



© Deutsche Bahn AG / Foto: Claus Weber

Kurzbericht zum Forschungsprojekt

PV4Rail - Einwicklung eines ganzheitlichen Konzeptes und eines leistungselektronischen Umrichters mit 1 MVA für die Einspeisung ins Bahnstromnetz

Andreas Hensel¹, Luca Tomhave², Ann Kathrin Rein², Jan Möller³, Dr. Aleksandr Drnoyan⁴

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland

² IP SYSCON GmbH

³ VENSYS Elektrotechnik GmbH

⁴ EnBW – Energie Baden-Württemberg AG

Stand: 25.07.2025

Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt wurde ein Demonstrator mit einer Leistung von 2 x 1 MVA entwickelt und getestet, der PV-Strom in einphasige Bahnstromnetze (16,7 Hz) einspeist. Des Weiteren wurden eine Analyse des technischen Flächenpotenzials entlang des Bahnstromnetzes in Deutschland durchgeführt und techno-ökonomische Untersuchungen von Bahnstrom-PV-Anlagen durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

1 Rahmenbedingungen

Die Deutsche Bahn (DB) ist der größte Verbraucher von elektrischer Energie in Deutschland und betreibt über die DB Energie GmbH ein eigenes Bahnstromnetz mit einer eigenen Frequenz von 16,7 Hz zur Versorgung der Triebfahrzeuge und Lokomotiven auf den elektrifizierten Strecken. Grundsätzlich sind zwei relevante Spannungsebenen zu betrachten: Das eigentliche Bahnstromnetz mit einer Spannung von 110 kV ist mit dem öffentlichen Verteilnetz vergleichbar (Länge 7.936 km). Es bildet eine eigene Regelzone. Über insgesamt 191 Unterwerke wird der eigentliche Fahrdrat (15 kV, 19.715 km) gespeist. Über diese Oberleitung werden, die sich bewegenden Fahrzeuge mit elektrischer Energie versorgt. Insgesamt sind am Bahnstromnetz in Deutschland Erzeugungsanlagen mit einer installierten Leistung von ca. 3 GW installiert. Dies beinhaltet auch die Netzkupplungen (Umformer- und Umrichterwerke) die keine direkten Erzeuger darstellen, sondern eine Kopplung des öffentlichen 50-Hz-Netzes an das 16,7-Hz-Bahnstromnetz realisieren.

Das typische Verbrauchsprofil ist durch den Bedarf an Mobilität bzw. den Fahrplan der DB und anderen Betreibern definiert und weist auf Grund des Pendlerverkehrs typische Lastspitzen in den Morgen- und frühen Abendstunden auf. Diese Spitzen korrelieren stark mit den Börsenstrompreisen. Dies bedeutet, dass allgemein betrachtet gerade dann viel Energie benötigt wird, wenn der Börsenstrompreis hoch ist.

2 Flächenpotenzialanalyse

Es wurde bundesweit eine geeignete Flächenkulisse von PV-Potenzialflächen aufgebaut und mit detaillierten Simulationen hinsichtlich Ihres PV-Potenzials untersucht. Das vorhandene Flächenpotenzial übersteigt die Menge an PV-Anlagen, die elektrisch sinnvoll in Bahnstromnetz integriert werden können, um

| Entfernung zu Uw | 2 km | 1 km | 500 m |
|---|--------|--------|-------|
| Mögliche zu installierende GWp-Leistung | 37,6 | 17,0 | 7,9 |
| Möglicher Stromertrag in GWh/Jahr | 32.920 | 14.802 | 6892 |

ein Vielfaches. Aktuell besteht am Bahnstromnetz eine kumulierte Erzeugungsleistung inklusive Reservorhaltung von ~3 GW. Nach Aussage und Berechnungen der DB Energie können bis zu 460 MW Erneuerbare Energien (Ist-Zustand des Netzes 2023) auf verschiedene Netzzonen verteilt integriert werden. Mit einem perspektivischen Netzausbau wie in der Netzstrategie bis 2040 geplant bis zu 635 MW. Aus Sicht der Autoren ist das eine eher konservative Einschätzung, wenn man diese Zahlen mit dem öffentlichen Stromnetz vergleicht.

In der Potenzialanalyse wurden daher verschiedene Reduktionen durchgeführt, um das gesamte Potenzial einzuschränken. Ausgangspunkt war hier die räumliche Nähe zu Unterwerken (Uw), da hier aufgrund der Verbindung zum 16,7Hz/110kV-Netz elektrisch und ökonomisch gute Bedingungen bestehen, PV-Anlagen ans Bahnstromnetz anzuschließen. Je Unterwerk können jedoch aufgrund der geltenden Normen, u.a. für die Rückspeisefähigkeit der Triebfahrzeuge, und der physikalischen Gegebenheiten der Bahnenergieversorgung (Wechselstrom) maximal 12 MWp an ein Unterwerk (15kV-seitig) angeschlossen werden.

In der Tabelle 1 sind die Potenziale (Angabe in MWp) im Umkreis von 2 km aller Unterwerke angegeben. Auch wenn auf das berechnete Potenzial noch Abschläge anzuwenden sind, um das tatsächlich erschließbare Potenzial zu ermitteln, ist das grundlegende Ergebnis der Studie, dass Flächen in mehr als ausreichendem Maße verfügbar sind.

3 Systemkonzepte

Für die Ökonomie der Anlage ist die Ausführung des Netzanschlusses von großer Bedeutung. Je nach Größe der Anlage wurden verschiedene Anschlussmöglichkeiten betrachtet. Für kleine Anlagen bis 1,5 MVA kann die Einspeisung über einen Leistungsschalter (Kuppelstelle) in den Fahrdraht erfolgen. An Schaltposten (15kV-Kuppelstellen der Oberleitung zwischen Streckenabschnitten im Bahnnetz) können auch höhere Leistungen bis 6 MVA in den Fahrdraht der abgehenden Strecken eingespeist werden. Leistungen bis 12 MVA können in Unterwerken über die Sammelschiene sowohl in das 15kV-Netz wie auch in das 110kV-Netz eingespeist

werden. Diese Variante weist die geringsten Unterschiede bei den LCOE-Kosten zu 50 Hz-Anlagen auf. Für große Anlagen von ca. 12 bis 100 MW muss eine 110-kV-Schaltanlage für die Einspeisung in das 110-kV-Netz geplant und finanziert werden. Anlagen bis 40 MW können, soweit es möglich ist (Netzverträglichkeitsprüfung) auch an die 110-kV-Seite eines Unterwerkes angeschlossen werden. Diese Eingruppierung sind verallgemeinerte Einschätzungen. Für die Detailplanung müssen immer über ein Netzanschlussgesuch Detailuntersuchungen im konkreten Fall durchgeführt werden. Für die im Projekt durchgeführten Untersuchungen wurden jedoch die Konzepte mit diesen Anlagengrößen und Netzanschlusskonzepten verwendet.

Das Bahnstromnetz der deutschen Bahn ist umrichterdominiert und in großen Netzteilen nahezu ohne rotierende Massen. Wissenschaftliche Untersuchungen der letzten Jahre haben ergeben, dass für einen stabilen Netzbetrieb in leistungselektronisch dominierten Netzen bei der DB und auch bei den öffentlichen 50 Hz-Netzbetreibern spannungseinprägende (netzbildende) Umrichter zwingend erforderlich sind. Desweiteren sind bei den Bahnen ältere Sicherungstechniken (z.B. Gleisfreimeldekreise) vorhanden, für die besondere Maßnahmen und Prüfverfahren erforderlich sind, um eine Rückwirkungsfreiheit der Umrichter/Wechselrichter gegenüber der Signaltechnik sicherzustellen.

4 Der Demonstrator



Abb. 1 Bild des im Projekt entwickelten Wechselrichters © VENSYS Elektrotechnik GmbH

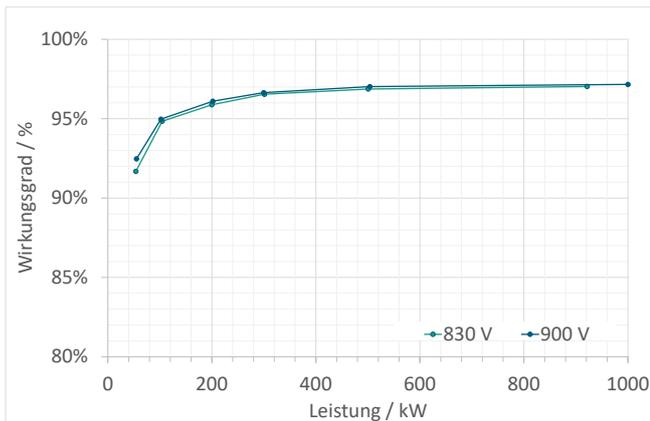


Abb. 2 Gemessener Wirkungsgrad des Demonstrators für zwei verschiedene MPP-Spannungen © Fraunhofer ISE

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein containerbasierter Zentralwechselrichter aufgebaut und im Labor des Fraunhofer ISE getestet. Die Leistung im aufgebauten 20 Fußcontainer beträgt 2 MVA aufgeteilt in zwei symmetrische Leistungsteile von jeweils 1 MVA. Im Labor wurde ein Leistungsteil bis zur vollen Leistung von 1 MVA in Betrieb genommen. In der folgenden Abbildung ist der finale Demonstrator dargestellt.

Die Ergebnisse der Wirkungsgradvermessung sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Vermessen wurde der Wirkungsgrad des Niederspannungsteils des Wechselrichters (ohne Mittelspannungstransformator) aber inkl. des kompletten Eigenverbrauchs für Kühlung, etc. Der gewichtete europäische Wirkungsgrad wurde zu 96,6 % ermittelt.

5 Marktliche und rechtliche Rahmenbedingungen

Im Allgemeinen werden die Stromgestehungskosten (LCOE) bei PV-Anlagen von den Anfangsinvestitionskosten der Anlage dominiert. Diese sind bei 16,7 Hz immer höher als bei 50-Hz-Anlagen. Dies liegt zum einen am technischen Mehraufwand aufgrund der Einphasigkeit im Wechselrichter, zum anderen aber auch an dem begrenzten Markt von Bahnstromkomponenten und damit einhergehenden geringen Stückzahlen und damit höheren Preisen. Im Schnitt kamen die wirtschaftlichen Untersuchungen im Pro-

jekt zum Ergebnis, dass diese technischen Mehrkosten bei 20-40% über dem heute bekannten üblichen Marktpreis. Maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit ist jedoch der Wert der Energie, mit dem die Anlage vermarktet werden kann. Das naheliegendste Modell für die Vermarktung des Stromes sind PPA (Power Purchase Agreements). Bei diesen wird über eine bestimmte Laufzeit von einigen Jahren ein fester Preis pro kWh verhandelt und muss für eine Wirtschaftlichkeit über den LCOE-Kosten liegen.

Über die Umformer- und Umrichterwerke der DB Energie ist das öffentliche Netz mit dem Bahnstromnetz verbunden. Für Einkäufer von Bahnstrom besteht daher die Möglichkeit die Energie über Strombörse und PPA mit Anlagen am öffentlichen Netz einzukaufen.

Die Netzentgelte werden vom Energieverbraucher bezahlt und sind gleich hoch, egal ob der Strom direkt von einer Bahnstrom-PV-Anlage erzeugt oder über das öffentliche Netz bezogen wird. Bei Betrachtung des Gesamtsystems ist dies de facto eine Benachteiligung von Bahnstrom-PV-Anlagen. Denn der Bezug über das öffentliche Netz beansprucht das ohnehin schon sehr ausgereizte Netz, außerdem entstehen über die längere Übertragung und die Umrichterwerke (Frequenzumwandlung von 50 Hz auf 16,7 Hz) Verluste, die ebenfalls über die Netzentgelte auf alle Verbraucher umgelegt werden.

In der Praxis bedeutet das, dass ein Verbraucher im Bahnstromnetz die gleichen Netzentgelte bezahlt, egal ob die energieerzeugende Anlage direkt in 16,7 Hz einspeist oder in das öffentliche 50-Hz-Netz. Der Verlustvorteil und auch der Vorteil, der sich durch eine geringere Belastung der höheren Netzebenen und Umrichterstationen bei einer Direkteinspeisung und Betrachtung des Gesamtsystems ergibt, sollte künftig an die Verbraucher in Form von reduzierten Netzentgelten weitergegeben werden. Auf diese Art würden Bahnstrom-PV-Anlagen wirtschaftlich attraktiver werden. Damit wird die Energiewende im Bahnstromnetz auch wirtschaftlich umsetzbar. In der Vergangenheit gab es beispielsweise einen Ausgleich für rückerzeugte Energie von bremsenden Zügen. Diese erhielten aufgrund einer Vermeidung von Kosten der Nutzung von vorgelagerten Netzen, §18 StromNEV) eine zusätzliche Vergütung pro kWh und geht argumentativ in eine ähnliche Richtung.

Aus Sicht der Autoren wäre eine solche Regelung eine sinnvolle Möglichkeit die Kosten der Energiewende fairer zu verteilen, Bahnstromanlagen wirtschaftlich zu betreiben und gleichzeitig das öffentliche Stromnetz und auch die Umrichterstationen zu entlasten. Eine solche Regelung könnte zukünftig in §19 StromNEV Niederschlag finden.

Zur Verdeutlichung ist die grundsätzliche Konstruktion des Preismodells noch einmal in der folgenden Grafik dargestellt.



Abb. 3 Strompreisstruktur am Bahnstrommarkt (Stand 01.01.2025) © EnBW

6 Fazit

Bahnstrom-PV-Anlagen sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende im Bahnstromnetz und können dabei helfen, die Energiekosten der Bahnbetreibergesellschaften in Deutschland zu reduzieren. Im Rahmen des Vorhabens wurde das Flächenpotenzial in Deutschland als ausreichend eingeschätzt und technische Lösungen für den Wechselrichter entwickelt. Aktuell benachteiligen jedoch die technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen Bahnstrom-PV-Anlagen gegenüber Anlagen am 50-Hz-Netz. Die durch den Bezug über das öffentliche Netz entstehenden Mehrkosten aufgrund höherer Verluste bei der Übertragung und der Frequenzumformung werden über die Allgemeinheit aller Verbraucher in Form der Netzentgelte bezahlt. Eine Weitergabe dieser ökonomischen Vorteile an die Verbraucher durch reduzierte Netzentgelte kann die wirtschaftliche Attraktivität von Bahnstrom-PV-Anlagen steigern und die Energiewende innerhalb des Bahnstromnetzes massiv beschleunigen. Bisher beschränken sich in Deutschland Bahnstrom-PV-Anlagen auf Pilotinitiativen. In Österreich wurden bereits

mehrere Anlagen größer 10 MWp am Netz in Betrieb genommen. Die Netzanschlussbedingungen bei der ÖBB unterscheiden sich jedoch von den von DB unter <https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/netzbetreiber/bahnstromnetz/EE-Netzanschluss> Veröffentlichten Anschlussbedingungen. Aufgrund der Anforderung an den Betrieb des Bahnstromnetzes und die Kompatibilität der Wechselrichter zur Leit- und Sicherungstechnik kann bei der DB nur spannungseinprägende Wechselrichter verwendet werden. Innerhalb der Projektlaufzeit des Projektes PV4Rail wurde beim entwickelten Wechselrichter ein stromeinprägendes Verhalten implementiert und nachgewiesen. Spannungseinprägendes Verhalten wurde im Projekt in der Simulationsumgebung getestet und könnte im Rahmen eines Folgeprojektes noch implementiert werden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK.IIB5) gefördert (FKZ 03E14064).