Ursachen für Ertragsminderung

Ziel	Ergebnis
Bereitstellung von realen Performance-Daten aus PV-Parks und Abgleich mit Soll-Werten; Systematisierung der Bedarfe an optischer Inspektion durch Aufstellung von zu erkennenden Defekten und Ursachen für Minderertrag.	Daten (Bauunterlagen und Technische Datenblätter) von Park Tinoso (50MWp PV Südspa-nien) wurden 2022 zur Verfügung gestellt. Der Park konnte leider nicht begangen werden da er sich im Bau befand und der Generalunternehmer dies untersagte, um die Leistungsfähigkeit der Module nicht weiter als im Bauvertrag vereinbart, offen legen zu müssen.

2.1.2 AP 1.1: Daten und Analysen zu Bestandsanlagen

Ziel	Ergebnis
Sammlung von Observablen in einem Datensatz mit Feld-Daten mit Klassifikation nach Schadenspotentialen und Beobachtbarkeit/Zugänglichkeit. Vorgehen: initiale Bestandsaufnahme in PV-Anlagen; Auswahl von PV-Anlagen mit vermuteten Problemen (v.a. „verborgenen“ Schadensfällen); Zusammenstellung bisheriger Analysen, Fehlermodi, Auswirkungen und Kosten; Klassifizierung nach Schadenspotentialen und resultierenden Kosten jeweils mit Zeithorizonten; Auflistung von Ansätzen zur frühzeitigen Erkennung nach Fehlertypen. Ergebnis: Einteilung und Kategorisierung der einzelnen Fehler	Siehe 2.1.1. Weiterhin wurden mit Forschungspartner die Technischen Anforderungen eines geeigneten PV-Parks zur weiteren Untersuchung abgestimmt. Aquila unterstütze dies mit dem Wissen von spanischen PV-Projekten. Analysen des PV-Parks bezüglich erster Fehlerkategorisierung sowie deren Betrachtung wurden geteilt. Ein Aquila externer PV-Park in Bitterfeld wurde schlussendlich für die Tests herangezogen.

2.1.3 AP 6.3 Datenaufbereitung, Key Metrics und Schnittstellen für die Betriebsführung

Ziel	Ergebnis
Entwicklung und Definition von Schnittstellen zur Betriebsführung; Spezifizierung der Relevanz von Messwerten bzw. Messwertkorrelationen sowie KeyMetrics zur Integration von Messwerten und optischen Inspektionsdaten in Betriebsführungs-Workflows; Konzeptentwicklung für Digitalisierung von Betriebsführungsprozessen unter Berücksichtigung der Relevanz einzelner Daten und Entscheidungsparameter sowie daraus ableitbarer Entscheidungen in der Betriebsführung	Ein Austausch zwischen DiSUN, Aquila und Papendorf fanden statt. Das von Papendorf entwickelte „EZA Cockpit“ sowie „Redbus“ (standardisierendes Tool um PV Park Daten vergleichen zu können) konnte auf Grund der verspäteten zur Verfügungstellung nur grob abgesprochen, aber nicht implementiert werden. Aquila interne Annahmen bezüglich Technischer Verfügbarkeiten nach Kategorie wurden mit DLR besprochen, können aber aufgrund der Sensitivität nicht geteilt werden und dienen

	dem DLR als Referenzwerte insbesondere für „Soiling“ (Verschmutzung der PV-Module).
--	---

2.1.4 AP 7.2. Digitale Handlungsanweisungen

Ziel	Ergebnis
Entwicklung eines Analyse Tools, das Handlungsanweisungen basierend auf den Messdaten ableitet <i>sowie Prozess-Implementierung für die automatische Unterstützung der Fehlerfrüherkennung.</i>	Die Messungen waren erfolgreich bei anderen Forschungsteilnehmern, jedoch wurde dieses Arbeitspaket nicht umschließend abgeschlossen. Wir arbeiten mit den Handlungsanweisungen aktuell noch mit den Betriebsführern zusammen und die Inspektionen auf modulebene sind nur teilweise etabliert, und erfolgen aktuell durch spezifische Jährliche Inspektionen mittels Wärmebildkamera oder Infrarot und sind rein manuell. Weiterhin werden Messungen kurz vor Ende der Garantiezeiten auf gleiche Weise durchgeführt. Ein Prozess zur automatischen Unterstützung wurde nicht erarbeitet.

2.2 Zum zahlenmäßigen Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgte separat und wurde eingereicht. Lediglich ca. 20% des ursprünglich geplanten Budgets wurden abgerufen, da nicht alle geplanten Aktivitäten umgesetzt werden konnten.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

PVOptDigital adressiert ein bedeutendes ergonomisches Problem, welches die Produktion, Erträge durch optimierte Betriebsführung verbessert. Weiterhin sind genauere Aussagen zu Leistungsfähigkeit sowie deren Langzeitverhalten besser nachweisbar. Dies ermöglicht weitere Forschungsfragen zu beantworten sowie optimaler auf den Langzeitbetrieb von PV Parks einzugehen und zu planen. Die Forschungsergebnisse wurden nicht in vollem Umfang erreicht, sind aber bezüglich der eingereichten Kosten (20%) als Erfolg zu werten.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Forschungsarbeiten haben viele Impulse gesetzt, welche von Aquila und den Betriebsführern weiterverfolgt werden. Die aktuellen Marktumgebungen mit großer Kannibalisierung von Projekten erfordert optimierte Instandhaltungsstrategien, zu welchen dieses Projekt beigetragen hat.

2.5 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Die Implementierung der neuen Technologien und Strategien zur Optimierung der Betriebsführung und zur Ertragssteigerung könnte die langfristigen Erträge der PV-Anlagen erhöhen. Die optimierte Betriebsführung und die verbesserte Überwachungstiefe durch automatisierte und digitalisierte Prozesse könnten eine Ertragssteigerung von bis zu 5% des Gesamtertrags ermöglichen. Diese zusätzlichen Erträge werden zur Rentabilität der PV-Anlagen beitragen und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Portfolios verbessern.

Die optimierte Betriebsführung könnte zu einer Reduzierung der Betriebskosten führen, da potenzielle Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden können. Die Ergebnisse des Projekts könnten

Aquila Capital einen Wettbewerbsvorteil auf dem Markt für PV-Anlagen verschaffen. Die verbesserten Ertragsprognosen und die optimierte Betriebsführung könnten die PV-Anlagen von Aquila Capital attraktiver für Investoren und Kunden machen. Dies könnte neue Marktchancen eröffnen und die Position von Aquila Capital als führender Anbieter im Bereich der erneuerbaren Energien stärken.

Trotz der positiven wirtschaftlichen Aussichten ist es wichtig, potenzielle Risiken zu identifizieren und Strategien zur Risikominderung zu entwickeln. Technische Risiken, Marktunsicherheiten und regulatorische Änderungen könnten den wirtschaftlichen Erfolg nach Projektende beeinflussen. Durch kontinuierliche Überwachung und Anpassung der Betriebsstrategien könnte Aquila Capital diesen Risiken effektiv begegnen.

Zeitplanung für die nächsten zwei Jahre

Jahr 1: Implementierung der neuen Technologien und Strategien zur Optimierung der Betriebsführung und Überwachungstiefe.

Jahr 2: Überwachung und Analyse der Ertragssteigerungen sowie Anpassung der Betriebsstrategien basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen.

2.6 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Die technischen Erfolgsaussichten hängen von den Datenanbindungen und Standardisierungen ab. Im Rahmen dieses Projektes wurden hierfür erste Meilensteine erreicht. Logische nächste Schritte sind zusätzliche Datenanbindung der PV-Parks und zentrale Auswertungen. Der Zeithorizont ist in Kapitel 2.5 zu erkennen.

2.7 Fortschritte bei anderen Stellen

Die Teilnahme an diesem Forschungsprojekt hat viele Vorteile, auch wenn die geplanten Forschungsergebnisse nicht vollumfänglich erreicht wurden. Wir haben durch das Projekt wertvolle Erfahrungen und Kenntnisse gesammelt und viele Teilergebnisse erarbeitet. Zudem haben wir die Gelegenheit genutzt, andere Forschungspartner kennenzulernen und ein wertvolles berufliches Netzwerk aufzubauen sowie interdisziplinär zu arbeiten. Die gesammelten Erkenntnisse konnten den Forschungspartnern helfen neue Forschungsfragen zu entwickeln.

2.8 Veröffentlichungen

Aus dem Vorhaben sind in unserem Hause keine Publikationen hervorgegangen.

Die Richtigkeit und Vollständigkeit aller Angaben wird hiermit bestätigt.

Ort, Datum:

Hamburg, 20 Juni 2025

Rechtsverbindliche Unterschrift:

Sebastian Krull
Head of Portfolio Management
Aquila Clean Energy GmbH