

QINUM GmbH

**Erforschung der Machbarkeit eines modularen PV-
Paneelsystems zur automatischen Fließmontage von PV-
Kraftwerken im Gleis (RoboPV)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter
dem Az: 38077/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Achim Fricker

Dr. Tobias Franken

Paul Schneider, M. Sc.

Projektpartner und assoziierte Projektpartner



Aachen, 28.09.2023

Inhaltsverzeichnis:

1	Zusammenfassung.....	1
2	Einleitung	2
3	Hauptteil.....	4
4	Fazit	16

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Schema der Umfeldanalyse für die Machbarkeitsanalyse RoboPV	5
Abbildung 2: Verschiedene Risikograde für die Bewertung der Machbarkeit	5
Abbildung 3: Teilsysteme und Gesamtsystem des gleisintegrierten PV-Kraftwerks.....	7
Abbildung 4: Auszug aus der morphologischen Gestaltmustersynthese	9
Abbildung 5: Verschaltungsplan des Funktionspaneel Stromausleitung	11
Abbildung 6: Demonstrator des Paneelbandes.....	12
Abbildung 7: Demonstrator zur Stromausleitung.....	12
Abbildung 8: Tests im Reallabor. A: statische Belastung, B: dynamische Belastung, C: Überfahrt mit Rangierlock, D: Reflexion.....	14

Abkürzungen

BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
DAK	Digitale Automatische Kupplung, neuartiges Kupplungssystem für Güterwägen
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ifs	Lehrstuhl und Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme an der RWTH Aachen University
LS	Leistungsschutzschalter
MC	Mikrocontroller
PV	Photovoltaik
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System - Öffentliches Werkzeug der EU-Kommission zur Leistungsberechnung von PV-Anlagen in Abhängigkeit ihrer geographischen Lage
PVSol	Kommerzielle Software zur Verschattungssimulation von PV-Anlagen
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Wp	Watt peak (Einheit für die Spitzenleistung eines PV-Moduls bei optimaler Einstrahlung)

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens RoboPV wurde die Machbarkeit eines modularen PV-Kraftwerksystems analysiert, welches durch eine montagerechte Ausgestaltung fahrweg-integriert in einem Gleis unter Verwendung eines schienengebundenen Fließmontagesystems automatisiert verlegt und wieder entnommen werden kann.

Das Hauptaugenmerk dieses Forschungsprojektes lag auf der Machbarkeitsanalyse und der Demonstration des modularen PV-Kraftwerkes.

Ausgehend von einer eingehenden Analyse der Anforderungen, Randbedingungen und Risiken wurden technische Lösungsansätze entwickelt und Erkenntnisse zu deren Machbarkeit mittels Demonstratoren im Real-Labor gewonnen und validiert.

Als Fazit der Anforderungs- und Risikoanalyse kann festgehalten werden, dass ein Großteil der analysierten Lastfälle bereits typisch für PV-Anlagen sind und weitere Lastfälle mit einfachen Maßnahmen beherrschbar sind, da sie durch die Ausgestaltung des Systems erfüllt werden können. Für die sehr anwendungsfall-spezifischen Lastfälle, die mit einem hohen Risiko bewertet wurden, stehen der Projektentwicklung verschiedene als machbar einzuschätzende Maßnahmenoptionen zur Gefahrenabwendung zur Verfügung.

Aus Sicht des Projektkonsortiums bestehend aus der QINUM GmbH und des Instituts für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen wurden in der von der DBU geförderten Analyse keine Anforderungen ermittelt, die regulatorisch, technisch oder betriebswirtschaftlich als nicht lösbar erscheinen und damit den Ansatz prinzipiell in Frage stellen oder seine Attraktivität maßgeblich vermindern.

Die anschließende Entwicklung des technischen Demonstrators und die Durchführung der Tests im Reallabor haben gezeigt, dass der Ansatz, ein PV-Kraftwerk integriert in einem Gleis zu betreiben, grundsätzlich machbar erscheint und funktioniert.

2 Einleitung

Klimawandel, CO₂-Neutralität, umweltfreundliche Mobilität, steigender Strombedarfsanteil und die klimabewusste Flächennutzung sind besondere Herausforderungen unserer Zeit. Mit der Energiewende muss die Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen stark ausgebaut werden, was wiederum auch eine Beanspruchung von Umwelt und Ressourcen bedeutet, weswegen diese Verfahren entsprechenden Restriktionen unterliegen.

Aus Sicht der Erzeugung sind für die Nutzung der Photovoltaik (PV) erhebliche Flächen erforderlich, um den Bedarf zu decken. Natur- und landwirtschaftliche Flächen tragen jedoch in den Flächennutzungsplänen ebenfalls einen wichtigen Umweltbeitrag und können nicht beliebig überbaut werden. So liegt eine Chance darin, im weiteren Ausbau solche Flächen bestmöglich zu nutzen, die ohnehin schon anderen Zwecken zugeführt sind oder waren, wie z. B. Verkehrswegeflächen.

Beim Ausbau regenerativ erzeugter Energie sind bevorzugt dezentrale Versorgungskonzepte mit einer hohen Integration in die Bestandsinfrastrukturen dicht besiedelter Räume anzustreben. Vor diesem Hintergrund bieten gerade verkehrswegeintegrierte Photovoltaiksysteme (PV) – hier besonders in Bahngleisen verlegt – einen vielversprechenden Ansatz, da sie Flächen des Fahrwegs ohne relevanten baulichen Zusatzaufwand mitbenutzen und niederschwellig dezentral Energie zu niedrigen Stromtransportkosten direkt in das Bahnstromnetz oder die anliegende Infrastruktur einspeisen können. Durch das Prinzip der Doppelnutzung können gleisgebundene PV-Anlagen andere landschaftlich höherwertige Flächen als PV-Standorte entlasten. Gemäß Eisenbahnbundesamt (EBA) erfordern die Bestrebungen, die Beförderungs- und Transportleistung als auch die Schieneninfrastruktur selbst klimaneutral zu erbringen bzw. zu betreiben, einen stetigen Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien. Hier würde die Direkteinspeisung in das Bahnstromnetz eine Verwertungsoption sein und den aktuellen Elektrifizierungsgrad von ca. 61 % weiter klimaneutral steigern. Hinsichtlich der CO₂-Emissionen sollen diese gemäß Klimaschutzprogramm alleine im Verkehrssektor bis zum Jahr 2030 um ca. 42 % gesenkt werden. Die anteiligen Treibhausgasemissionen durch den Verkehr lagen in 2019 nach Schätzung des BMU bei ca. 20,3 % in Deutschland.

Durch die Entwicklung eines seriellen Herstellungsverfahrens für gleisintegrierte PV-Kraftwerke, wie in diesem Projekt angestrebt, kann gegenüber Einzelprojekten die CO₂-Bilanz je PV-Kraftwerk zusätzlich durch das optimierte Verhältnis von Modulfläche zu Installationstechnik reduziert werden. Ferner ist zu erwarten, dass die Lösung auch dabei unterstützt, den chemischen Eintrag bei der Vegetationskontrolle auf Bahngleisen durch Verschattung des Schotterbettes zu vermindern. Offenkundig besteht ein hoher Bedarf nach zeitnah realisierbaren Lösungen zur Herstellung von Kraftwerken für erneuerbare Energien im industriellen

Maßstab. Wind- und Solarkraftwerke entstehen bei zunehmend restriktiven Genehmigungsverfahren durch Baustellenfertigung. Hier wäre eine technische Innovation in Form eines energieeffizienten Produktionsverfahrens zur automatisierten seriellen Herstellung ein zielführender Lösungsansatz, besonders, wenn Flächen genutzt werden könnten, die bereits einer technischen Nutzung zugewiesen sind. Das deutsche Schienennetz weist eine Streckenlänge von ca. 38.000 km (EU ca. 230.500 km) aus, die Gleislänge im deutschen Netz beträgt dabei etwa 60.803 km (Stand 2018). Es liegt daher nahe PV-Kraftwerke im Gleis als einen potenziellen Lösungsansatz zu erschließen.

Eine weitere Herausforderung bei der Nutzung von PV-Energie liegt in einem hohen Anteil der Aufbau- und Montagekosten (200-400 €/kWp). Die Verbauung auf Dächern oder in Freiflächenanlagen erfordert neben den Flächen einen lageindividuellen und manuellen Aufbau von Haltegerüsten und die manuelle Verdrahtung der Solarpanelen. Diese Prozessphase im Aufbau eines PV-Kraftwerkes besitzt einen sehr niedrigen Automatisierungsgrad. Skaleneffekte können nur begrenzt genutzt werden, was wiederum bei gleisintegrierter PV nicht der Fall sein muss, da aufgrund der Gleisbindung ein automatisiertes Verlegeverfahren möglich ist.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Vorhabens RoboPV die Machbarkeit eines modularen PV-Kraftwerksystems analysiert, welches durch eine montagerechte Ausgestaltung fahrwegintegriert in einem Gleis unter Verwendung eines schienengebundenen Fließmontagesystems automatisiert verlegt und wieder entnommen werden kann. In nachfolgenden Untersuchungen soll dann dazu ein geeignetes Herstellungsverfahren ausgearbeitet werden.

Ausgehend von einer eingehenden Analyse der Anforderungen, Randbedingungen und Risiken wurden technische Lösungsansätze entwickelt und Erkenntnisse zu deren Machbarkeit mittels Demonstratoren im Real-Labor gewonnen und validiert.

3 Hauptteil

3.1 Darstellung der Arbeiten und erzielte Ergebnisse

AP 1: Projektmanagement und Qualitätssicherung

Das AP1 sorgte für einen koordinierten Projektablauf. Hierzu gehörte:

- Koordination der Projekttreffen im zweiwöchigen Turnus.
- Kommunikation mit dem Projektträger bei administrativen Fragen.
- Projektführung und Meilensteinplanung.
- Bereitstellung eines Projektserver (SharePoint) für alle Projektbeteiligte.
- Sicherstellung des Berichtswesens.
- Projektkommunikation wie die Teilnahme an der Messe *The Smarter E* in München.
- Projektbezogene Qualitätssicherung.

Mit Blick auf den Projektplan ist festzustellen, dass alle definierten Meilensteine in der Projektlaufzeit erreicht werden konnten.

AP 2: Analyse und Spezifikation der Anforderungen und Randbedingungen, Risikoanalyse

In AP2 wurden die Anforderungen und Randbedingungen analysiert. Ermittelte Lastanforderungen wurden soweit möglich spezifiziert bzw. quantifiziert. Zur Machbarkeit wurden Auswirkungen und Risiken kritisch bewertet. Die Anforderungen wurden aus den relevanten Kontextsystemen strukturiert abgeleitet.

Als Methode zur Ermittlung und Strukturierung von möglichen Einflussfaktoren und Anforderungen zur Machbarkeit eines PV-Kraftwerks im Gleis wurde eine Objektweltanalyse durchgeführt.

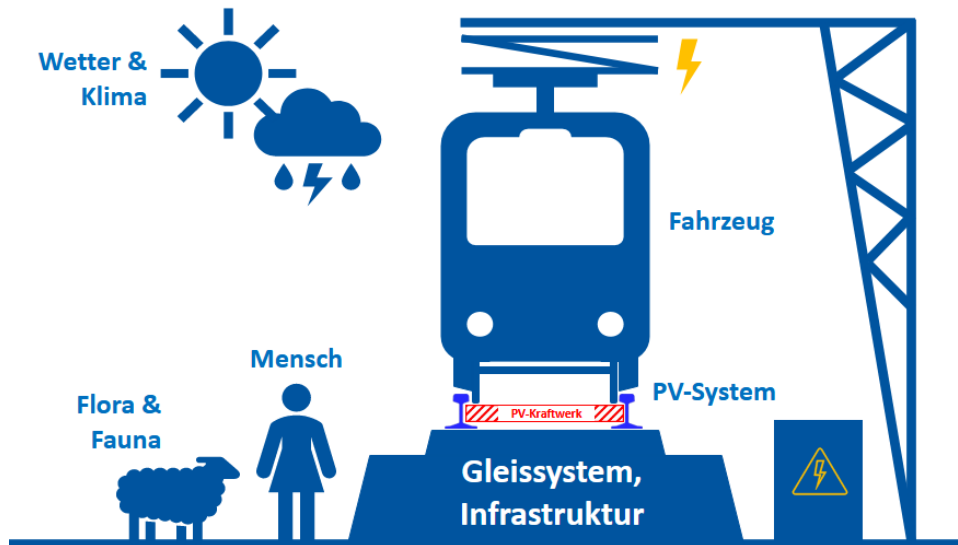


Abbildung 1: Schema der Umfeldanalyse für die Machbarkeitsanalyse RoboPV

Ergebnisse

Als Ergebnis konnten 78 Lastfälle identifiziert werden, von denen kein Lastfall ein KO-Kriterium darstellte. Ca. 1/3 der Lastfälle sind „anwendungstypisch“ (26) für PV-Anlagen und ca. 2/3 der Lastfälle sind als „neu“ (52) durch den speziellen Anwendungsfall zu bewerten.

Zur Risikobewertung wurde eine Risikomatrix erstellt, anhand derer die Risikograde der einzelnen Lastfälle eingestuft werden konnten (Abbildung 2). Dies erfolgte in Workshops.

Bewertung Machbarkeitsrisiko	
IV	sehr hohes Risiko: Anforderung, die die Machbarkeit in Frage stellt (KO-Kriterium)
III	hohes Risiko: Anforderung, die besonderer Prüfung bedarf
II	mittleres Risiko: Anforderung, die besonderer Prüfung bedarf
I	geringes Risiko: Anforderung, die zunächst keine weitere Betrachtung erfordert

Abbildung 2: Verschiedene Risikograde für die Bewertung der Machbarkeit

- Mit einem geringen Risiko (Risikograd I) wurden 65 Lastfälle bewertet.
- Mit einem mittleren Risiko (Risikograd II) wurden 15 Lastfälle bewertet.
- Mit einem hohen Risiko (Risikograd III) wurden 8 Lastfälle eingeordnet.

- Mit einem sehr hohen Risiko (Risikograd IV) wurde kein Lastfall eingeordnet und somit auch kein KO-Kriterium identifiziert.

AP 3 Entwicklung technisches Designkonzept und Konstruktionsmodelle

Unter Verwendung des Anforderungsprofils aus AP2 wurden in AP3 die Gestaltungsoptionen für die zentralen Funktionselemente des PV-Kraftwerksystems entworfen und detailliert. Im Vordergrund standen dabei die Baugruppen Paneel, Panelverbinder, Paneelbefestiger sowie die elektrische Verschaltung. Mit Hilfe von Kreativitätsmethoden wurden Entwürfe erstellt, diese als funktionale Komponenten in CAD-Konstruktionen modelliert und schließlich auf Eignung bewertet, Funktionen wurden teils auch durch kinetische Simulation validiert.

Methodischer Ansatz: Zur Entwicklung der technischen Lösung des gleiswegintegrierten PV-Kraftwerkes wurde zunächst seitens der Projektpartner die erforderliche Grundstruktur des Systems entworfen.

- **Prozessual integrierte Gestaltung von PV-Kraftwerk und Produktionsverfahren**

Der integrierte prozessuale Gestaltungsansatz folgt dem Leitbild ein PV-Kraftwerk zu entwickeln, das derart standardisiert ausgestaltet ist, dass es schließlich in Serie gefertigt, vormontiert, getestet, logistisch transportiert, bereitgestellt sowie am Einsatzort nach einem Fließfertigungsprinzip verlegt und befestigt werden kann. Speziell bei der logistischen Bereitstellung und Verlegung soll dabei die Schieneninfrastruktur als spurführende Hilfsvorrichtung einer Verlegevorrichtung dienen. Die technischen Komponenten des PV-Kraftwerks haben somit auch die nötigen Funktionselemente zu enthalten, welche die erforderlichen Fertigungs- und Handhabungsfunktionen eines Produktionsverfahrens befähigen, das dem Prinzip einer seriellen Herstellung folgt. Insofern stehen die Designfragen für das PV-Kraftwerk mit denen für das zugeordnete Produktionsverfahren in vorgegebener Beziehung.

- **Integration der Funktionsbaugruppen**

Bei dem Konstruktionsentwurf sind die funktionalen Teilsysteme bzw. Funktionsbaugruppen bestmöglich zu integrieren, wobei das Projekt RoboPV primär auf den Teil PV-Kraftwerk gerichtet ist, dessen wesentliche Teilsysteme sind:

Mechanisches System: Vorwiegend mechanische Gerüst-, Gelenk- und Fixierungskomponenten, in welche elektrische und elektronische Baugruppen (inkl. PV-Module) integriert werden.

Elektrisches und elektronisches System: Vorwiegend Komponenten wie PV-Module, Wechselrichter, Regelungselektronik, Monitoringelektronik sowie Verkabelung, die in die mechanische Konstruktion zu integrieren sind.

Auf dieser Basis wurden unter Berücksichtigung weiterer differenzierter Anforderungen das Gestaltkonzept abgeleitet und durch einzelne Konstruktionen ausgearbeitet.

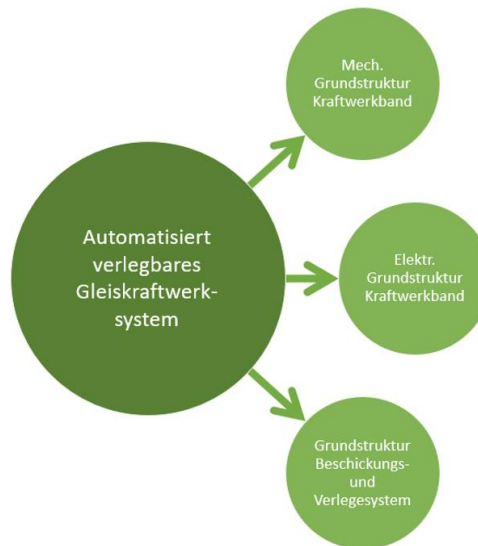


Abbildung 3: Teilsysteme und Gesamtsystem des gleisintegrierten PV-Kraftwerks.

Grundkonzeption des gleisintegrierten PV-Kraftwerksystems

Unter Beachtung der Anforderungen und Lastfälle wurden technische Designvarianten für die Auslegung der zentralen Baugruppen **Paneele**, **Paneelverbinder** und **Paneelbefestiger** abgeleitet und bewertet. Lösungsansätze wurden selektiert. Im Entwicklungsprozess wurde dazu auf verschiedene Kreativitätsmethoden zurückgegriffen wie Brainstorming, morphologische Funktionsvariation und analytical pen-Testing. Dabei wurde durchgehend berücksichtigt, dass Montagevorgänge besonders an den Verbindungssystemen mechanisierbar bzw. automatisierbar sind.

Im Fokus der Designaufgabe standen zunächst folgende Komponenten:

- **Paneel (PV-Paneel und Funktionspaneel)**
- **Paneelverbinder**
- **Paneelbefestiger**
- **Elektrische Basisarchitektur/Verschaltung**

Nachfolgend werden dazu die maßgebenden Designentscheidungen zusammengefasst. Mittels morphologischer Analyse wurden technische Funktionsprinzipien und Entwürfe abgeleitet. Erfolgskritische Gestaltungselemente wurden für weitergehende Untersuchungen identifiziert. Die Teile und Baugruppen wurden als CAD-Konstruktionen detailliert.

PV-Paneel und Funktionspaneele

Zentrales Konstruktionselement ist das tragende Gerüst bzw. der Unterbau zur Aufnahme der PV-Module. Gemäß Anforderungsanalyse sind verschiedenste Lastfälle bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Es wurden zwei Designvarianten erarbeitet, die unter diesen Anforderungen bewertet wurden.

Zu den Designvarianten wurden Entwürfe erarbeitet und in CAD-Konstruktionsmodellen visualisiert. Daraus wurden in AP4 Funktionsmuster und Demonstratoren angefertigt. In AP5 wurden diese auf der Teststrecke des ifs verschiedenen Tests unterzogen. Bei der Entwicklung wurden ferner verschiedene Lösungsvarianten erarbeitet und diskutiert. Als Ergebnis wird die Bauform mit Unterbaugerüst priorisiert.

Paneelverbinder

Ein zweites zentrales Konstruktionselement ist die Verbindungslösung, um die aneinander zu reihenden Paneele mechanisch und elektrisch zu koppeln. Zunächst wurden verschiedene Designvarianten entworfen und unter bahntechnischen Anforderungen bewertet. Einige Entwürfe beinhalteten komplexere mechanische Funktionselemente zur Ermöglichung reversibler Verbinder. Die Auswahl der Lösungsvariante wurde letztlich durch das Designprinzip bestimmt, dass mit Blick auf die Bauteilkosten die funktionale Bauteil- bzw. Baugruppenkomplexität am seriellen System möglichst niedrig zu halten ist. Es ist bei hohem Skalierungspotenzial kostengünstiger, die funktionale Komplexität auf Seite der Verlegevorrichtung vorzuhalten. Dies reduziert die Systemkosten je laufendem Meter.

Zu den Designvarianten wurden zunächst Entwürfe als CAD-Konstruktion erstellt. Daraus konnten in AP4 Demonstratoren angefertigt und damit im Verlauf von AP5 auf der Teststrecke des ifs verschiedene physische Machbarkeitstests durchgeführt werden.

Paneelbefestiger

Ein drittes zentrales Konstruktionselement sind die Befestiger. Diese übernehmen die Funktion, die Paneele bzw. das Paneelband im sogenannten Gleisgitter mechanisch zu fixieren.

Mittels morphologischer Variation wurden systematisch funktionale Lösungen für das Befestigerelement abgeleitet. So konnten Gestaltungsvarianten gefunden werden, die adäquat die mechanischen und kinematischen Anforderungen erfüllen (Abbildung 4).




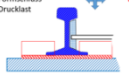


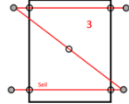




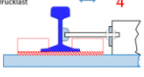
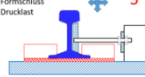
Aufgabe	Skizze	Prinziplösungen				
A: Vertikalbewegung Modul begrenzen						
B: In Vertikalrichtung fixieren					4 + Spannelement ?	5 ?
C: Längsbewegung Modul begrenzen		1 + Spannelement ?			4 + Spannelement ?	5 + Spannelement ?
D: In Längsrichtung fixieren		1 + Spannelement ?			4 + Spannelement ?	5 + Spannelement ?
E: Querbewegung Modul begrenzen						

Abbildung 4: Auszug aus der morphologischen Gestaltmustersynthese

Für drei priorisierte Designvarianten, die sich durch komplementäre Einsatzoptionen auszeichneten, wurden CAD-Konstruktionsmodelle erstellt. Entsprechend wurden in AP4 dazu Demonstratoren angefertigt und im Rahmen der Arbeiten zu AP5 auf der Teststrecke des ifs getestet (Abbildung 6).

Bei abschließender Betrachtung ist festzustellen, dass mehrere Lösungsvarianten zur Verfügung stehen. Welche davon zu priorisieren ist, kann im Zusammenspiel mit der Verlegevorrichtung zuverlässig getestet und bewertet werden. Vorteilhaft ist, dass mehrere robuste Ausführungslösungen entwickelt wurden und damit Flexibilität für Befestigungsmaßnahmen besteht.

Elektrische Basisarchitektur/Verschaltung

Hinsichtlich der Ausgestaltung des elektrischen Systems gibt es je nach Anwendungsszenario verschiedene Ansätze. Eine grundsätzliche Designfrage betrifft die Ausgestaltung der Architektur der Stromrichtertechnik. Grundsätzlich ist das PV-Kraftwerkssystem modular aufzubauen. Es sollen standardisierte String-Sets definiert werden, die ein optimales Verhältnis von Anzahl PV-Modulen zu Stromrichtertechnik aufweisen.

- Im Fall größerer Anlagen ist voraussichtlich der Einsatz größerer Wechselrichter in regelmäßigen Abständen entlang des Gleises sinnvoll. Durch die Wandlung des PV-

Gleichstroms in Wechselstrom wird eine unproblematischere Übertragung der Leistung über teils große Entfernungen ermöglicht. Die Kabeldicken und damit die Kosten des Systems bleiben dadurch geringer.

- Auf Gleisabschnitten mit geringen Variationen in der tageszeitabhängigen Verschattung über ihre Länge können längere Strings eingesetzt werden und somit sind weniger Wechselrichter erforderlich.
- Soll das System jedoch in einem Abschnitt implementiert werden, auf dem eine große Variation der Verschattung auftritt, müssen kürzere Strings und damit mehr Leistungselektronik verbaut werden.
- Im Falle längerer Strings ist aus Gründen der Zugänglichkeit und der Belastung der Elektronik die Platzierung der Wechselrichter neben dem Gleis sinnvoll.
- Für kürzere Strings kann aber auch eine Integration der in diesem Fall kompakten Leistungselektronik in das Paneelband als Funktionspaneel sinnvoll sein, da der Installationsaufwand sinkt.

In jedem Fall wird zunächst angestrebt das System für eine Netzfrequenz von 50 Hz zu entwickeln, vor allem aus Kosten- und Verfügbarkeitsgründen bzgl. der Leistungselektronik.

Entwurf einer Lösung zur Stromausleitung

Für die anderen oben beschriebenen Anwendungsfälle kann prinzipiell schon auf die Erfahrungen aus dem Aufbau von Freiflächenanlagen zurückgegriffen werden.

Für den Demonstrator zur Stromausleitung wurde der in Abbildung 5: dargestellte Systemaufbau gewählt. Darin zu sehen ist neben einem exemplarischen PV-Modul der Einphasen-Wechselrichter, der eigenständig 50 Hz Netzfrequenz erzeugen und somit vollständig unabhängig vom Stromnetz laufen kann. Mit den gewählten Komponenten konnte eine Schwarzstartfähigkeit des Systems (Start des Wechselrichters auch bei leerer Batterie) gewährleistet werden. Dadurch wird die Einsatzflexibilität im Feld prinzipiell erhöht, das System ist unabhängig von Netzzugang und Ladezustand der Batterie. Neben dem Wechselrichter ist der Ladegleichrichter der PV-Module erkennbar, der mit seinem MPPT-Regler deren Leistungsabgabe regelt und die Leistung an den Wechselrichter bzw. die Batterie abgibt. Die Richtung der produzierten Leistung steuert ein Mikrocontroller (MC), der über Datenleitungen mit allen elektronischen Bauteilen verbunden ist und auch mit einer Anzeige ausgestattet ist, die diesen Leistungsfluss permanent visualisiert. Der Mikrocontroller zeichnet zudem den Systemzustand mit allen Leistungsflüssen permanent auf. Die produzierte Leistung lässt sich über eine durch eine FI/LS-Schutzschaltereinheit geschützte Steckdose von haushaltsüblichen Verbrauchern bei 230 V/ 50 Hz abgreifen.

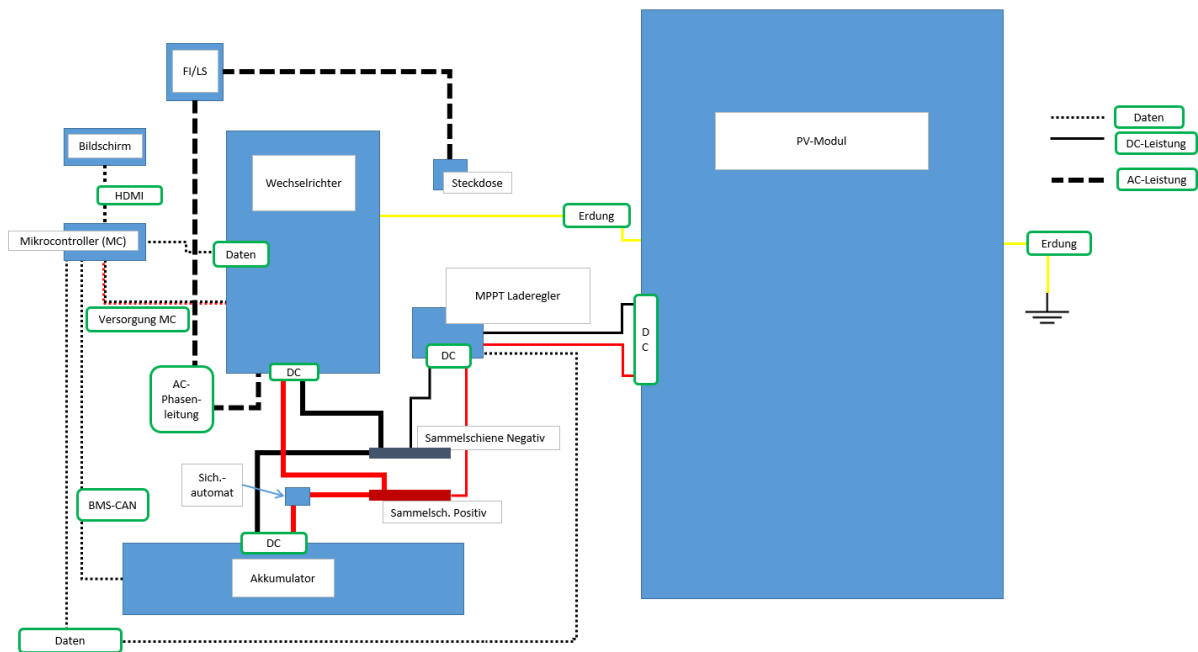


Abbildung 5: Verschaltungsplan des Funktionspaneel Stromausleitung

AP 4 Ableitung technischer Ausführungsvorgaben und Erstellung der Funktionsmuster und Demonstratoren

Anhand der Entwürfe und CAD-Konstruktionsmodelle aus AP3 wurden die technischen Vorgaben für die Beschaffung und Herstellung der mechanischen und elektrischen Teile und Baugruppen abgeleitet. Demgemäß wurden dann im technischen Labor des ifs die Teile und Baugruppen in Einzelteilfertigung hergestellt. Blechteile wurden bei verschiedenen Auftragsfertiger produziert.

Gemäß den Vorgaben wurde schließlich in optimierenden Iterationsstufen ein funktionsfähiger Demonstrator des gleiswegintegrierbaren PV-Kraftwerkes aufgebaut (Abbildung 6). Dies umfasste sowohl die mechanischen Baugruppen wie auch die PV-elektrischen Baugruppen. Die Endmontage und Integration der Baugruppen erfolgte im technischen Labor des ifs.



Abbildung 6: Demonstrator des Paneelbandes.

Der Demonstrator umfasst vier Solarmodule mit jeweils 390 Wp Spitzenleistung und ein Funktionsmodul zur Stromausleitung. Um den damit produzierten elektrischen Strom zu speichern oder direkt zu nutzen, wurden die PV-Module an den Solarladeregler angeschlossen (Abbildung 7). Dieser wandelt die Eingangsspannung auf Modulseite in eine Ladespannung für den Akkuspeicher um. An den Speicher wurde ein Wechselrichter angeschlossen, welcher bedarfsabhängig den Strom entweder unter Gleichspannung in den Akku weiterleiten oder einem angeschlossenen Verbraucher als einphasige Wechselspannung mit 230 Volt bereitstellen kann. Die Steuerung des Energieflusses durch den Wechselrichter erfolgte dabei durch einen separaten Mikrocontroller (Maximum Powerpoint Tracking, MPPT).

Der Wechselrichter wurde außerdem so ausgewählt, dass er im Inselbetrieb in der Lage ist, eigenständig und netzunabhängig eine 50Hz-Netzfrequenz zu erzeugen. Der Mikrocontroller wurde so programmiert, dass der produzierte elektrische Strom vorrangig vom Wechselrichter an angeschlossene Verbraucher weitergegeben wird.



Abbildung 7: Demonstrator zur Stromausleitung.

Mit dem Demonstrator wurde ein funktionaler Schaltungsaufbau bereitgestellt. Der Aufbau einer witterungsbeständigen, robusten Lösung und eine Optimierung der Formfaktoren wurde zunächst zurückgestellt. Aufgrund der im Zuge der Pandemie entstandenen Lieferengpässe zum Zeitpunkt der Beschaffung mussten Kompromisse bei der Komponentenauswahl eingegangen werden.

Indem der Demonstrator mit einem Akkuspeicher versehen wurde, wurde ein vollständig ortsunabhängiger Betrieb möglich. Perspektivisch ist es dadurch möglich, Standorte versorgen zu können, ohne von lokalen Verbrauchern, Einspeise- oder Speicherpunkten abhängig zu sein ("Inselbetrieb"). Damit lässt sich auch das Einsatzszenario einer Kleinanlage, die vom Stromnetz abgeschiedene Verbraucher versorgen soll, real erproben. Zudem wird durch den Akku überschüssiger Strom der Anlage gespeichert, was gewährleistet, dass das Maximum an produzierbarem Strom unabhängig vom Leistungsbedarf angeschlossener Verbraucher erreicht wird. Nur so sind trotz fehlendem Netzanschluss realistische Rückschlüsse auf den Ertrag möglich. Im Falle eines Verbrauchers, der mehr benötigt als die von den vier Modulen näherungsweise lieferbaren 1,6 kW Leistung, wird der Wechselrichter die restliche benötigte Energie aus dem Akkuspeicher entnehmen.

AP 5 Test der Demonstratoren im Labor und Evaluation der Machbarkeit

Zur Testdurchführung wurden zunächst die Versuche und Aufbauten definiert. Danach wurden die Versuchsaufbauten technisch umgesetzt. Die Versuche bzw. Versuchsreihen wurden teils im technischen Labor und teils im Reallabor auf der Gleisanlage des ifs durchgeführt. Die Ergebnisse wurden bewertet und für die Optimierung der Demonstratoren genutzt. Abschließend erfolgte eine Evaluation des Gesamtergebnisses.

Als Testkategorien wurden festgelegt:

- Integrationstests des Gesamtsystems
 - Integration des PV-Systems
 - Integration in das Gleissystem
- Tests des mechanischen Systems bzw. der mechanischen Systemkomponenten
- Tests des elektrischen Systems bzw. des PV-Systems

Zur Durchführung verschiedener Versuche wurde der Demonstrator in einem Reallabor-Szenario im Institutsgleis des ifs implementiert. Die Anlage wurde mehrfach bei verschiedener Witterung in den Testbetrieb genommen.



Abbildung 8: Tests im Reallabor. A: statische Belastung, B: dynamische Belastung, C: Überfahrt mit Rangierlock, D: Reflexion

Funktionstest Energieerzeugung PV-Kraftwerk

Über den Mikrocontroller konnten Daten zum Ertrag der Module gesammelt und dokumentiert werden. Erwartungsgemäß zeigten sich bei einer Parallelverschaltung von PV-Modulen an einem einzigen MPPT bereits bei kleinen Variationen des Verschattungsgrads an einem einzelnen Modul erhebliche Leistungseinbrüche der gesamten Systemleistung. Die Reihenschaltung zeigte sich entsprechend leistungsstabiler.

Der Einsatz mehrerer paralleler Strings pro MPPT ist daher, trotz der Möglichkeit eine höhere Anzahl PV-Module an einen Eingang anschließen zu können, nicht für den Einsatz in einem linienförmigen PV-Kraftwerk geeignet.

Ertrag bei horizontaler PV-Modullage und Verschattung

Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurde eine Solarertragsanalyse mit Verschattungssimulation an Bahngleisen durchgeführt. Dazu wurde die in der PV-Branche übliche Verschattungs-Simulationssoftware PVSol, sowie das von der EU-Kommission herausgegebene Standortanalyse- bzw. Ertragssimulationstool PVGIS verwendet. Die Ergebnisse der PVSol Analyse haben gezeigt, dass der Ertrag bei flacher Einbaulage ohne Verschattung um 950 kWh/kWp liegen kann. Dieses Ergebnis konnte mithilfe von PVGIS für den gewählten Standort (Aachen, NRW) bestätigt werden. Darauf aufbauend konnte mit PVSol weiterhin errechnet werden, dass bei hohem Baumbewuchs in Gleisnähe ein Ertrag von 500

kWh/kWp kaum unterschritten wird. Bei einer Lärmschutzwand entlang der Bahnstrecke ist sogar mit 670 kWh/kWp zu rechnen. Zugrunde gelegt wurden die geltenden Bewuchs-/Bebauungsgrenzen entlang der Gleise der DB. Somit kann eine Installation selbst in eng bebauten/ bewachsenen und somit verschatteten Bereichen sinnvoll sein.

Zu den real erzielbaren Ertragsmengen bei flachem oder leicht geneigtem Einbau der PV-Module, was mit der entwickelten Systemlösung möglich ist, konnten noch keine signifikanten Erkenntnisse gewonnen werden. Inwieweit sich diese mit den ermittelten Simulationswerten decken, wäre durch Langzeitversuche zu validieren. Es ergaben sich in den kurzzeitigen Erprobungen des Demonstrators jedoch keine Anhaltspunkte, dass das reale System von den errechneten Werten abweicht. Sowohl die maximale Leistungsabgabe bei direkter Einstrahlung als auch die bei bedecktem Himmel entsprach den zur entsprechenden Jahreszeit erwartbaren Werten.

Mechanische Belastungstest

Im Nachgang durchgeführtes *misuse-testing* bestätigte die Belastbarkeit der der Konstruktion. Diese erwies sich als robust.

3.2 Diskussion der Ergebnisse

Als Fazit der Anforderungs- und Risikoanalyse kann festgehalten werden, dass ein Großteil der analysierten Lastfälle bereits typisch für PV-Anlagen sind und weitere Lastfälle mit einfachen Maßnahmen beherrschbar sind, da sie durch die Ausgestaltung des Systems erfüllt werden können. Für die sehr anwendungsfallsspezifischen Lastfälle, die mit einem hohen Risiko bewertet wurden, stehen der Projektentwicklung verschiedene als machbar einzuschätzende Maßnahmenoptionen zur Gefahrenabwendung zur Verfügung. Besonders die Anforderungen, die der bahnbetrieblichen Regulation entstammen, bedürfen der weiteren Ausarbeitung. Teils sind hier Sicherheitsnachweise zu erbringen.

Die Entwicklung des technischen Demonstrators und die Durchführung der Tests im Reallabor haben gezeigt, dass der Ansatz, ein PV-Kraftwerk integriert in einem Gleis zu betreiben, grundsätzlich machbar erscheint und funktioniert. Dabei haben sich zahlreiche Lastfälle, die in erster Diskussion als relevant eingestuft wurden, in Ihrer Gewichtung relativiert. Ursächlich dafür ist nicht zuletzt der gewählte technische Ansatz mit seinen spezifischen Gestaltungseigenschaften.

Aus Sicht des Projektkonsortiums wurden bis dato keine Anforderungen ermittelt, die regulatorisch, technisch oder betriebswirtschaftlich als nicht lösbar erscheinen und damit den Ansatz prinzipiell in Frage stellen oder seine Attraktivität maßgeblich vermindern. Sicherlich liegt eine maßgebliche Herausforderung in der Erfüllung regulatorischer Anforderungen. Daher sollen erste Pilotprojekte in definierten Umgebungen, sogenannten Werkzaubereichen,

starten, was einem weiteren Lern- und Entwicklungsprozess sehr dienlich ist und allen Beteiligten greifbare Umsetzungen aufzeigt, die dann wiederum im Lichte der Ergebnisse konkret auf Erweiterungsperspektiven hin bewertet werden können.

3.3 Ökologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse

Grundsätzlich hat die Machbarkeitsanalyse gezeigt, dass die Verlegung von PV-Modulen im Gleis durchführbar ist und funktioniert. Hierbei stehen vier ökologische Vorteile im Vordergrund:

1. Durch die Verlegung von PV-Modulen wird nachhaltig elektrische Energie erzeugt.
2. Durch die Zweitnutzung der bereits primär anderweitig genutzten Flächen wird der Forderung nach Vermeidung von Flächenkonkurrenz bei PV-Freiflächenanlagen Rechnung getragen.
3. Die Stromerzeugung findet direkt in der Nähe der Abnehmer statt. Dies hat den ökologischen Vorteil, dass Kabel und ggfs. Wege nicht über weite Strecken zum nächsten Abnehmer oder Einspeisepunkt auch unterirdisch verlegt bzw. angelegt werden müssen. In der Bahnwelt gibt es hierfür konkrete Anwendungsfälle.
4. Zusätzlich ist durch die Verschattung des Gleises durch die Paneele eine Behandlung des Gleisbettes mit Herbiziden nur noch punktuell und nicht mehr flächendeckend notwendig.

Ökonomisch gesehen wurden die Kosten eines konkurrenzfähigen PV-Ansatzes im Gleis abgeschätzt und mit Entwicklern von Wind- und Solarkraftwerken diskutiert. Hier wurden letztendlich spezifische Investitionskosten von 1.000 bis 1.200 €/kWp bei der Errichtung eines Freiflächensolarfeldes identifiziert. Dieses Niveau gilt es für einen konkurrenzfähigen Ansatz, zu erreichen. Nach jetzigem Stand der Kalkulationen in der vorliegenden Machbarkeitsstudie können diese Benchmark sicher erfüllen werden.

3.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Das vorläufige Ergebnis der Machbarkeit eines modularen PV-Kraftwerkes im Gleis wurde bereits auf der Smarter E Europe vom 14.-16.07.2023 in München auf dem Stand der Deutschen Bundesstiftung Umwelt einem Publikum aus Fachleuten aber auch Privatleuten vorgestellt. Im Rahmen der Fachmesse konnten erste Diskussionen zur Projektidee geführt werden. Die Beteiligung an der Fachmesse wurde bei den Partnern wie auch bei der DBU beworben und durch Presseartikel und Veröffentlichungen in den sozialen Medien begleitet.

4 Fazit

Ziel des Projektes RoboPV war es, die Machbarkeit eines modular aufgebauten PV-Kraftwerkssystems zur automatischen Fließmontage im Gleis zu analysieren und zu bewerten. Ausgehend von der Anforderungs- und Risikoanalyse konnten verschiedene Komponenten für

ein solches System erfolgreich entwickelt, entworfen, produziert und in einem ersten Demonstrator im Gleis getestet und evaluiert werden.

Nach erfolgreicher Umsetzung des Projektes, bei dem der Fokus zunächst auf der Gestaltung des PV-Kraftwerks lag, rücken nun die Fragen zum Herstellungsverfahren, der logistischen Bereitstellung und mechanisierten Verlegung im Gleis in den Vordergrund.

Hinsichtlich der Einsatzszenarien im Bahnumfeld sind regulationsspezifische Anforderungen zu erfüllen, die im Rahmen von Pilotprojekten und den dazu vorausgehenden Sicherheitsgutachten zweckgerichtet erarbeitet werden können. Zugleich können dabei im Austausch mit den Bahn- und Netzbetreibern konkrete Anwendungsfälle geplant und umgesetzt werden.

In der Untersuchung wurde sich intensiv der Frage gewidmet, inwieweit PV-Standardmodule den robusten Lastanforderungen des Bahnsystems seitens Betriebs, Fahrzeug und Infrastruktur standhalten können. Die Lastsituation im Gleisbett war dabei durch vielfältige Anforderungen gekennzeichnet. Exemplarisch seien hier EMV, Vibration, Luftströmungen, Witterung (Wind, Schnee, Eis etc.), Schotterschlag, Schattenwechsel, Verschmutzung, Wildwechsel, Vandalismus, Missbrauch wie auch Gleiswartung und Sicherheitsanforderungen angeführt. Ergänzend seien die produktionslogistischen Anforderungen für eine automatische Montagefähigkeit oder auch Wartbarkeit genannt. Dies wurde im Rahmen der Machbarkeitsstudie auf breiter Basis analysiert und technisch bewertet. Es konnten keine Anforderungen ermittelt werden, die regulatorisch, technisch oder betriebswirtschaftlich als nicht lösbar erscheinen und damit den Ansatz prinzipiell in Frage stellen oder seine Attraktivität maßgeblich vermindern.

Die übergeordnete Gesamtvision des bearbeiteten Projektes ist daher weiterhin die Entwicklung eines effizienten technischen Verfahrens zur automatisierten, seriellen Herstellung von PV-Kraftwerken im Gleis.

Literaturverzeichnis

DB AG, „Vegetationsmanagement an Bahntrassen der Deutschen Bahn AG in Niedersachsen“, 15. April 2019.

Deutsches Patent- und Markenamt, AZ 197 25 945.6, Offenlegungsschrift, „Einrichtung zur Erzeugung von elektrischer Energie durch Sonnen- und Lichteinstrahlung“, 1998.

Forum Netztechnik/ Netzbetrieb im VDE (VDE FNN), „Stromleitungskreuzungsrichtlinien, Anwendungshilfe mit Beispielanträgen“, 17. Juli 2019.

Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme ISE, 2021, „Stromgestehungskosten für erneuerbare Energien“, Juni 2021.

Lichtberger, Bernhard, „Das System Gleis und seine Instandhaltung“, EI – Eisenbahningenieur (58) 1/2007.

Wildling, Ewald, DB Netz AG, „Richtlinie 821, Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik, Oberbau Inspizieren“, 04. April 2017.

Wirth, H., Weiß, K.-A., Wiesmeier, C., „Photovoltaic Modules“, De Gruyter, 2016.