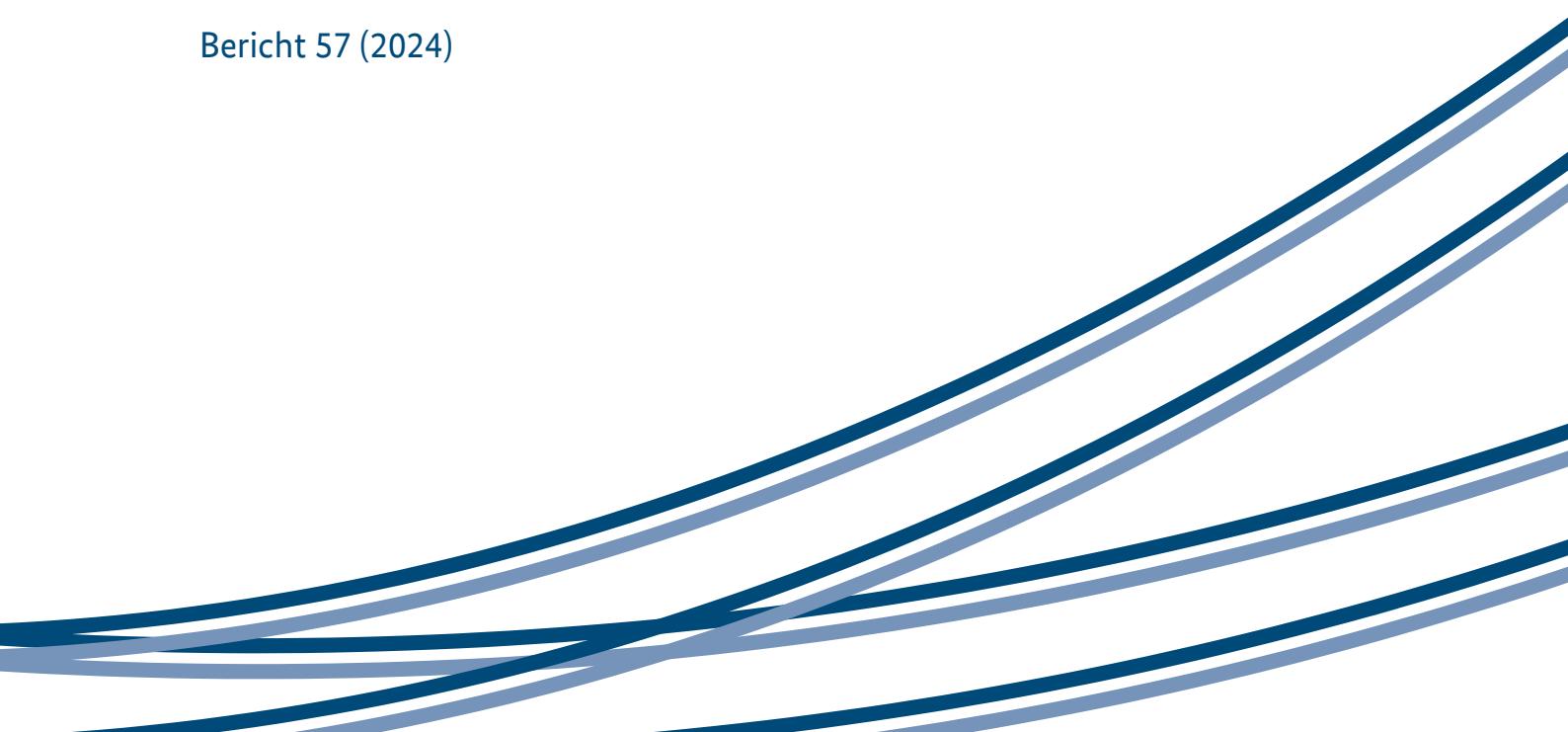




Berichte  
des Deutschen Zentrums  
für Schienenverkehrsorschung

Bericht 57 (2024)



# Potenzialstudie Photovoltaik-Anwendungen an der Schieneninfrastruktur

Abschlussbericht



Berichte des Deutschen Zentrums  
für Schienenverkehrsorschung, Nr. 57 (2024)  
Projektnummer 2020-06-U-1202

# Potenzialstudie Photovoltaik-Anwendungen an der Schieneninfrastruktur

Abschlussbericht

von

Dr. Jürgen van der Weem, Bernd Schönauer, Svend Ulrich  
TÜV Rheinland InterTraffic GmbH, Köln

Annett Sepanski, Magnus Herz, Uwe Hupach  
TÜV Rheinland Solar GmbH, Köln

im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsorschung beim Eisenbahn-Bundesamt



# Impressum

## HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsorschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10  
01219 Dresden

[www.dzsf.bund.de](http://www.dzsf.bund.de)

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE  
TÜV Rheinland InterTraffic GmbH  
Am Grauen Stein  
51105 Köln

TÜV Rheinland Solar GmbH  
Am Grauen Stein  
51105 Köln

ABSCHLUSS DER STUDIE  
Oktober 2023

REDAKTION  
Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsorschung beim Eisenbahn-Bundesamt  
Philipp Streek, Forschungsbereich Umwelt und nachhaltige Mobilität

BILDNACHWEIS  
TÜV Rheinland InterTraffic GmbH/Titelinnenseite

PUBLIKATION ALS PDF  
<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973  
[doi: 10.48755/dzsf.240010.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.240010.01)

Dresden, August 2024



This work is openly licensed via CC BY 4.0.

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>12</b>
<b>Begriffserklärung .....</b>	<b>15</b>
<b>Kurzbeschreibung .....</b>	<b>18</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>22</b>
<b>1      Einleitung .....</b>	<b>26</b>
<b>2      Methodisches Vorgehen .....</b>	<b>27</b>
<b>3      Kurzeinführung PV-Technik.....</b>	<b>31</b>
<b>4      Bahnseitige bauliche Voraussetzungen .....</b>	<b>32</b>
4.1    Bauliche Gegebenheiten.....	32
4.1.1    Abstand vom Gleiskörper .....	32
4.1.2    Minderungsfaktor Verschattungen.....	33
4.1.3    Mögliche Blendungen .....	33
4.1.4    Gewährleistung der Signalsicht .....	34
4.1.5    Vandalismus, Sabotage und Diebstahl .....	34
4.2    Anwendungsklassen.....	35
4.2.1    Installation am oder im Gleisbett.....	35
4.2.2    Installation an oder in einer LSW.....	36
4.2.3    Installation an oder auf einem Lärmschutzwall.....	37
4.2.4    Installation an oder in baulichen Bahneinrichtungen.....	38
4.2.5    Installation neben dem Schienenweg .....	39
4.2.6    Sonstige Installationsorte.....	39
<b>5      Aufbau einer PV-Anlage - Hauptkomponenten.....</b>	<b>42</b>
5.1    PV-Module.....	44
5.1.1    Funktion .....	44
5.1.2    Aufbau .....	44
5.1.3    Technologien.....	45
5.1.4    Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur .....	45
5.2    Unterkonstruktion und Befestigungssysteme.....	47
5.2.1    Funktion .....	47
5.2.2    Technologien.....	49
5.2.3    Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur .....	50
5.3    Umwandlungs- und Transformierungselemente .....	51

5.3.1	Funktion.....	51
5.3.2	Aufbau.....	51
5.3.3	Technologien.....	54
5.3.4	Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur.....	55
5.4	Kabel und Leitungen.....	56
5.4.1	Funktion.....	56
5.4.2	Technologien.....	57
5.4.3	Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur.....	58
5.5	Steuerungs- und Überwachungssysteme.....	58
5.5.1	Funktion.....	58
5.5.2	Technologien.....	59
5.5.3	Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur.....	60
<b>6</b>	<b>Bereits realisierte Projekte .....</b>	<b>61</b>
6.1	Durchführung der Recherche .....	61
6.2	Recherche-Ergebnisse .....	62
6.2.1	Grundsätzliches .....	62
6.2.2	Bahnstromsysteme.....	63
6.2.3	Internationale Schwerpunktentwicklungen zur verstärkten Nutzung der PV .....	64
6.3	Die Gesamtzahl rechercherter PV-Projekte und Studien zur Nutzung des PV-Potenzials..	67
6.4	Projekte für Direkteinspeisung.....	67
6.5	Projekte für Einspeisung in das 50-Hz-Netz.....	70
6.6	Studien .....	78
6.6.1	Verbrauchs-, Bedarfs- und Potenzialanalysen.....	78
6.6.2	Machbarkeitsstudien hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Faktoren .....	81
6.6.3	Anwendungsklassenbezogene Studien zu Regularien und Design .....	82
6.6.4	Studie zur Direkteinspeisung.....	84
6.6.5	Klimaneutralität für nichtelektrifizierte Bahnstrecken im DB-Netz.....	84
<b>7</b>	<b>Anforderungen an PV-Systeme in der Schieneninfrastruktur.....</b>	<b>85</b>
7.1	Statik.....	86
7.2	Temperatur.....	87
7.3	Wind .....	87
7.4	Seitenwind.....	88
7.5	Sog/Druck.....	88
7.6	Regen.....	89
7.7	Schnee und Eis.....	89
7.8	Hagel .....	89

7.9	Schotterflug .....	89
7.10	Sand .....	90
7.11	Sonneneinstrahlung .....	90
7.12	Blitzschlag .....	90
7.13	Verschmutzung .....	90
7.14	Schwingung/Vibration .....	91
7.15	Stöße .....	92
7.16	Elektromagnetische Verträglichkeit .....	93
7.16.1	EMV – Störfestigkeit .....	93
7.16.2	EMV – Störaussendung .....	94
<b>8</b>	<b>Anforderungen an die elektrische Einspeisung .....</b>	<b>95</b>
8.1	Wechselstrom-Bahnenergieversorgung in Deutschland .....	95
8.2	Prinzipieller Aufbau einer PV-Anlage mit Direkteinspeisung in die Fahrleitung .....	96
8.3	Schutz der Komponenten .....	100
8.4	Anforderung bzgl. der PV-Strings .....	101
8.5	Anforderung an die Einspeisung 15-kV-seitig .....	102
8.6	Einfluss von Umrichtern auf die Netzstabilität der 15-kV-Fahrleitungsebene .....	104
8.7	Steuerung und Betriebsführung .....	104
8.8	Regulatorische Anforderungen .....	105
<b>9</b>	<b>Geeignete PV-Systeme sowie mögliche Hersteller und Entwickler .....</b>	<b>106</b>
9.1	PV-Generator .....	106
9.1.1	PV-Module .....	106
9.1.2	Unterkonstruktionen .....	106
9.1.3	DC-Leitungen .....	107
9.2	Umwandlungs- und Transformierungselement .....	107
9.2.1	Wechselrichter .....	107
9.2.2	Transformator .....	108
9.2.3	Kabel- und Leitungssysteme AC .....	108
9.2.4	Schaltgeräte .....	109
9.2.5	Weitere Komponenten .....	109
9.3	Steuerungs- und Überwachungssysteme .....	109
9.4	Übersicht geeigneter PV-Systeme in Abhängigkeit der Anwendungsfälle innerhalb der Schieneninfrastruktur .....	110
<b>10</b>	<b>Beispielhafte Erarbeitung und Auslegung möglicher PV-Systeme .....</b>	<b>112</b>
10.1	Installation am oder im Gleisbett .....	113
10.2	Installation an oder in einer LSW .....	115

10.3	Installation an oder auf einem Lärmschutzwall .....	116
10.4	Installation an oder in baulichen Bahneinrichtungen.....	117
10.5	Installation neben dem Schienenweg.....	119
10.6	Installation auf dem Fahrzeugdach.....	120
10.7	Vergleich der Anwendungsklassen.....	121
<b>11</b>	<b>Abschätzung der Kosten für die Basis-Systeme .....</b>	<b>123</b>
11.1	Annahmen für Basissysteme.....	123
11.2	Kosten für Basissysteme.....	125
11.3	Sonderfallbetrachtung LSW mit integrierter PV .....	129
<b>12</b>	<b>Recherche der heranzuziehenden Datenquellen.....</b>	<b>130</b>
<b>13</b>	<b>Verifikation der Daten .....</b>	<b>134</b>
<b>14</b>	<b>Designanforderungen für geeignete PV-Systeme.....</b>	<b>137</b>
<b>15</b>	<b>Methode .....</b>	<b>142</b>
<b>16</b>	<b>Ermittlung der geeigneten Flächen.....</b>	<b>144</b>
16.1	Anwendungsklasse 1: Im Gleisbett .....	144
16.2	Anwendungsklassen 2 und 3: LS und Lärmschutzwall.....	145
16.3	Anwendungsklasse 4: Bauliche Einrichtungen .....	146
16.4	Anwendungsklasse 5: Neben dem Schienenweg .....	147
16.5	Anwendungsklasse 6: Sonstige Installationsorte, Fahrzeugdach .....	148
16.7	Gesamtflächen .....	152
<b>17</b>	<b>Ermittlung des Einspeisepotenzials.....</b>	<b>153</b>
17.1	Anwendungsklasse 1: Im Gleisbett .....	158
17.2	Anwendungsklassen 2 und 3: LSW und Lärmschutzwall.....	158
17.3	Anwendungsklasse 4: Bauliche Einrichtungen .....	159
17.4	Anwendungsklasse 5: Neben dem Schienenweg .....	160
17.5	Anwendungsklasse 6: Sonstige Installationsorte, Fahrzeugdach .....	161
17.6	Gesamtpotenzial.....	162
17.6.1	Szenario A:.....	163
17.6.2	Szenario B:.....	165
17.6.3	Szenario C:.....	165
<b>18</b>	<b>Anbindung an das Bahnenergieversorgungssystem .....</b>	<b>167</b>
18.1	Einleitung.....	167
18.2	Konventionelle Einspeisung in die Fahrleitung .....	167
18.3	Schutz der Komponenten .....	169

18.4	Einhaltung der zulässigen Spannungsgrenzen .....	169
18.5	Längenbezogene Generierung von PV-Leistung, Maximalbetrachtung .....	171
18.5.1	Allgemeines .....	171
18.5.2	Anwendungsklasse 1: Im Gleisbett .....	171
18.5.3	Anwendungsklasse 2: LSW .....	172
18.5.4	Anwendungsklasse 3: Lärmschutzwall .....	172
18.5.5	Anwendungsklasse 4: Bauliche Einrichtungen .....	172
18.5.6	Anwendungsklasse 5: Neben dem Schienenweg .....	173
18.5.7	Anwendungsklasse 6: Sonstige Installationsorte, Fahrzeugdach .....	173
18.5.8	Zusammenfassung: Einspeisung PV-Leistung in die Fahrleitung .....	174
18.6	Abschätzung des Energiebezugs auf einer Bahnstrecke .....	175
18.6.1	Anzahl von Zügen in einem Speisebereich .....	175
18.6.2	Leistungsbedarf eines Zuges .....	175
18.6.3	Auswertung und Zusammenfassung .....	176
18.7	Gesamt-Traktionsenergie-Verbrauch versus PV-Potenzial .....	177
19	<b>Anbindung erzeugungsnaher interner Verbraucher .....</b>	<b>179</b>
20	<b>Recherche der anzuwendenden Regelwerke zu Bahnanlagen .....</b>	<b>180</b>
21	<b>Weitere bahnunabhängige Regelwerke .....</b>	<b>182</b>
21.1	Technische Regelwerke .....	182
21.2	Regelwerke in Bezug auf PV-Netzanbindung und Energievermarktung .....	185
21.3	Regelwerke in Bezug auf Natur- und Umweltschutz .....	186
21.4	Baurechtliche Vorgaben .....	187
21.5	Sonstige Vorgaben von Behörden und Institutionen .....	187
22	<b>Auswirkungen, Einschränkungen, Hemmnisse, Synergien .....</b>	<b>189</b>
22.1	PV-Module in der Nähe der Gleise .....	190
22.1.1	Generelle Anmerkungen .....	190
22.1.2	Mechanische Belastungen .....	191
22.1.3	Verschmutzung .....	191
22.1.4	Betriebliche Aspekte, Inspektion, Wartung, Reparatur .....	191
22.1.5	Sonstige Anforderungen .....	192
22.2	PV-Module an der LSW, am Lärmschutzwall .....	192
22.2.1	Generelle Anmerkungen .....	192
22.2.2	Mechanische Belastung .....	193
22.2.3	Betriebliche Aspekte, Inspektion, Wartung, Reparatur .....	193
22.2.4	Schutz vor elektrischem Schlag .....	194

22.3	Installation der PV-Module im Gleisbett.....	194
22.3.1	Generelle Anmerkungen .....	194
22.3.2	Mechanische Belastung.....	195
22.3.3	Verschmutzung.....	195
22.3.4	Befestigungstechnik.....	195
22.3.5	Betriebliche Aspekte, Inspektion, Wartung, Reparatur.....	196
22.3.6	Schutz vor elektrischem Schlag.....	197
22.3.7	Elektromagnetische Verträglichkeit.....	197
22.4	Installation an baulichen Einrichtungen.....	197
22.5	Einspeisung in die Oberleitung .....	198
22.5.1	Allgemeines.....	198
22.5.2	Schutz.....	199
22.5.3	Schutz vor elektrischem Schlag.....	199
22.5.4	Leistungsregelung .....	200
22.5.5	Elektromagnetische Verträglichkeit.....	200
22.6	Regulatorische und rechtliche Aspekte .....	200
22.7	Anmerkung zur vorliegenden Studie.....	201
22.8	Synergieeffekte .....	202
23	<b>Fazit.....</b>	<b>203</b>
24	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>205</b>
25	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>208</b>
26	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>210</b>
27	<b>Anhänge.....</b>	<b>222</b>
	Anhang I: Heat-Maps.....	222
	Anhang II: Tabellarische Darstellung der Rechercheergebnisse zu DB Richtlinien und zur EBA- Richtlinie .....	226
	Anhang II.I DB RiL 123.xxxx - Notfallmanagement, Brandschutz.....	226
	Anhang II.II: DB RiL 413.xxxx - Infrastruktur gestalten.....	229
	Anhang II.III: DB RiL 800.xxxx – Bahnanlagen entwerfen.....	232
	Anhang II.IV: DB RiL 804.xxxx - Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, DB RiL 805 – Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken .....	236
	Anhang II.V: DB RiL 807.04xx - • Ausgewählte Maßnahmen und Anforderungen an das Gesamtsystem Fahrweg/Fahrzeug: Aerodynamik/Seitenwind .....	240
	Anhang II.VI: DB RiL 813.xxxx - Personenbahnhöfe planen und bauen .....	241
	Anhang II.VII: DB RiL 819.xxxx - LST-Anlagen planen .....	243
	Anhang II.VIII: DB RiL 820.xxxx - Grundlagen des Oberbaus.....	246

Anhang II.IX: DB RiL 836.xxxx - Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instandhalten.....	248
Anhang II.X: DB RiL 997.xxxx - Oberleitungsanlagen .....	250
Anhang II.XI: DB RiL 954.xxxx – Elektrische Energieanlagen.....	252
Anhang II.XII: DB RiL 955.xxxx – Schaltanlagen für Bahnstrom.....	254
Anhang II.XIII: DB RiL 877.xxxx, 878.xxxx, 879.xxxx, – Kreuzungsrichtlinien für Gas-, Wasser-, Strom- und Telekommunikationsleitungen .....	256
Anhang II.XIV: EBA-Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an Planung, Bau und Betrieb von Schienenwegen nach AEG“ .....	258

# Abkürzungsverzeichnis

4QS	Vier-Quadrantensteller
a-Si	Amorphes Silicium Eine nichtkristalline, allotropische Form des reinen Halbleiters Silicium
AC	Wechselstrom
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
AK	Anwendungsklasse
AP	Arbeitspaket
AT	Österreich
BauGB	Baugesetzbuch
BBodSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten - Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BIPV	Building Integrated Photovoltaik Teilweise auch als GIPV Gebäudeintegrierte PV bezeichnet
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BnatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BSW	Bundesverband Solarwirtschaft
CdTe	Cadmiumtellurid Dünnschicht-Solarzellen
CIGS	Kupfer(Cu)-Indium(In)-Gallium(Ga)-Selen(Se) Dünnschicht-Solarzellen
CIS	Kupfer(Cu)-Indium(In)-Selen(Se) Dünnschicht-Solarzellen
CLS	Controllable Local System
dUrw	dezentrales Umrichterwerk
DB	Deutsche Bahn
DB RiL	Richtlinie der Deutschen Bahn AG
DE	Deutschland
EBA	Eisenbahn-Bundesamt

EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
ENS	ENS steht für Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten allpoligen Schaltern und ist Teil einer „selbsttätigen Freischaltstelle für Eigenerzeugungsanlagen“, gemäß DIN VDE 0126.
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EPC	Abkürzung für: Engineering-Procurement-Construction Erfahrener Auftragnehmer, der von der Planung/Projektierung über die Beschaffung der Komponenten bis zur Installation vertraglich das PV-Projekt realisiert
EU	Europäische Union
EURAC	Europäische Akademie Bozen
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
GB	Großbritannien
GWp	Gigawatt Peak Die Leistung von PV-Modulen wird als Maximalleistung (Peakleistung) bei STC angegeben.
IMEC	Interuniversity Microelectronics Centre, Löwen, Belgien
IT	Italien Informationstechnologie
Kst	Kuppelstelle
KWKG	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung - Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
kWp	Kilowatt Peak Die Leistung von PV-Modulen wird als Maximalleistung (Peakleistung) bei STC angegeben.
LBO	Landesbauordnung
LCOE	Stromgestehungskosten (Englisch: Levelized Cost of Electricity)
LID	Lichtinduzierte Degradation
LST	Leit- und Sicherungstechnik
LSW	Lärmschutzwand
MaStR	Marktstammdatenregister
MPP	Maximum Power Point - Punkt der maximalen Leistungsabgabe PV-Module können in verschiedenen Arbeitspunkten betrieben werden. Ziel ist es, Module im Punkt der maximalen Leistung zu betreiben. Abhängig von den Umgebungsbedingungen (Einstrahlung, Temperatur) verschiebt sich dieser Punkt.

MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
MWp	Megawatt Peak Die Leistung von PV-Modulen wird als Maximalleistung (Peakleistung) bei STC angegeben.
NA-Schutz	Netz- und Anlagenschutz
NABU	Naturschutzbund Deutschland
OSM	Open Street Map
PID	Potenzial induzierte Degradation Spezifische PV-Module können infolge des angelegten Potenzials eine Leistungsdegradation erfahren.
PVNB	Photovoltaic Noise Barrier – Lärmschutzwand (LSW)
RiL	Richtlinie
SMGW	Smart Meter Gateway
Sp	Schaltposten
STC	Standard Test Condition Standard-Test-Bedingungen sind definierte Testbedingungen (1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C), bei der die Modulparameter (Strom, Spannung, Leistung) ermittelt werden.
THD	Total Harmonic Distortion
TIFF oder kurz TIF	Tagged Image File Format
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
Uw	Unterwerk
Wp	Watt Peak Die Leistung von PV-Modulen wird als Maximalleistung (Peakleistung) bei STC angegeben.
Zes	Zentralschaltstelle Die Leitstellen, die für die 15-kV-Netzbetriebsführung eines bestimmten Bereiches zuständig sind, werden Zentralschaltstellen genannt. Anmerkung: Für das übergeordnete 110 kV/16,7 Hz Netz ist die DB HSL (Hauptschaltleitung) in Frankfurt Main zuständig.

# Begriffserklärung

Im Folgenden werden die in diesem Bericht verwendeten Begriffe kurz beschrieben.

3-m-Bereich	Gemäß EN 50121-5: Bereich entlang einer Bahnstrecke, der sich innerhalb eines Abstands von 3 m von der Mittellinie des nächstgelegenen Gleises zu beiden Seiten des Gleises befindet.
10-m-Bereich	Gemäß EN 50121-5: Bereich entlang einer Bahnstrecke, der sich innerhalb eines Abstands von 10 m von der Mittellinie des nächstgelegenen Gleises zu beiden Seiten des Gleises befindet.
dezentrales Umrichterwerk	Abkürzung: dUrw. Unterwerke mit statischen Umrichtern, die aus dem Landesnetz direkt in die Fahrleitung einspeisen.
Direkteinspeisung	Einspeisung der photovoltaisch erzeugten Energie direkt in ein bestehendes Elektrizitätsnetz (z. B. Fahrleitungsnetz der Bahn, 1 AC, 15 kV, 16,7 Hz) ohne weitere Transformationen über andere Netzformen (z. B. 3 AC, 400 V, 50 Hz).
Fahrleitung	Gemäß EN 50122-1: Leitersystem zur Versorgung von Fahrzeugen mit elektrischer Energie über Stromabnahmeeinrichtungen Anmerkung 1 zum Begriff: Es umfasst alle Leiter, die zur Stromabnahme nötig sind, sowie Stromschienen und beinhaltet Folgendes: <ul style="list-style-type: none"><li>- Verstärkungsleitungen;</li><li>- Schalterquerleitungen;</li><li>- Trennschalter;</li><li>- Streckentrenner;</li><li>- Überspannungsschutzeinrichtungen;</li><li>- Trageinrichtungen, die nicht von den Leitern isoliert sind;</li><li>- Isolatoren, die mit aktiven Teilen verbunden sind.</li></ul> Nicht zur Fahrleitung gehören: <ul style="list-style-type: none"><li>- Speiseleitungen;</li><li>- Erdseile und Rückleiter.</li></ul> Die Oberleitung dagegen ist gem. EN 50122-1 die oberhalb (oder seitlich) der oberen Fahrzeugbegrenzungslinie angebrachte Fahrleitung, die Fahrzeuge mit elektrischer Energie über eine auf dem Dach angebrachte Stromabnahmeeinrichtung versorgt.
Inselsystem, Inselbetrieb	Die PV-Anlage speist alleine, allenfalls unterstützt von einem Energiespeicher, die angeschlossenen Verbraucher. Eine andere Speisung der Verbraucher ist nicht vorhanden, abgesehen von dem allfällig vorhandenen Energiespeicher, der ebenfalls von der PV-Anlage geladen wird. Davon zu unterscheiden sind die Inselnetze, die es auch in einigen Teilen Deutschlands für die Bahnstromversorgung gibt. In einem solchen Inselnetz werden die Fahrleitungen eines vergleichsweise kleinen Bereichs mit 15 kV versorgt. Eine Synchronisation zum Landesnetz oder 110-kV-Netz der Bahn existiert nicht zwangsläufig.
IU-Kennlinie	Strom-Spannungskennlinie

Konzentrierende PV	Darunter versteht man PV-Module mit Konzentrator-Solarzellen (auch Konzentratorzellen genannt). Bei diesen wird das Sonnenlicht gebündelt, sodass es fokussiert auf die Zelle auftrifft. Damit erreicht man ca. die doppelte Leistung wie bei herkömmlichen Solarzellen.
Lichtinduzierte Degradation	Lichtinduzierte Degradation (LID) ist ein Leistungsverlust, der bei kristallinen Modulen bereits in den ersten Stunden der Sonneneinstrahlung auftritt.
MPP-Tracking	Maximum Power Point-Nachführung (tracking) PV-Module können in verschiedenen Arbeitspunkten betrieben werden. Ziel ist es, Module im Punkt der maximalen Leistung zu betreiben, der sich aber in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen (Einstrahlung, Temperatur) verschiebt. Durch kontinuierliche Nachführung des Arbeitspunktes sollen die angeschlossenen PV-Module im Punkt der maximalen Leistung gehalten werden. Üblicherweise ist das MPP-Tracking in den Wechselrichtern integriert.
Netz- und Anlagenschutz	Abkürzung: NA-Schutz. Schutzeinrichtung, in der alle Schutzfunktionen nach [1], Abschnitt 6.5 installiert sind.
netzparallele PV-Systeme	Parallel an ein Netz angeschlossene Anlagen, die in selbiges einspeisen. Die PV-Anlagen arbeiten somit parallel am Netz und können nicht selbständig im Inselbetrieb operieren oder die Netzparameter steuern.
Peak-Leistung	Maximalleistung, z. B. von PV-Modulen oder PV-Anlagen, die bei spezifischen Umweltparametern auftritt. In der PV-Branche wird die Maximalleistung üblicherweise mit den Pseudo-Einheiten Wp, kWp, MWp usw. angegeben.
PV-Anlage Solaranlage	Gesamte Anlage zu Erzeugung elektrischer Energie aus Sonnenlicht und Einspeisung in die Fahrleitung oder in ein anderes Elektrizitätsnetz.
PV-Generator Solargenerator	Zusammenschaltung (Reihen und/oder Parallelschaltung) von einem oder mehreren PV-Strings (bestehend aus PV-Modulen) zur Erzeugung elektrischer Energie.
PV-Modul Solarmodul	Modul, hauptsächlich bestehend aus miteinander verschalteten PV-Zellen, einschließlich ummantelndes Material (Glas, Folie, Rahmen etc.) und Anschlusstechnik (Anschlussdose, Anschlussleitungen). Siehe Kapitel 5.1.
PV-String Solarstring	Zusammenschaltung (Reihen und/oder Parallelschaltung) von einem oder mehreren PV-Modulen. Ein String wird von einem Stellglied, einem Wechselrichter belastet, der den Strom in dem String nach Optimierungskriterien und anderen Randbedingungen einstellt.
PV-Zelle Solarzelle	Halbleiter-Zelle, z. B. Si-Halbleiter, die bei Lichteinfall eine Spannung generiert. Siehe Kapitel 5.1.
Rückleitung	Gemäß EN 50122-1: Alle Leiter, die den vorgesehenen Pfad für den Bahnrückstrom bilden. Diese Leiter können z. B. sein: Fahrschienen, Rückleitungsstromschiene, Rückleiter, Rückleitungsanschlussleiter.
Standard Test Condition	Standard-Test-Bedingungen sind definierte Testbedingungen (1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C), bei der die Modulparameter (Strom, Spannung, Leistung) ermittelt werden.
Systemspannung	Unter Systemspannung versteht man die maximal zulässige Spannung gegen Erde bzw. zwischen den beiden elektrischen Polen.

Üblicherweise generiert ein PV-Modul an seinen Ausgangsklemmen eine Spannung von einigen 10 V bis gut über 100 V. Diese Spannung hängt von der Konstruktion (vor allem Art der PV-Zellen, Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen) und den Umgebungsbedingungen (vor allem Intensität der Sonneneinstrahlung, Temperatur, Strom) ab. Üblicherweise werden mehrere PV-Module in Reihe geschaltet, sodass eine Spannung von einigen hundert bis maximal 1500 V erzeugt werden. Die maximale Spannung muss unterhalb der Systemspannung liegen, um die Isolationseigenschaften der einzelnen Module nicht zu überlasten.

Tagged Image File Format	Dateiformat zur Speicherung von Bilddaten.
Vier-Quadrantensteller	Der Vier-Quadrantensteller (4QS) ist ein Stromrichter, der in den vier Quadranten eines Betriebsdiagramms betrieben werden kann. Im Bahnbereich wird der 4QS bei Fahrzeugen an der AC-Fahrleitung eingesetzt, um die fahrleitungsseitige Wechselspannung in eine Gleichspannung umzuformen. Er kann betrieben werden mit jeweils positiver und negativer Wirk- und Blindleistung.
Zentralschaltstelle	Die Leitstellen, die für die 15-kV-Netzbetriebsführung eines bestimmten Bereiches zuständig sind, werden Zentralschaltstellen genannt. Anmerkung: Für das übergeordnete 110 kV/16,7 Hz Netz ist die DB HSL (Hauptschaltleitung) in Frankfurt Main zuständig.

# Kurzbeschreibung

Zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele muss auch der Verkehrssektor seinen Beitrag leisten. Der Verkehrsträger Schiene weist durch den hohen Elektrifizierungsgrad und die hohe Nutzung regenerativer Energie auf der Verbraucherseite bereits eine günstige Bilanz an Treibhausgasemissionen auf. Mit Hilfe von Photovoltaik (PV) könnte der Anteil an regenerativer Energie am Bahnstrommix weiter erhöht werden.

Die TÜV Rheinland InterTraffic GmbH (TRIT) zusammen mit der TÜV Rheinland Solar GmbH (TR SOL) haben die vorliegende Studie im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamt (EBA) mit dem Ziel erstellt, das Potenzial von PV-Anwendungen an und in der Schieneninfrastruktur mit Fokus auf einer Direkteinspeisung in das Fahrleitungsnetz zu ermitteln.

## Anwendungsklassen

Für PV-Anwendungen an und in der Schieneninfrastruktur werden sechs Anwendungsklassen entsprechend des Installationsortes unterschieden:

- AK 1: Installation am oder im Gleisbett
- AK 2: Installation an oder in einer LSW
- AK 3: Installation an oder auf einem Lärmschutzwall
- AK 4: Installation an oder in bauliche Bahneinrichtungen
- AK 5: Installation neben dem Schienenweg
- AK 6: Sonstige Installationsorte

Jede der genannten Anwendungsklassen ist beschrieben, sowie die zu berücksichtigenden Besonderheiten dargestellt. Bereits realisierte Beispiele werden aufgezeigt. Die baulichen Gegebenheiten und besonderen Anforderungen im Bahnbereich werden analysiert und beschrieben.

## Hauptkomponenten einer PV-Anlage

Die Hauptkomponenten einer PV-Anlage umfassen den PV-Generator (PV-Module, Unterkonstruktion, DC-Verkabelung), die Umwandlungs- und Transformierungselemente (Wechselrichter, Transformator, AC-Verteilung/Verkabelung, Netzanbindung) und die Steuer- und Überwachungssysteme. Die Funktion, der Aufbau und die marktüblichen Technologien werden beschrieben. Es wird analysiert, welche Herausforderungen bei der Einbindung in die Schieneninfrastruktur zu erwarten sind und welche Modifikationen erforderlich sein können.

## Recherche zu bereits realisierten Projekten

Die Recherche zu bestehenden Projekten und Analysen zur PV-Integration in die Schieneninfrastruktur ergab eine große Zahl an internationalen Forschungsaktivitäten und Testprojekten im Zusammenhang mit der verstärkten Nutzung der PV im Bahnbetrieb. Der Schwerpunkt der recherchierten in Betrieb oder Bau befindlichen PV-Anwendungen zur Energieversorgung der Bahnen liegt bei größeren Freifeldsystemen und PV-Aufdachanlagen. Diese speisen überwiegend in das allgemeine 50-Hz-Netz ein. Auch das Thema Direkteinspeisung wurde untersucht und in kleineren Anwendungen getestet. Ebenso gibt es einige Testprojekte mit im Gleisbett integrierten PV-Systemen. Vor allem in Indien wird die ergänzende Energieversorgung der Züge über PV-Systeme auf den Dächern der Wagen in Testprojekten angewendet.

## **Anforderungen an PV-System in der Bahninfrastruktur und an die Direkteinspeisung**

Der Bahnbetrieb muss sicher, zuverlässig und ökonomisch sein. Dazu haben sich im Laufe der Zeit Anforderungen entwickelt, die für Prozesse, Anlagen und Komponenten im Bahnbereich und in entsprechenden Normen und Vorschriften dokumentiert sind. Diese für den Bahnbereich gültigen Regelungen sind zusätzlich zu den allgemein gültigen Regelungen zu erfüllen.

Der prinzipielle Aufbau einer PV-Anlage mit Direkteinspeisung in die Fahrleitung wird beschrieben, die hauptsächlichen Komponenten, deren Funktion und die wesentlichen an sie gestellten Anforderungen werden dargestellt. Die Direkteinspeisung erfordert besondere Berücksichtigung der Gewährleistung der Spannungsqualität der Einspeisung, der Beherrschung der Störströme und der Stabilität des Fahrleitungsnetzes.

## **Geeignete PV-System sowie mögliche Hersteller**

Die Verfügbarkeit geeigneter PV-Systemkomponenten, sowie infrage kommende Hersteller und Projektbeteiligte bei aktuellen Entwicklungen wurde untersucht und aufgezeigt. Für PV-Generatoren, Unterkonstruktion und AC/DC-Verkabelungen stehen für die meisten beschriebenen Anwendungsfälle geeignete Komponenten zur Verfügung oder können mit überschaubarem Anpassungsaufwand entsprechend modifiziert werden. Anders verhält es sich bei den Umwandlungs- und Transformierungselementen, insbesondere beim Wechselrichter für die Direkteinspeisung in das 15 kV, 16,7 Hz Fahrleitungsnetz. Momentan sind keine geeigneten Systeme am Markt erhältlich.

## **Beispielhafte Systemauslegung und Abschätzung der Kosten**

Aufbauend auf den bisher erzielten Ergebnissen wurde eine mögliche Systemauslegung für jede identifizierte PV-Anwendungsklasse spezifiziert. Die sechs Anwendungsklassen wurden neben den absoluten Erträgen über drei spezifische Kenngrößen leistungsspezifischer Energieertrag (in kWh/kWp), längenspezifischer Energieertrag (in kWh/km) und flächenspezifischer Energieertrag (in MWh/ha) verglichen und bewertet.

Ausgehend von den veröffentlichten durchschnittlichen LCOE für PV-Standardsysteme in Deutschland, die in das öffentliche drei-phägige Landesnetz einspeisen, wurden auf Basis von durchschnittlichen Kostenbestandteilen und Expertenmeinung die erforderlichen Mehrkosten für die Integration in das Bahn- system für die beschriebenen Anwendungsklassen abgeschätzt. Es wird jeweils eine Spanne von zu erwartenden LCOE angegeben. Nicht berücksichtigt dabei wurden die Aufwendungen für Entwicklung und Zulassung. Für die Anwendungsklassen Freifeldsysteme und Aufdachanlagen mit der angenommenen Verwendbarkeit von Standardkomponenten für den PV-Generator werden die geringsten Mehrkosten und auch die niedrigsten LCOE erwartet.

## **Ermittlung der geeigneten Flächen und des Einspeisepotenzials**

Zur Quantifizierung des technischen PV-Potenzials wurden die vorhandenen, für PV-Anwendungen nutzbaren Flächen der DB an und in der Schieneninfrastruktur Deutschlands, die dort installierbaren Einspeiseleistungen und erzielbaren Einspeiseenergien ermittelt. Dazu wurden die Designanforderungen für geeignete PV-Systeme spezifiziert. Anhand darauf aufbauender Kriterien wurden von den verfügbaren Flächen solche ausgeschlossen, die offensichtlich nicht wirtschaftlich sinnvoll für PV nutzbar sind.

Auf Grundlage der vorhandenen Informationen und der definierten Kriterien erfolgte die rechnergestützte Ermittlung und Auswertung der theoretischen und technisch sinnvoll nutzbaren PV-Potenziale in der Schieneninfrastruktur. Nachdem die theoretisch geeigneten und die technisch-wirtschaftlich zu

bevorzugenden Flächen und Strecken bestimmt wurden, erfolgte die Ermittlung des Einspeisepotenzials. Die Berechnung orientierte sich an validierten Modellen, die bei der Energieertragsberechnung von PV-Systemen zur Anwendung kommen. Zu erwarten ist eine installierbare Gesamtleistung von 420 MWp – 3220 MWp, die zu einem jährlichen Erzeugungspotenzial zwischen 380 GWh und 2940 GWh führt. Die Anzahl der zu realisierenden Anlagen bewegt sich zwischen 12800 und 27250. In Abbildung 1 werden die Energieerzeugungspotenziale dreier Szenarien in Abhängigkeit ihrer LCOE und technisch-wirtschaftlichen Machbarkeit dargestellt. Während in Szenario A geringe Kosten und eine schnelle Umsetzung dominieren, sind in Szenario B bei geringfügig höheren Kosten signifikant höhere Energieerträge zu erwarten. Szenario C gilt aufgrund der hohen Kosten und fehlenden Technologiereife aktuell als unwahrscheinlich.

### Einspeisung in die Fahrleitung

Zur Einspeisung der PV-Leistung in die Fahrleitung sind bestimmte Randbedingungen wie z. B. die Leistungsfähigkeit der beteiligten Komponenten oder die maximal zulässige Fahrleitungsspannung zu berücksichtigen. In den meisten Fällen ist die Leistungsfähigkeit der Komponenten selbst bei maximal denkbarem Ausbau mit PV-Anlagen ausreichend groß. Der Energie- und Leistungsbezug von den im Speiseabschnitt verkehrenden Fahrzeugen reduziert die Belastung der Komponenten und die Fahrleitungsspannung. Diese Umstände sind jeweils bei der konkreten Planung einer PV-Anlage mit Einspeisung in die Fahrleitung zu untersuchen und zu berücksichtigen. In die Fahrleitung insgesamt eingespeiste Leistung und Energie nach Szenario B können bei entsprechender Verteilung in der Fläche vom Zugverkehr aufgenommen werden.

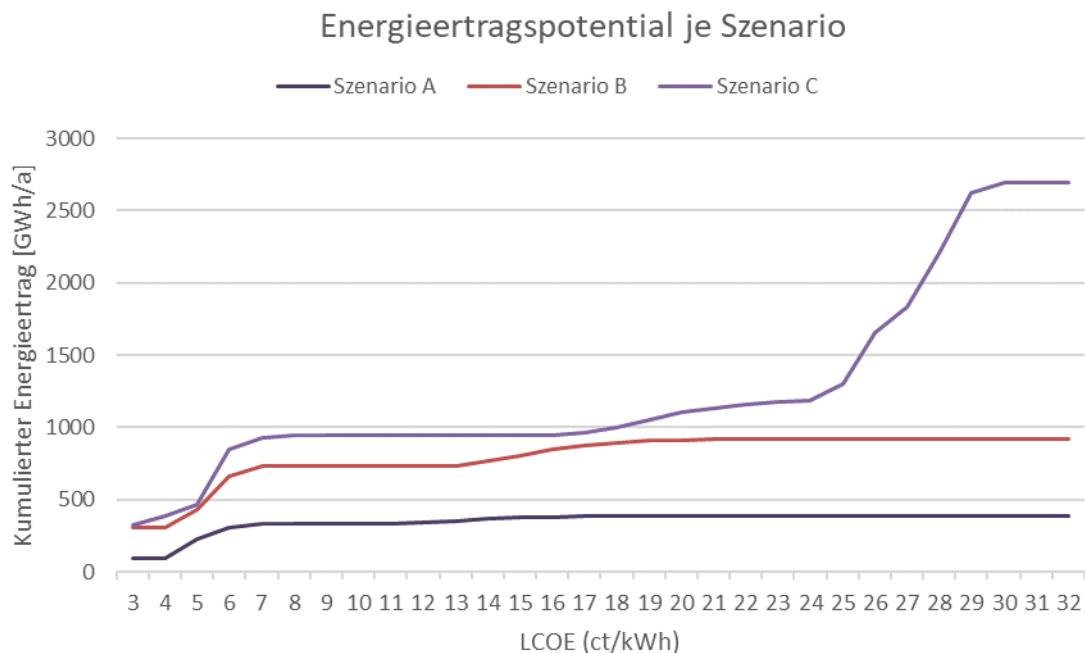


Abbildung 1: Energieerzeugungspotenzial von drei Szenarien mit LCOE . Quelle: TÜV Rheinland

### Erzeugungsnahe interne Verbraucher

Erzeugungsnahe interne Verbraucher wurden identifiziert. Abgesehen von Fahrzeugen (Installation der PV-Module auf dem Fahrzeugdach) sind vor allem Verbraucher innerhalb von Gebäuden signifikante Abnehmer der PV-Energie. Hierzu ist vorgeschlagen, die PV-Energie in den 50-Hz-Netzanschluss dieser

Gebäude einzuspeisen. Die internen Verbraucher werden so durch die von den PV-Anlagen zur Verfügung gestellten Energie versorgt, überschüssige Energie wird in das Versorgungsnetz eingespeist.

### **Anforderungen der bestehenden Bahninfrastruktur und bahnunabhängige Regelwerke**

Wesentliche Anforderungen an die in die Bahninfrastruktur zu integrierenden PV-Anlagen sind die in den RiL der Deutschen Bahn (DB RiL) enthaltenen Vorschriften. Die relevanten RiL wurden identifiziert und die Inhalte kurz benannt. Die Ergebnisse sind im Anhang II in tabellarischer Form mit Kommentaren, Hinweisen und Anmerkungen versehen. Es sind die RiL benannt, die aufgrund der möglichen Einführung von PV-Anlagen mit Direkteinspeisung in die Oberleitung fortgeführt und ergänzt werden sollten. Keine der RiL steht einer Integration von PV-Anwendungen in der Infrastruktur entgegen.

Neben den Regelwerken der Bahn sind ebenfalls die bahnunabhängigen Regelwerke zu berücksichtigen. Diese sind insbesondere die allgemein gültigen technischen Regelwerke, gesetzliche Regelungen bezüglich der PV-Netzanbindung und Energievermarktung, Regelungen zu Natur- und Umweltschutz und baurechtliche Vorgaben. Die wesentlichen Anforderungen in Bezug auf PV-Anwendung werden dargestellt.

### **Expertenwissen**

Zur Identifikation weiterer, bisher noch nicht berücksichtigter Anforderungen wurden Bahnexpertinnen und -experten in Interviews befragt. So konnte ein umfassendes Wissen zusammengestellt werden. Damit sind für Planung, Bau und Betrieb der PV-Anlagen in der Bahninfrastruktur viele wesentliche Aspekte aufgezeigt worden, die bei einer PV-Integration in das Bahnnetz berücksichtigt werden müssen, um einen erfolgversprechenden Bau und Betrieb der Anlagen zu ermöglichen.

Die Anwendungsklasse „Installation im Gleisbett“ ergibt aufgrund der großen vorhandenen Fläche ein hohes energetisches Potenzial. Es ergeben sich jedoch sehr hohe Anforderungen, insbesondere an die Robustheit der PV-Module und bezüglich der Wartung und Inspektion der Gleisanlagen. Dadurch besteht ein hohes, bisher kaum abschätzbares Risiko. Ebenfalls sehr hohe Anforderungen bestehen für die Anwendungsklasse „An oder in einer LSW“. Neben der erforderlichen Robustheit der PV-Systeme ist die Inspizierbarkeit der LSW ein wesentlicher, zu berücksichtigender Aspekt. Für die Integration von PV-Anlagen auf einem Lärmschutzwall und neben dem Schienenweg sind vergleichsweise geringe bahnspezifische Anforderungen zu erfüllen. Diese Anlagen können sicherlich vielfach als weitestgehend unabhängig von der Bahninfrastruktur betrachtet werden. Ähnliches gilt für die Installation an oder auf Gebäuden.

Eine Herausforderung stellt noch die Einspeisung der PV-Energie in die Oberleitung dar. Hier besteht Forschungsbedarf, insbesondere die Themen Schutz der Fahrleitung, Leistungsregelung, Netzstabilität und EMV sind zu betrachten. Zusätzlich ist die Oberleitung mit ihrer vergleichsweise geringen Spannung nicht für den Transport elektrischer Leistung über größere Distanzen geeignet. Viele Fachexperten empfehlen generell, die PV-Energie möglichst in das 50-Hz-Drehstromnetz einzuspeisen.

Bevor die PV-Anwendung in der Schieneninfrastruktur in größerem Maße eingeführt wird, sollten zunächst Pilot-Anlagen an Stellen aufgebaut werden, an denen möglichen negativen Auswirkungen, sowohl auf den Bahnbetrieb als auch auf die PV-Anlagen, als gering erwartet werden können. Mit den gesammelten Erfahrungen und daraus folgenden eingeführten Verbesserungen können die PV-Anwendungen weiter in die Fläche gehen, bis der sinnvolle Ausbaugrad bzgl. Ökonomie und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck erreicht ist.

# Abstract

The transport sector must also make its contribution to achieving national climate protection targets. Due to the high degree of electrification and the high use of renewable energy on the consumer side, rail transport already has a favorable balance of greenhouse gas emissions. With the help of photovoltaics (PV), the proportion of renewable energy in the traction current mix could be further increased.

TÜV Rheinland InterTraffic GmbH (TRIT) together with TÜV Rheinland Solar GmbH (TR SOL) have prepared this study on behalf of the German Federal Railway Authority (EBA) with the aim of determining the potential of photovoltaic applications in the railway infrastructure with a focus on direct feed-in into the overhead line network.

## Application classes (AK)

For PV applications in the rail infrastructure, six application classes (AK) are differentiated according to the installation location:

- AK 1: installation on or in the track bed
- AK 2: installation on or in a noise barrier wall
- AK3: installation on or in a noise barrier embankment
- AK 4: installation on or in railway buildings
- AK 5: installation next to the track
- AK 6: other installation locations

Each listed application class is described and the special features to be taken into account are shown. Examples that have already been implemented are shown. The structural conditions and special requirements in the railroad sector are analyzed and described.

## Main components of a PV system

The main components of a PV system include the PV generator (PV modules, substructure, DC cabling), the conversion and transformation elements (inverter, transformer, AC compartments/cabling, grid connection) and the control and monitoring systems. The function, design and standard market technologies are described. It is analyzed what challenges are to be expected when integrating into the rail infrastructure and what modifications may be necessary.

## Research into projects that have already been implemented

The research on existing projects and analyses on PV integration into the rail infrastructure revealed a large number of international research activities and test projects in connection with the increased use of photovoltaics in rail operations. The focus of the researched PV applications in operation or under construction for the energy supply of railroads is on larger free-field systems and PV rooftop systems. These predominantly feed into the general 50 Hz grid. The topic of direct feed-in has also been investigated and tested in smaller applications. There are also some test projects with PV systems integrated into the track bed. In India in particular, the supplementary energy supply for trains via PV systems on the roofs of the vehicles is being used in test projects.

## **Requirements for PV systems in the railroad infrastructure and for direct feed-in**

Rail operations must be safe, reliable and economical. Over the course of time, requirements have been developed for processes, systems and components in the railroad sector and documented in corresponding standards and regulations. These regulations applicable to the railroad sector must be fulfilled in addition to the generally applicable ones.

The basic structure of a PV system with direct feed-in into the overhead contact line is described, the main components, their function and the main requirements placed on them are described. The direct feed-in requires special consideration to ensure the voltage quality of the feed-in, the control of interference currents and the stability of the overhead line network.

## **Suitable PV system and possible manufacturers**

The availability of suitable PV system components, as well as possible manufacturers and project participants in current developments were investigated and identified. For PV generators, substructures and AC/DC cabling, suitable components are available for most of the applications described or can be modified accordingly with manageable adaptation effort. The situation is different for the conversion and transformation elements, in particular the inverter for direct feed-in into the 15 kV, 16.7 Hz overhead line network. There are currently no suitable systems available on the market.

## **Exemplary system design and estimation of costs**

Based on the results obtained so far, a possible system design was specified for each identified PV application class. In addition to the absolute yields, the six application classes were compared and evaluated using three specific parameters: power-specific energy yield (in kWh/kWp), length-specific energy yield (in kWh/km) and area-specific energy yield (in MWh/ha).

Based on the published average LCOE for standard PV systems in Germany that feed into the public three-phase national grid, the additional costs required for integration into the rail system for the application classes described were estimated on the basis of average cost components and expert opinion. In each case, a range of expected electricity production costs is given. The expenses for development and approval were not taken into account. The lowest additional costs and also the lowest LCOE are expected for the application classes of free-field systems and rooftop systems with the assumed usability of standard components for the PV generator.

## **Determination of suitable areas and of feed-in potential**

In order to quantify the technical PV potential, the existing areas of DB in the German railway infrastructure that could be used for PV applications, the feed-in capacities that could be installed there and the achievable feed-in energies were determined. For this purpose, the design requirements for suitable PV systems were specified. Based on this, criteria were used to exclude from the available areas those that were obviously not economically viable for photovoltaics.

Based on the available information and the defined criteria, a computer-aided determination and evaluation of the theoretical and technically feasible PV potential in the rail infrastructure was carried out. Once the theoretically suitable and technically and economically preferable areas and routes had been determined, the feed-in potential was calculated. The calculation was based on validated models that are used to calculate the energy yield of PV systems. A total installable output of 420 MWp - 3220 MWp can be expected, resulting in an annual generation potential of between 380 GWh and 2940 GWh. The number of systems to be realized ranges between 12800 and 27250. Figure 1 shows the energy generation potential of three scenarios depending on their LCOE and technical and economic feasibility. While

low costs and rapid implementation dominate in scenario A, significantly higher energy yields can be expected in scenario B with slightly higher costs. Scenario C is currently considered unlikely due to the high costs and lack of technological maturity.

### Feeding into the overhead line

In order to feed the PV power into the overhead line, certain boundary conditions must be taken into account, such as the performance of the components involved or the maximum permissible overhead line voltage. In most cases, the capacity of the components is sufficiently high even with the maximum conceivable expansion with PV systems. The energy and power drawn from the vehicles operating in the feeder section reduces the load on the components and the overhead contact line voltage. These circumstances must be examined and taken into account when planning a PV system with feed-in into the overhead line. The total power and energy fed into the overhead line according to scenario B can be absorbed by the train traffic if distributed over the area accordingly.

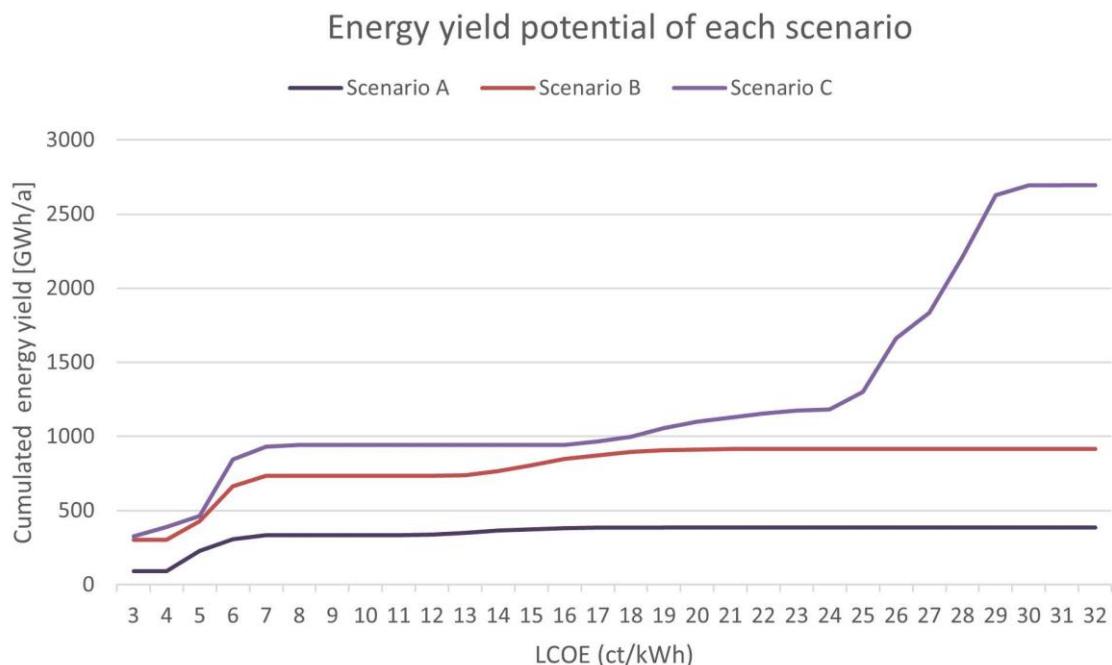


Figure 1: Energy generation potential of three scenarios with LCOE. Source: TÜV Rheinland

### Internal consumers close to generation

Generation-related internal consumers were identified. Apart from vehicles (installation of PV modules on the vehicle roof), consumers within buildings in particular are significant consumers of PV energy. It is proposed to feed the PV energy into the 50 Hz grid connection of these buildings. The internal consumers are thus supplied by the energy provided by the PV systems, while surplus energy is fed into the supply grid.

### Requirements of existing railway infrastructure and Railway-independent regulations

The main requirements for the PV systems to be integrated into the railroad infrastructure are the regulations contained in the Deutsche Bahn guidelines (DB RiL). The relevant guidelines were identified and the contents briefly named. The results are presented in Annex II in tabular form with comments, notes

and remarks. The directives that should be continued and supplemented due to the possible introduction of PV systems with direct feed-in to the overhead line are named. None of the guidelines prevent the integration of PV applications in the infrastructure.

In addition to the railroad regulations, non-railway regulations must also be taken into account. These are, in particular, the generally applicable technical regulations, statutory regulations regarding PV grid connection and energy marketing, regulations on nature and environmental protection and building regulations. The main requirements relating to PV applications are presented.

### **Expert knowledge**

Railroad experts were interviewed to identify further requirements that had not yet been considered. This enabled comprehensive expert knowledge to be compiled. As a result, many key aspects have been identified for the planning, construction and operation of PV systems in the railroad infrastructure, which must be taken into account when integrating PV into the railroad network in order to ensure the successful construction and operation of the systems.

The "installation in the track bed" application class has a high energy potential due to the large area available. However, there are very high requirements, particularly with regard to the robustness of the PV modules and the maintenance and inspection of the track systems. As a result, there is a high risk that can hardly be estimated. There are also very high requirements for the application class "On or in a noise barrier wall". In addition to the required robustness of the PV systems, the inspectability of the noise barrier wall is a key aspect that must be taken into account. For the integration of PV systems on a noise barrier embankment and next to the track, comparatively low railway-specific requirements must be met. In many cases, these systems can certainly be regarded as largely independent of the railroad system. The same applies to installation on or near railway buildings.

Feeding PV energy into the overhead line still poses a challenge. There is a need for research here, in particular the topics of overhead line protection, power regulation, grid stability and EMC need to be considered. In addition, the overhead line with its comparatively low voltage is not suitable for transporting electrical power over long distances. Many experts generally recommend feeding PV energy into the 50 Hz three-phase grid wherever possible.

Before PV applications are introduced on a large scale in the railway infrastructure, pilot systems should first be set up at locations where possible negative effects, both on rail operations and on the PV systems, can be expected to be minimal. With the experience gained and the resulting improvements introduced, PV applications can be rolled out further until the appropriate level of expansion in terms of economy and CO<sub>2</sub> footprint has been reached.

# 1 Einleitung

Die Projektbearbeitung erfolgte in drei Arbeitspaketen, die in den nachfolgenden Kapiteln detailliert dargestellt werden. Die in den Arbeitspaketen gewonnenen Inhalte wurden jeweils einem forschungsbegleitenden Arbeitskreis, der aus mehreren Fachexpertinnen und -experten bestand, vorgestellt. Die Ergebnisse der Diskussionen mit dem forschungsbegleitenden Arbeitskreis sind ebenfalls in den vorliegenden Bericht eingeflossen.

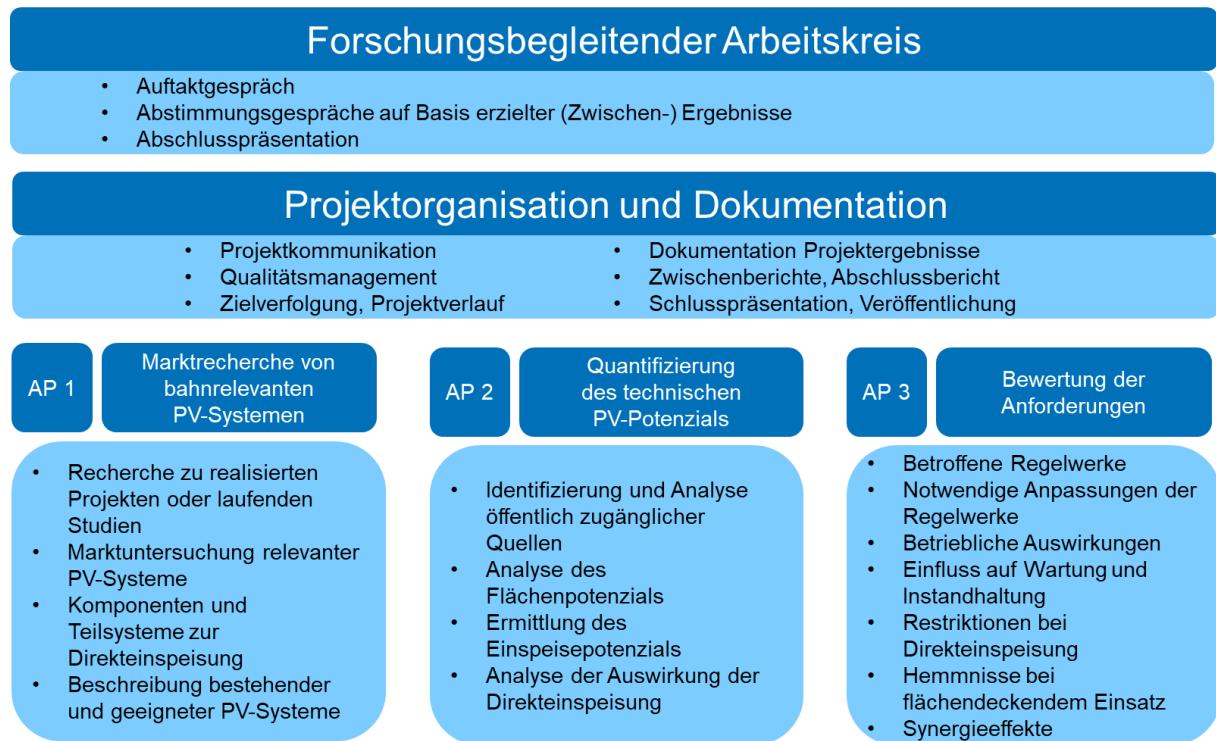


Abbildung 2: Projektstruktur. Quelle: TÜV Rheinland

Abbildung 2 zeigt die Projektstruktur und den Aufbau der einzelnen Arbeitspakete. Die Arbeitspakete AP 1 bis AP 3 wurden sukzessive abgearbeitet.

## 2 Methodisches Vorgehen

Eine der wesentlichen Aufgaben im Rahmen dieses Forschungsprojektes und Gegenstand des ersten Arbeitspakets ist die systematische Untersuchung der für den Einsatz an oder in der Schieneninfrastruktur relevanten PV-Systeme inklusive aller notwendigen Komponenten. Die Untersuchung erstreckt sich auf am weltweiten Markt verfügbare PV-Systeme und auf Systeme, die weltweit an oder in der Schieneninfrastruktur erprobt werden oder wurden. Beispiele für PV an oder in der Schieneninfrastruktur sind fahrwegintegrierte PV-Module im Gleisbett oder an Lärmschutzwänden angebrachte oder integrierte PV-Module (vertikal oder angewinkelt).

Gegenüber konventionellen PV-Systemen besteht hier die besondere Anforderung der Direkteinspeisung in das 15-kV-Fahrleitungsnetz. Die dazu notwendigen Komponenten werden als zum PV-System zugehörig betrachtet und sind in die Untersuchung integriert. Ziel dieses Arbeitspakets ist die Ermittlung und Beschreibung bestehender und geeigneter PV-Systeme.

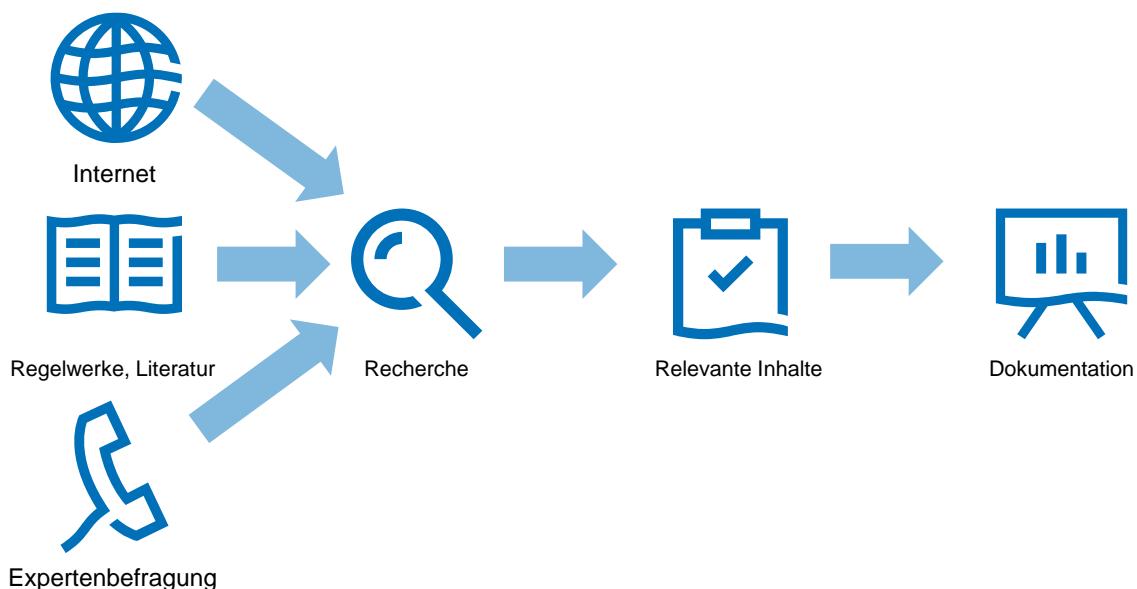


Abbildung 3: Ablaufprozess. Quelle: TÜV Rheinland

Die im vorliegenden Bericht beschriebene Marktrecherche wurde systematisch mittels einer klar definierten Abfolge von Arbeitsschritten durchgeführt:

1. Zunächst wurden geeignete Informationsquellen identifiziert. Hierbei lag der Fokus auf den relevanten Regelwerken, Literatur, Internet und möglichen TÜV-internen Erfahrungsträgern sowie weiteren Expertinnen und Experten auf Seiten von Herstellern, Projektentwicklern, Fachgesellschaften, Hochschulen und wissenschaftlichen Instituten.
2. Im nächsten Schritt wurden die identifizierten Informationsquellen gesichtet und die jeweils angestrebten Inhalte/Informationen eruiert. Dabei wurden die gewonnenen Informationen bereits inhaltlich eingeordnet und den in Tabelle 1 angegebenen Arbeitspaket-Unterpunkten (AP 1.1 – AP 1.9) zugeordnet.
3. Im Anschluss wurden die erarbeiteten Ergebnisse in den ebenfalls in Tabelle 1 referenzierten Kapiteln/Abschnitten im vorliegenden Bericht dokumentiert.

TABELLE 1: MARKTRECHERCHE – METHODISCHES VORGEHEN, ÜBERSICHT

Arbeitspa- ket	Thema	Referenz
<b>AP 1.1</b>	Bahnseitigen bauliche Voraussetzungen	Kap. 4
<b>AP 1.2</b>	Aufbau einer PV-Anlage - Hauptkomponenten	Kap. 5
<b>AP 1.3</b>	Bereits realisierte Projekte oder laufende Studien	Kap. 6
<b>AP 1.4</b>	Anforderungen an PV-Systeme in der Schieneninfrastruktur	Kap. 7
<b>AP 1.5</b>	Anforderungen an die elektrische Einspeisung	Kap. 8
<b>AP 1.6</b>	Geeignete PV-Systeme, Bauteilkomponenten und Teilsysteme zur Direk- teinspeisung	Kap. 9
<b>AP 1.7</b>	Mögliche Hersteller und Entwickler	Kap. 9
<b>AP 1.8</b>	Beispielhafte Erarbeitung u. Auslegung möglicher PV-Systeme	Kap. 10
<b>AP 1.9</b>	Abschätzung der Kosten für die Basis-Systeme	Kap. 11

Zur Quantifizierung des technischen PV-Potenzials werden im Arbeitspaket 2 die vorhandenen, für PV-Anwendungen nutzbaren Flächen an und in der Schieneninfrastruktur Deutschlands, die dort installierbaren Einspeiseleistungen und erzielbaren Einspeiseenergien ermittelt.

Zunächst wurden die verfügbaren oder zugänglichen Quellen, wie z. B. Deutschen Bahn (DB)-Datenbanken, Kartierungen der LSW, Kartierungen der Strahlungsintensität ermittelt und die Qualität der darin enthaltenen Daten bewertet. Auf Basis der in Arbeitspaket 1 definierten Anwendungsklassen für PV-Systeme in der Schieneninfrastruktur und die dafür entwickelten Basis-PV-Systeme, wurden Designanforderungen für wirtschaftlich langfristig sinnvoll einsetzbare PV-Systeme entwickelt, deren Kriterien in die Entwicklung der Methodik zur Ermittlung des PV-Potenzials eingearbeitet wurden.

Im Anschluss wurden zunächst die in der Bahninfrastruktur vorhandenen und gemäß den Kriterien geeigneten Flächen ermittelt (Kap. 16), daraus das installierbare PV-Potenzial je Anwendungsklasse abgeleitet, auf dessen Basis das Potenzial an erzeugbarer elektrischer Energie berechnet wurde.

Es wurde die Anbindung der PV-Systeme an die Fahrleitung untersucht und die von diesen Systemen zu erfüllenden Bedingungen aufgeführt. Weiterhin wurden erzeugungsnahe, interne Verbraucher identifiziert und die Möglichkeit der direkten Anbindung an die PV-Anlagen betrachtet.

In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Arbeitsschritte aufgeführt.

---

TABELLE 2: QUANTIFIZIERUNG DES TECHNISCHEN PV-POTENZIALS – METHODISCHES VORGEHEN, ÜBERSICHT

Arbeits- schritt	Thema	Referenz
<b>AP 2.1</b>	Recherche der heranzuziehenden Datenquellen	Kap. 12
<b>AP 2.2</b>	Verifikation der Daten	Kap. 13
<b>AP 2.3</b>	Designanforderungen für geeignete PV-Systeme	Kap. 14
<b>AP 2.4</b>	Methode	Kap. 15
<b>AP 2.5</b>	Ermittlung der geeigneten Flächen	Kap. 16
<b>AP 2.6</b>	Ermittlung des Einspeisepotenzials	Kap. 17
<b>AP 2.7</b>	Anbindung an das Bahnenergieversorgungssystem	Kap. 18
<b>AP 2.8</b>	Anbindung erzeugungsnaher interner Verbraucher	Kap. 19

Im dritten und letzten Arbeitspaket (Arbeitspaket 3) werden die Anforderungen an die PV-Systeme und deren Integration in die Bahninfrastruktur unter Berücksichtigung der Einspeisung in die Oberleitung detaillierter untersucht.

Zunächst wurden die anzuwendenden Regelwerke zu Bahnanlagen analysiert. Für Deutschland sind dies die RiL der Deutschen Bahn als Betreiber der Schieneninfrastruktur. Es wurden die RiL identifiziert, die von Relevanz für die Integration von PV-Anlagen in die Schieneninfrastruktur und deren Betrieb sind. Die Inhalte werden kurz benannt und auf Aspekte hingewiesen, um die die RiL aufgrund der noch nicht berücksichtigten PV-Anlagen ggf. fortgeschrieben werden sollten.

Bahnunabhängige Regelwerke sind für PV-Anlagen in der Bahninfrastruktur ebenfalls anzuwenden. Hier sind insbesondere allgemein gültige technische Regelwerke, gesetzliche Regelungen bezüglich der PV-Netzanbindung und Energievermarktung, Regelungen zu Natur- und Umweltschutz und baurechtliche Vorgaben zu berücksichtigen. Die wesentlichen Anforderungen werden kurz benannt.

Zur Identifikation weiterer Anforderungen, sei es aus bisher noch nicht berücksichtigten Regelwerken oder aufgrund langjähriger beruflicher und betrieblicher Erfahrungen, wurden Bahnexperten in Interviews befragt. Die sich ergebenden Auswirkungen, einerseits auf die bestehende Bahninfrastruktur und andererseits auf die PV-Anlagen, die daraus resultierenden Einschränkungen und Hemmnisse sowie mögliche Synergien wurden in den Interviews angesprochen.

In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Arbeitsschritte aufgeführt.

TABELLE 3: BEWERTUNG DER ANFORDERUNGEN – METHODISCHES VORGEHEN, ÜBERSICHT

Arbeits-schritt	Thema	Referenz
<b>AP 3.1 und AP 3.4</b>	Anzuwendende Regelwerke zu Bahnanlagen, Empfehlung für die Fortschreibung von Regelwerken zu Bahnanlagen aufgrund bisher nicht berücksichtigter PV-Anlagen	Kap. 20 und Anhang I
<b>AP 3.2</b>	Weitere bahnunabhängige Regelwerke	Kap. 21
<b>AP 3.3</b>	Auswirkungen, Einschränkungen, Hemmnisse, Synergien	Kap. 22

## 3 Kurzeinführung PV-Technik

Bevor in den nachfolgenden Kapiteln detailliert auf das Design von PV-Anlagen und den Anforderungen auf solche Systeme eingegangen wird, soll an dieser Stelle zunächst einleitend die grundlegende Aufgabe und der Aufbau von PV-Anlagen kurz skizziert werden.

Eine PV-Anlage wandelt solare Strahlung bzw. solare Energie in elektrische Energie um. Die dafür benötigten Solarzellen produzieren systembedingt Gleichstrom. Um den Solarstrom in nutzbaren Wechselstrom umzuwandeln, werden Umwandlungselemente (Wechselrichter) benötigt. Für die Bereitstellung der jeweils gewünschten bzw. erforderlichen Spannung sind weitere Transformierungselemente erforderlich.

Der grundsätzliche Aufbau von PV-Anlagen ist bei allen Anlagen ähnlich und beinhaltet die folgende Hauptkomponenten:

- PV-Module mit einer bestimmten Anzahl von Solarzellen
- Unterkonstruktion und Befestigungselemente/-system für die PV-Module
- Umwandlungs- und Transformierungselemente
- Kabel und Leitungen
- Steuerungs- und Überwachungssysteme

Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer üblicher oder möglicher Komponenten wie Unterverteilungen, Überstrom-, Überspannungsschutz, elektr. Trenneinrichtungen, Energiezähler, Wetterstation und ggf. Lastmanagementsysteme, die in diesem Dokument nicht detailliert behandelt werden können. Dort gelten die üblichen Regelwerke. Bei der Potenzialanalyse haben diese Baugruppen und Komponenten keine besondere Relevanz.

Eine prinzipielle Unterscheidung von PV-Anlagen kann wie folgt vorgenommen werden:

- Gleichspannungssysteme
- Wechselspannungssysteme
- Inselsysteme zur Stromversorgung z. B. in abgelegenen Orten

Insel- und Gleichspannungssysteme werden im vorliegenden Bericht nicht weiter betrachtet, da nur der netzparallele Anwendungsfall (die Direkteinspeisung) Bestandteil dieser Studie ist. Aus diesem Grunde werden Energiespeichersysteme ebenfalls nicht betrachtet.

## 4 Bahnseitige bauliche Voraussetzungen

Für die Installation oder die Integration von PV-Systemen an und in der Schieneninfrastruktur sind grundsätzlich verschiedene Installationsorte möglich. Es werden im Folgenden 6 Anwendungsklassen entsprechend des definierten Installationsortes unterschieden:

1. Im oder am Gleisbett (2 Varianten waren zum Zeitpunkt der Recherche am Markt bekannt: in Schwelle integriert oder aufgesetzt)
2. LSW (3 Varianten: in die Wand integriert, oben aufgesetzt, vorgehängt)
3. Lärmschutzwand (2 Varianten: Nutzung einer vorhandenen Böschung oder angepasste Unterkonstruktion)
4. Bauliche Bahneinrichtungen (Bahnhöfe oder andere Bahngäbude, Überdachungen an z. B. Parkplätzen, Bahnsteigen u. a.)
5. Neben dem Schienenweg (Freiflächen - Nutzung bahneigener Flächen oder mit Lieferverträgen)
6. Sonstige Anwendungen (z. B. an Brücken, Geländern, Signaleinrichtungen, Wagendach)

Nachfolgend werden die baulichen Gegebenheiten in der Bahninfrastruktur auf Ihren Einfluss für die technisch und wirtschaftlichen Randbedingungen zur Installation von PV-Systemen untersucht. Die PV-Systeme sollen einerseits den normalen Bahnbetrieb nicht stören und andererseits soll der Bahnbetrieb auch keine signifikante Einwirkung auf die Energieerzeugung der PV-Systeme haben. Folgende bahnseitige bauliche Gegebenheiten wurden betrachtet.

### 4.1 Bauliche Gegebenheiten

#### 4.1.1 Abstand vom Gleiskörper

Um sicherzustellen, dass nebeneinander fahrende Schienenfahrzeuge aufgrund ihrer vorgegebenen Dimensionen nicht miteinander kollidieren und es andererseits im störungsfreien Betrieb nicht zu Kollisionen von Schienenfahrzeugen mit Teilen der Infrastruktur (z. B. Fahrleitungskomponenten, Signaleinrichtungen, baulichen Einrichtungen etc.) kommen kann, müssen entsprechende Abstände konstruktiv vorgenommen bzw. eingehalten werden. In diesem Zusammenhang sind im Bahnsektor eine Reihe unterschiedlicher Begriffe geläufig, und die für diesen Forschungsbericht wichtigsten Begriffe sollen an dieser Stelle kurz erläutert und voneinander abgegrenzt werden:

- Gleisabstand
- Begrenzungslinie
- Lichtraum

Bei dem Gleisabstand handelt es sich um den Abstand zwischen den Mittelachsen zweier benachbarter Gleise, gemessen parallel zur Lauffläche des Referenzgleises, d. h. des Gleises mit der geringsten Überhöhung. Dieser Begriff ist folgerichtig für den vorliegenden Forschungsauftrag von untergeordneter Bedeutung, da PV-Anlagen zwischen zwei benachbarten Gleisen nicht in größerem Maßstab vorgesehen bzw. als nicht praktikabel angesehen werden. Es soll an dieser Stelle jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass in Deutschland laut Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO, [2]) ein Gleisabstand von mindestens 4 m, für Streckengleise und durchgehende Hauptgleise in Bahnhöfen ohne Zwischenbahnsteig, vorgeschrieben ist. Der Gleismittenabstand ist in Abhängigkeit von der Begrenzungslinie zu bestimmen.

Die Begrenzungslinie hingegen stellt einen Vorschriftenkomplex dar, welcher eine Bezugslinie und ihre zugehörigen Rechenregeln umfasst und mit dem die äußeren Abmessungen der Fahrzeuge und der von der Infrastruktur freizuhaltende Raum festgelegt werden.

Im Vergleich zu den beiden vorgenannten Begriffen ist der Begriff „Lichtraum“ von besonderer Bedeutung für die im vorliegenden Bericht beschriebene Studie. Der Lichtraum, oder der oftmals verwendete Begriff „Lichtraumprofil“ bezeichnen den Raum, der freizuhalten und aufrechtzuerhalten ist, um den Verkehr von Schienenfahrzeugen ohne das Risiko von Berührungen zu ermöglichen.

Die DIN EN 15273-1:2017-10 [3] bildet die Berechnungsgrundlage der Grenzwerte. Die Verantwortlichkeiten werden von den jeweiligen Aufsichtsbehörden (in DE das Eisenbahn-Bundesamt (EBA)) geregelt (in DE über die EBO). In der EBO sind auch Räume innerhalb des Lichtraumprofils definiert, in denen bahntechnische Ausrüstungen installiert werden dürfen.

Infrastrukturbetreiber und Fahrzeugbetreiber obliegen die Festlegung und Überwachung der erforderlichen Grenzwerte. Im Zusammenhang mit der PV-Studie kommt dem Infrastrukturbetreiber eine besondere Bedeutung bei. Er hat im Falle der Installation von PV-Anlagen sicherzustellen, dass der erforderliche Lichtraum vorhanden ist. Er hat die entsprechenden Anforderungen auf Grundlage der Normen DIN EN 15273-1:2017-10 [3] und DIN EN 15273-3:2017-10 [4] festzulegen und die Einhaltung sicherzustellen. Aufgrund der Komplexität der Berechnungen und deren anwendungsspezifischen Bedeutung wird im vorliegenden Bericht das Thema nicht weiter vertieft, sondern diesbezüglich auf die beiden genannten Normen verwiesen. Es kann festgehalten werden, dass wie bei anderen Anlagen oder Baumaßnahmen auch für die Installation von PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur entsprechende Abstandsgrenzwerte, u. a. eine untere Grenzlinie, festzulegen sind.

#### 4.1.2 Minderungsfaktor Verschattungen

Für eine bestmögliche Nutzung von PV-Modulen sind Verschattungen möglichst zu vermeiden. Bei der Standortwahl von PV-Modulen sind Verschattungen, beispielsweise aufgrund von Bauwerken, Bäumen und anderem Pflanzenwuchs zu berücksichtigen (s. a. Abschnitte 4.2.2 und 4.2.4).

#### 4.1.3 Mögliche Blendungen

Eine mögliche Beeinträchtigung von Fahrzeugführerinnen und -führern von Schienenfahrzeugen aufgrund von Blendung ist sicherheitstechnisch zu bewerten. Die Bewertung des mit einer Blendung verbundenen Risikos und ggfs. die Vornahme risikomindernder Maßnahmen obliegt gemäß EN 50126 dem jeweils verantwortlichen Eisenbahnunternehmen. Auch ohne eine mögliche Einwirkung durch von PV-Modulen reflektiertes Licht sind Lokomotiv- und Triebfahrzeugführerinnen und -führer dem normalen Sonnenlicht ausgesetzt und insbesondere durch tief stehende Sonne bei Sonnenaufgang und –untergang mit möglichen Blendungen konfrontiert. In diesem Zusammenhang dienen bislang ausschließlich Hilfsmittel wie Sonnenblenden in den Verglasungen, Sonnenschutzrollen und Sonnenbrillen zur Reduzierung der Beeinträchtigung. Bauliche Maßnahmen in der Schienenverkehrsinfrastruktur zur Vermeidung von Blendung sind nicht bekannt.

Bei einer möglichen Blendung durch von PV-Modulen reflektiertem Licht ist insbesondere die Lage bzw. Anbringung der PV-Module ausschlaggebend. Vereinfacht gesagt gilt, dass PV-Module, die sich auf einer Höhe unterhalb der Fahrzeugführerin oder des Fahrzeugführers befinden, als kritischer in Bezug auf eine mögliche Blendung anzusehen sind, da sie das einfallende Licht nach oben zurück reflektieren. In diese Kategorie würden insbesondere im Gleisbett befindliche PV-Module, aber auch in Bodennähe, z. B. an LSW angebrachte Module fallen. Reflektionen von örtlich höher angebrachten PV-Modulen,

z. B. auf bestehende Lärmschutzwände aufgeständerte PV-Module können aufgrund der bei ihnen nach unten gerichteten Reflektion in Bezug auf Blendung als weniger beeinträchtigend angesehen werden. Vor oder in die LSW integriert können senkrecht installierte Module ohne ein Blendungsrisiko angebracht werden.

Ein weiterer Aspekt betrifft ausgedehnte PV-Anlagen, z. B. auf baulichen Anlagen. Hier können durch „mitwandernde Reflexionen“ bei nahem Vorbeifahren oder durch einen Flimmereffekt (Licht-Schattenwechsel) bei seitlich eintreffenden Reflexionen parallel zu den Tischreihen störende Blendungen in Richtung einer Triebwagenführerin oder eines Triebwagenführers erzeugt werden. Bei der Anlagenplanung sollte dies überprüft und berücksichtigt werden.

#### 4.1.4 Gewährleistung der Signalsicht

Die freie Sicht auf Haupt- und Vorsignale stellt ein wesentliches Sicherheitskriterium im Bahnwesen dar. Die Sicht auf Hauptsignale muss ununterbrochen gegeben sein, ansonsten sind sogenannte Vorsignalwiederholer zu installieren. Bezuglich Signalsicht wird zwischen Soll- und Mindestsichtweite unterschieden. Die Sollsichtweite beträgt je nach Geschwindigkeit 300, 400 oder 500 m.

TABELLE 4: SICHTBARKEIT VON HAUPT- UND VORSIGNALEN (QUELLE: [73])

Zulässige Streckengeschwindigkeit	Hauptsignal	Vorsignal
> 120 km/h	500 m (300 m)	300 m
≤ 120 km/h	400 m (300 m)	250 m
< 120 km/h	300 m	200 m

Unter bestimmten Umständen reicht als Signalsichtzeit ein Wert von 6,75 Sekunden für die Mindestsichtbarkeitsdauer. Auf Basis dieses Wertes und der Geschwindigkeit kann die Mindestsignalsichtweite ermittelt werden, wobei diese nicht kleiner als 80 m sein darf. Wird diese nicht erreicht, ist ein Signalwiederholer aufzustellen. In Bezug auf mögliche PV-Anlagen im Bahnwesen ist sicherzustellen, dass diese Anlagen oder Teile davon die geforderte freie Sicht auf Haupt- und Vorsignale nicht unzulässig einschränkt.

#### 4.1.5 Vandalismus, Sabotage und Diebstahl

Insbesondere Vandalismus stellt im Bahnwesen erfahrungsgemäß ein großes Problem dar. Gerade Schienenfahrzeuge, Lärmschutzwände und Gebäude sind offensichtlich bevorzugte Objekte von Täterinnen und Tätern, die Vandalismus durch Graffiti verursachen. Neben Vandalismus sollte aber aufgrund der Wertigkeit von PV-Anlagen bzw. deren Komponenten auch der Diebstahl dieser Teile in Betracht gezogen werden.

Ein wesentlicher Aspekt in Bezug auf Vandalismus, Sabotage und Diebstahl ist die Zugänglichkeit zu den betroffenen Objekten für potenzielle Täterinnen und Täter. Sowohl die Schienenfahrzeuge, Lärmschutzwände und Gebäude befinden sich in der Regel bodennah und sind in den meisten Fällen auch ungesichert und somit leicht erreichbar. Insofern hängt in diesen Fällen das Risiko für Vandalismus und Diebstahl von den jeweiligen Gegebenheiten vor Ort ab und ist, auch wenn es nur schwer eingeschätzt werden kann, durchaus zu berücksichtigen.

Im direkten Vergleich mögen PV-Module/-komponenten, die erhöht angebracht (z. B. auf Lärmschutzwällen) und somit schwerer zugänglich sind, sowie PV-Module/-komponenten, die sich in gesicherten, z. B. umzäunten und nicht öffentlich zugänglichen Bereichen befinden, im Hinblick auf das Risiko für Vandalismus und Diebstahl besser eingestuft werden. Wie bereits erwähnt sind aber die örtlichen Begebenheiten und Security-Maßnahmen ausschlaggebend.

Von einem im Vergleich hohen Risiko für Vandalismus und Diebstahl sollte bei PV-Modulen mit Installation im Gleisbett oder auf LSW und Lärmschutzwällen ausgegangen werden.

## 4.2 Anwendungsklassen

### 4.2.1 Installation am oder im Gleisbett

Beim Gleisbett kann zwischen der „klassischen Ausführung des Bahnkörpers“ und der sogenannten „festen Fahrbahn“ unterschieden werden. Beide Varianten werden nachfolgend erläutert.

Bei der klassischen Ausführung besteht das Erdbauwerk aus dem Untergrund, dem Unterbau (Damm) und dem Oberbau mit den eingebetteten Gleisen. Aufgabe des Erdbauwerks ist, eine ausreichende Standsicherheit der Gründung und der Böschungen durch die Stabilität gegenüber allen statischen und dynamischen Beanspruchungen zu gewährleisten, d. h. auch gegenüber Witterungseinflüssen wie Regen oder Frosteinwirkungen. Ziel ist die Sicherung einer hohen Lagegenauigkeit der Gleise durch Begrenzung möglicher Verformungen wie Setzungen oder Einsenkungen. Jedoch ist eine gewisse Setzungsbewegung unvermeidlich, was durch die Benennung von Toleranzwerten für Setzungsdifferenzen je Streckenabschnitt für einen Instandhaltungszyklus (6 – 10 Jahre) im Regelwerk deutlich wird (Quelle: TUD, Fakultät für Verkehrswissenschaften, Grundlagen des Eisenbahnunterbaus [6], Deutsche Bahn AG (DB AG): RIL 836 – Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und Instand halten [7]).

Es ist für PV-Systeme aufgrund der hohen physikalischen Beanspruchungen durch den Bahnbetrieb davon auszugehen, dass der Unterbau des Bahnkörpers für die PV-Installation nicht geeignet ist.

Klassische Oberbaukonstruktionen mit einer oberen Schotterschicht als Einbettungsmaterial für die Schwellen sind i. d. R. für eine Achslast von 25 kN ausgelegt und die im Zusammenhang mit zusätzlich angebrachten PV-Modulen wirkende Kraft kann sicherlich vernachlässigt werden. Zu berücksichtigen ist jedoch eine Beanspruchung durch Schotterbewegungen und ein mögliches Springen von einzelnen Steinen bei aerodynamischen Beanspruchungen durch den Zugverkehr. Zudem werden beim Schotteroberbau die Gleise regelmäßig gestopft, d. h. mit Maschinen wird das Schotterbett verdichtet und die Gleise werden wieder in die Sollage gebracht. Daraus ergibt sich, dass die PV-Module tatsächlich nur auf den schmalen Schwellen (Breite 150 mm) montiert werden könnten und gewisse Bewegungen toleriert werden müssten.

Eine grundsätzlich gegebene Installationsmöglichkeit bietet die sogenannte „feste Fahrbahn“ (FF). Statt wie bisher auf Schotter verlaufen die Schienen hier auf millimetergenau verlegtem Beton – oder Asphalttragschichten. Diese Tragschichten sind sehr stabil und nicht verschiebbar. Je nach Bauweise unterscheidet man verschiedene Systeme der FF: zum einen Bauarten, bei denen die Betonschwellen mit den Schienen in die Betontragschicht einbetoniert werden (Bauart RHEDA), zum anderen kompakte Bauarten bei denen Betonschwellen durch Fertigteilplatten (z. B. Bauart BÖGL oder ÖBB-PORR) ersetzt werden. Nachteilig für die feste Fahrbahn ist, dass sie in der Regel nur auf HGV-Strecken vorhanden ist und somit die Aerodynamik aus dem Zugverkehr (insbesondere Druck und Sog) ein Problem für die Be-

festigungsmittel und die PV-Module selbst darstellt. Hinzu kommt, dass die FF-Systeme eine gesonderte Zulassung vom EBA haben und die nachträgliche Montage jeglicher Komponenten die Zulassung nichtig macht. Ein weiterer Aspekt stellt die Einhaltung der unteren Grenzlinie dar.

Die Installation von PV-Modulen auf den Betonschwellen des Gleisbetts bzw. direkt eingebettet in die Schwellen ist bei einer konstruktiven Abfederung von Erschütterungen prinzipiell zwar denkbar, allerdings wirken sich hier die Abmessungen nachteilig aus. Die Gleisschwellen haben an der Oberseite eine konische Breite von 150 mm – 170 mm und zwischen den Schienenstützpunkten eine nutzbare Länge von ca. 1000 – 1200 mm. Bei dieser Art der Installation von PV-Modulen wäre die Ausrichtung der PV-Module horizontal, was ertragmäßig nicht optimal, aber akzeptabel einzuordnen ist. Negativ kann sich hierbei eine zu erwartende vergleichsweise starke Verschmutzung auswirken, da Staub oder Abrieb bei Regen nicht komplett abgewaschen werden. Diese Auswirkungen könnten durch eine geeignete Modul-Oberfläche und durch bedarfsgerechte Reinigung, z. B. im Rahmen von anderen Instandhaltungsfahrten in Grenzen gehalten werden.

Die Direkteinspeisung stellt hierbei keine Einschränkung dar, da bei der Bestimmung geeigneter Gleisabschnitte und der Länge dieser keine generellen Grenzen gesetzt sind und die erforderliche Nähe zum Einspeisepunkt berücksichtigt werden kann.

#### 4.2.2 Installation an oder in einer LSW

Eine Installation von PV-Systemen an LSW bietet eine Doppelnutzung der Konstruktion und ist daher grundsätzlich eine interessante Option.

Die prinzipielle Funktion von LSW gegen Bahnlärm besteht darin, die Ausbreitung des bodennahen Luftschalls außerhalb der LSW zu dämpfen. Beispielsweise kann der Bahnlärm im Abstand von 50 m von der Schienenstrecke von 62,5 dB durch die Lärmschutzwand (LSW) auf 50 dB reduziert werden [8].

Die erforderliche Höhe einer LSW an einer Bahnstrecke liegt aufgrund der Änderung der 16. BImSchV 1991 und der stetigen Erhöhung der Zuggeschwindigkeiten heute bei 4 Meter und mehr. Die durchschnittliche Höhe im Bestand beträgt derzeit 3,50 Meter über der Schienenoberkante [153].

Aufgrund der großen Höhe haben Lärmschutzwände neben den schallschutztechnischen Anforderungen auch beachtliche statische und dynamische Anforderungen zu erfüllen. Eine PV-Konstruktion an oder auf der LSW darf den Schallschutz nicht beeinträchtigen und sie muss den auftretenden aerodynamischen Kräften ebenfalls standhalten können.

Es sind verschiedene Möglichkeiten der Anbringung von PV Modulen an der LSW möglich:

- Unterkonstruktion mit Anbringung oben auf der Wand aufgesetzt
- Unterkonstruktion mit Anbringung vor der Wand
- Integration in die Wand (bei Neubau)

Das nutzbare Potenzial ergibt sich aus den Bahnstrecken, für die ein Lärmschutz erforderlich ist und der Ausrichtung dieser Strecken. Wegen der zu erwartenden hohen aerodynamischen Belastung ist zu klären, ob generell eine Konstruktion oder ob nur bestimmte Installationsarten auch für schnell befahrbare Strecken geeignet sind.

Der Einsatz verschiedener Fahrzeuge und die Sicherheit des am Gleis beschäftigten Personals erfordern, dass einheitliche lichte Räume und Querschnitte freigehalten werden (s. a. Abschnitt 4.1.1). Dies ist bei der Anordnung fester Gegenstände und damit auch von PV-Konstruktionen zu beachten. Das sogenannte Lichtraumprofil ist ein standardisierter Querschnitt der Infrastruktur. Diese Anforderung könnte

ggf. ein Minderungsfaktor für bereits vorhandene Schallschutzwände darstellen und ist jeweils projektspezifisch zu überprüfen.

Die Orientierung der installierten Module wird bei Anbringung in der Wand generell senkrecht sein, während bei Konstruktionen auf oder vor der Wand prinzipiell auch schräg angebrachte Module möglich sind. Schräge Installationen können eine bessere Nutzung der vorhandenen solaren Einstrahlung ermöglichen und die ÖBB (s. a. [72]) hat für die PV-Anlage Tullnerfeld diesbezüglich einen Winkel von 30° als optimale Neigung identifiziert.

Bei senkrechter Konstruktion sind Ausrichtungen von Osten über Süden nach Westen als geeignet anzusehen. Eine überwiegend nördliche Ausrichtung ist mit einem geringeren Ertrag verbunden, der als unökonomisch anzusehen ist.

Bei Modulen an LSW ist je nach Höhe der installierten Module keine oder nur eine geringe Verschattung zu erwarten, lokale Gegebenheiten in Bezug auf Pflanzenwuchs oder Bauwerke sind bei der Planung allerdings zu berücksichtigen. Verschmutzungen sind an senkrechten oder geneigten Moduloberflächen ebenfalls als gering einzuschätzen, da die natürlichen Regenfälle eine gute Reinigungswirkung erzielen.

Je nach Ausrichtung der LSW und Neigung der Module kann es zu erheblichen Sonnenlichtreflexionen in Richtung einer Triebwagenführerin oder eines Triebwagenführers kommen. Senkrecht installierte PV-Module reflektieren grundsätzlich nach unten, sodass bis zur Sichthöhe im Fahrzeugführerstand angebrachte Installationen keine Blendung hervorrufen können. Vor der LSW installiert oder in diese integriert, können senkrecht installierte Module ohne ein Blendungsrisiko angebracht werden.

Ein Nachteil von Modulen an LSW ist, dass bei Einspeisung in das öffentliche 3-Phasen-Netz die Entfernung zum Einspeisepunkt wegen der Priorität der Lärmschutzfunktion nicht aktiv gewählt werden kann. Dadurch können eigentlich geeignete Flächen aus der Nutzbarkeit herausfallen.

#### 4.2.3 Installation an oder auf einem Lärmschutzwall

Lärmschutzwälle sind ebenso wie Lärmschutzwände besonders interessant, da auch hier ein Doppelnutzen erwartet werden kann. Die erforderliche Schallschutzfunktion kann durch die zusätzliche Energieproduktion aufgewertet werden, darf diese jedoch auch nicht nachteilig beeinflussen.

Im Allgemeinen fügen sich Wälle besser in das Landschaftsbild ein als Schallschutzwände, trotzdem werden sie deutlich seltener eingesetzt. Der Grund liegt darin, dass sie den Schall schlechter abschirmen, da die Wallkrone in größerer Entfernung zur Lärmquelle liegt als bei einer senkrechten Schallschutzwand.

Der Flächenbedarf ist weiterhin bedeutend größer als der von Schutzwänden. Für die Aufschüttung eines 4 Meter hohen Schallschutzwalls benötigt man z. B. eine Tiefe von 15 Meter. Gleichzeitig wirkt aber ein 4 Meter hoher Wall nur wie eine 2 – 3 Meter hohe Schutzwand ([102], S. 22). Entsprechend den in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Ausführungen reicht dies heute regelmäßig nicht mehr aus.

Als Ausweg könnte gegebenenfalls eine Kombination dienen: der Wall wird ergänzt durch eine oben aufgesetzte Schallschutzwand, die aufgrund einer zumindest teilweisen Transparenz optisch akzeptabel wirken kann.

PV-Module könnten parallel zum Hang installiert werden und würden damit eine deutliche Neigung erreichen. Im Falle von obenauf gesetzten Modulen würden sie senkrecht installiert z. B. als bifaziale

(beide Modulseiten tragen zur Energiegewinnung bei), halbtransparente Elemente. Diese müssten dann auch schallschutzwirksam sein.

Das nutzbare Potenzial ergibt sich überwiegend aus dem Bestand an Bahnstrecken, für die ein Lärm- schutzwall bereits existiert. Im Prinzip kann durch die recht große Breite des schrägen Walls eine ver- gleichsweise große Fläche mit PV-Modulen belegt werden. Die Orientierung der Module ist bei schräger Installation von Ost bis West mit guten Erträgen möglich, auch bei zusätzlich senkrechten PV-Kon- struktion obenauf.

Da die PV-Module im oberen Bereich des Walls deutlich weiter von fahrenden Zügen entfernt sind, ist die zu erwartende aerodynamischen Belastung des Systems deutlich geringer als bei einer LSW. Es darf davon ausgegangen werden, dass bei diesem Installationsort auch Standardkomponenten einsetzbar sind.

Die Entfernung zum Einspeisepunkt kann bei Einspeisung in das öffentliche 3-Phasen-Netz wegen der Priorität der Lärmschutzfunktion nicht aktiv gewählt werden. Dadurch können eigentlich geeignete Flä- chen aus der Nutzbarkeit herausfallen.

#### 4.2.4 Installation an oder in baulichen Bahneinrichtungen

Bahnhofsgebäude, Werksgebäude, Lokschuppen, Werkstätten, Umspannwerke u. v. m. bieten Dachflä- chen, die prinzipiell für die Belegung mit PV-Systemen infrage kommen. PV-Systeme auf diesen Flächen ermöglichen einen Zusatznutzen ohne zusätzlichen Flächenverbrauch.

Die hierzu geeigneten PV-Systeme können DC-seitig allgemein marktüblichen Systemen mit Standard- komponenten für aufgeständerte oder dachparallele Anwendungen entsprechen.

Es gibt aber gerade in größeren Städten auch architektonisch herausragende Projekte der PV-Anwen- dung an Bahnhöfen, wie das Beispiel des Berliner Hauptbahnhofs mit in die Überdachung integrierten halbtransparenten PV-Anlagen zeigt.

Die Anzahl vorhandener baulicher Einrichtungen der DB ist enorm. Entsprechend einer Untersuchung des BMDV (vormals BMVI) gab es Ende 2018 rund 5400 Bahnhöfe sowie zahlreiche Werks- und Be- triebsgebäude der DB in Deutschland. Diese stationären Anlagen verbrauchen immerhin ca. 7 % des Ge- samtenergiebedarfs des Konzerns [9].

Größe und bauliche Gestaltung von Bahnhöfen bieten ein sehr heterogenes Bild abhängig vom Entste- hungszeitraum, den örtlichen Gegebenheiten und dem zutreffenden Verkehrsaufkommen.

Je nach Größe und Dachtyp sowie der Dachausrichtung und ggf. vorliegenden Verschattungen durch benachbarte Gebäude oder hohe Bäume kann der zu erwartende Ertrag einer PV-Anlage allerdings sehr unterschiedlich sein.

In Bahnhöfen dominiert, anders als in allen anderen Gebäudetypen, der Verbrauch elektrischer Energie gegenüber allen anderen Energiearten. Insbesondere im Bahnsteigbereich wird zum Betrieb der Be- leuchtungs- und Fahrgastinformationsanlagen ausschließlich Strom verwendet. Daher ist zu erwarten, dass bei dem Anwendungsort Bahnhof der Eigenverbrauch der erzeugten Solarenergie im Vordergrund steht.

Generell kann bei Gebäuden, die in der Regel an das öffentliche 3-phägige 50-Hz-Netz angeschlossen sind, auch in dieses eingespeist werden. Durch konsequente Anwendung von PV-Systemen im Bahnhofsbereich, hierzu zählen beispielsweise auch Überdachungen von Bahnsteigen und Parkplätzen, ist auf jeden Fall eine erhebliche Reduzierung des Bezugs elektrischer Energie für den DB-Konzern möglich.

Umrichter- oder Umformerwerke stellen eine separat zu betrachtende Gruppe innerhalb dieses Anwendungsklassen dar. Der Einspeisepunkt in das Fahrleitungsnetz ist in unmittelbarer Nähe bereits vorhanden. Es ist zu evaluieren, inwieweit eine Mitnutzung der vorhandenen Komponenten zur Umwandlung in Bahnstrom wirtschaftlich sinnvoll und kapazitätsmäßig erfolgen kann.

Bei den Aufdachanlagen für bahneigene Bauten und den Systemen für Überdachungen ist keine besondere Beanspruchung aufgrund der Bahninfrastruktur für die PV-Systeme zu berücksichtigen. Auch ist keine Beeinträchtigung der normalen Abläufe im Bahnverkehr und im Bahnhofsbetrieb zu erwarten.

#### 4.2.5 Installation neben dem Schienenweg

Freiflächen entlang des Schienenwegs oder in unmittelbarer Nähe zum Schienenweg bieten grundsätzlich gute Voraussetzungen für effiziente große bis sehr große PV-Anlagen mit einem hohen zu erwartenden Energieertrag. Auf einer Fläche von rund 91 ha wurde im März 2021 eine PV-Freiflächenanlage fertiggestellt. Jährlich rund 80 GWh sind dabei in einem Stromliefervertrag (PPA (Power Purchase Agreement)) mit der DB festgehalten. In Wasbek in Schleswig-Holstein befand sich eine weitere große Anlage mit 42 Megawatt Peak (MWP) und jährlich ca. 38 GWh Energie in 2020 im Bau [10] und ist seit 2023 in Betrieb [104].

Die Modulreihen können üblicherweise in optimaler Orientierung und Neigung installiert werden. Auch die Anwendung bifazialer PV-Module mit einem zu erwartenden Mehrertrag von 10 – 20% gegenüber den bisher überwiegend installierten monofazialen Modulen ist möglich. Ebenfalls ertragssteigernd sind nachgeführte Systeme, die meist einachsig variabel den jeweils günstigsten Neigungswinkel zum Sonnenstand realisieren.

Entsprechend des vorliegenden Lastgangs und der örtlichen Gegebenheiten kann eine Ost-West-Ausrichtung günstiger sein als eine Ausrichtung nach Süden.

Die zu errichtenden Freiflächenanlagen für die Direkteinspeisung in das Bahnnetz werden außerhalb der Förderung über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) [11] errichtet und sind damit auch nicht an die jeweiligen Limitierungen in der Größe und Lage gebunden (max. 20 MW, max. 220 m neben Verkehrswegen wie Straße und Schiene).

Als limitierende Faktoren sind hier die Eigentumsverhältnisse und aktuelle, konkurrierende Landnutzungen z. B. durch den Ackerbau zu beachten. Freigaben durch Fach- und Landesbehörden im Rahmen der aktuellen Bauleitplanungen sowie eine Zustimmung der Gemeinden ist für die Vorhaben erforderlich. Dies kann ein unter Umständen langwieriger Prozess sein.

Für diese Anwendungsklasse liegen keine besonderen Beanspruchungen der PV-Systeme durch den Bahnbetrieb vor.

#### 4.2.6 Sonstige Installationsorte

Bei dieser definierten heterogenen Gruppe werden verschiedene Installationsorte für PV-Module erfasst, die aufgrund der Lage, der Größe oder anderer Eigenschaften nicht für eine Direkteinspeisung für

Traktionsenergie geeignet sind, für die aber trotzdem ein signifikantes Potenzial zur Unterstützung der Bahn bei der Nutzung der PV zur Stromerzeugung gesehen wird. Beispiele hierfür sind:

- Einzäunungen
- Brücken
- Wagendach

Insbesondere PV-Anlagen auf oder an Einzäunungen, Geländerverkleidungen o. ä. können beispielsweise zur Beleuchtung oder auch zur Netzeinspeisung genutzt werden.

Ein immer wieder diskutierter Ansatz ist die Integration von Solarmodulen auf Fahrzeugdächern. Hier ist die erzeugte elektrische Energie für die direkte Verwendung im Fahrzeug oder im Zug, meist für die Hilfsbetriebe und Steuerung (Beleuchtung, Klimatisierung, Steuerelektrik und -elektronik, etc.), vorgesehen. Die von den Solarmodulen erzeugte DC-Spannung muss durch entsprechende Umrichter in die für die Zugelektrik geeignete Spannung umgewandelt werden. Bei diesen Anwendungen sind zumindest folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Verschmutzung auf dem Fahrzeugdach ist, bedingt durch den Stromabnehmer oder die Abgase des Dieselmotors, im Allgemeinen recht groß. Eine regelmäßige Reinigung in kurzen Fristen ist sehr aufwändig.
- Die Dächer von Reisezugwagen sind meist recht einfach gehalten. Hier ist eine Integration von Solarmodulen konstruktiv vergleichsweise leicht möglich.
- Die Dächer von moderneren Triebzügen sind durch die verschiedensten Aggregate in unterschiedlichen Größen bereits gut belegt. Eine Anbringung von Solarmodulen wird sich komplex gestalten.
- Insbesondere bei schnell fahrenden Zügen sollte der Widerstand durch den Fahrtwind bedingt durch die Solarmodule nicht merklich erhöht werden. Der Mehrverbrauch an Traktionsenergie würde sonst den Nettoertrag zu stark mindern oder sogar in Summe zu einem Energieverlust führen. Es ist zu bedenken, dass der Zug auch nachts mit erhöhtem Fahrwiderstand fährt.
- Für die Auslegung der Befestigung der Solarmodule auf dem Fahrzeugdach sind die aerodynamischen Kräfte zu berücksichtigen. Auch bei hohen dynamischen Kräften darf sich das PV-Modul nicht lösen. Die Begrenzungslinie des Fahrzeugs darf nicht verletzt werden.
- Bei der elektrischen Integration sind EMV und Erdung, z. B. Schutz gegen herabfallende Oberleitung, zu berücksichtigen.
- Bei Güterwagen, sofern sie über ein Dach verfügen, wäre die mechanische Integration ebenfalls konstruktiv recht einfach möglich. Schwierig wird hier die Weiterleitung der elektrischen Leistung, die nicht auf dem einzelnen Güterwagen verbraucht werden kann. Güterwagen verfügen meist nicht über einen elektrischen Anschluss.

Als Beispiel für eine Solaranwendung sei noch auf einen Touristenzug der australischen Byron Bay Railroad Company verwiesen, der komplett mit Solar betrieben wird (zwei Wagen). Dieser Zug bietet Platz für 100 sitzende Fahrgäste, weitere können stehen, und verfügt über einen Gepäckraum für Fahrräder und Surfboarde. Die Fahrzeuge des Zuges sind mit PV-Modulen ausgerüstet, ebenso wird PV-Energie vom Bahnhofsgebäude in Speicher des Zuges geladen, sowie beim Bremsen die rekuperative Energie gespeichert. [103]

Die auf der Kennedy-Brücke in Bonn 2011 installierte 400 m lange PV-Anlage (Solarworld AG) speist seitdem in das öffentliche Netz ein [154]. Die verschattungsfreie Ausrichtung nach Süden sichert einen optimalen Ertrag. Wartungsarbeiten, wie z. B. die Modulreinigung, sind vergleichsweise einfach durchführbar.

Die weltweit größte „Solarbrücke“ mit 1,1 MWp wurde 2014 in London eingeweiht (Blackfriars-Solarbrücke). Hierbei handelt es sich aber um eine Dach-Solaranlage wie unter Punkt 4 beschrieben, die durch den Ausbau des Bahnhofs zu einem Wahrzeichen der Stadt wurde und die Kosten für den Betrieb senken konnte [155].

Eine mögliche PV-Anwendung auch in der Bahninfrastruktur ist ein Brückengeländer mit integrierten bifazialen PV-Modulen. Die Anwendung ist analog der Schallschutzwand zu sehen, die Kriterien an die Funktionalität und Robustheit sind je nach konkretem Anwendungsfall verschieden.

Die Anwendungsklasse „Sonstige Installationsorte“ wird nicht in der Tiefe der anderen Kategorien betrachtet, da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den Potenzialen zur Direkteinspeisung liegt. Da jedoch auch hier ein zu erwartendes signifikantes Potenzial zum Einsatz der PV gesehen wird, soll hier auf weitere Möglichkeiten hingewiesen werden, dem Ziele, den Verkehrsträger Schiene möglichst zu 100 % mit Erneuerbaren Energien zu betreiben. Generelle Aussagen zur Anwendbarkeit können nicht getroffen werden, da die Vielfalt der Anwendungen zu groß ist und im konkreten Einzelfall untersucht werden muss.

## 5 Aufbau einer PV-Anlage - Hauptkomponenten

Nachfolgend werden die Hauptkomponenten näher beschrieben und die besonderen Anforderungen für den Einsatz in die Bahninfrastruktur bzw. als Direkteinspeisung in das Bahnnetz herausgearbeitet.

Kleine niederspannungsseitige Insel- und Gleichspannungssysteme werden nicht weiter betrachtet, da nur netzparallele PV-Systeme Bestandteil der weiteren Untersuchungen sind. Netzparallele Systeme werden an ein bestehendes Netz angebunden bzw. mit dem Netz synchronisiert und speisen in selbiges ein. Die PV-Anlagen arbeiten somit parallel am Netz und können nicht selbständig im Inselbetrieb operieren oder die Netzparameter steuern.

Energiespeichersysteme werden ebenfalls nicht betrachtet.

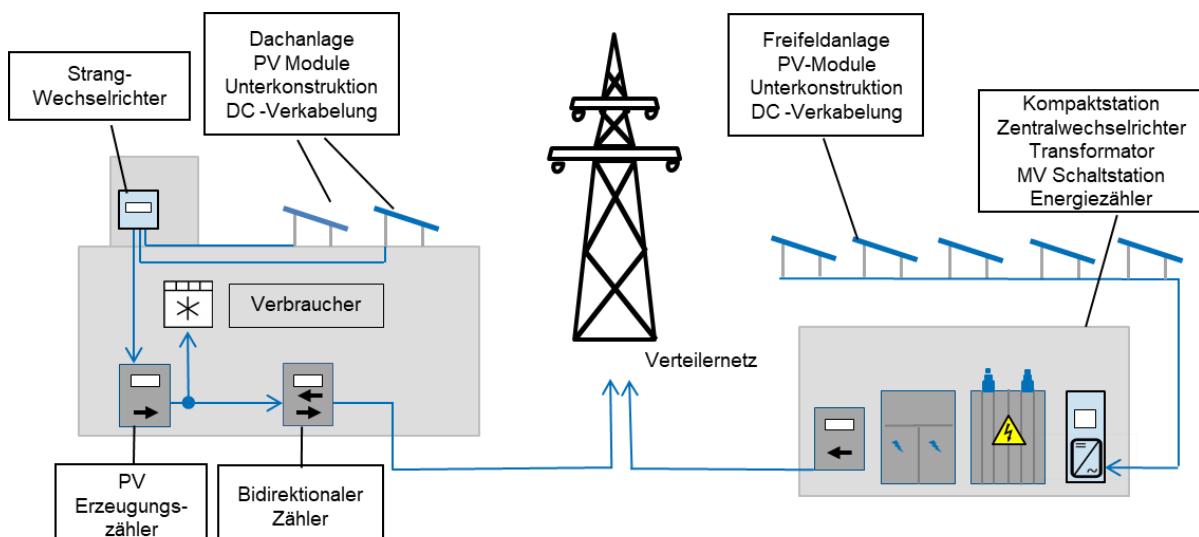


Abbildung 4: Blockschaltbild PV-Anlage . Quelle: TÜV Rheinland

Nachfolgend sind einige Beispiele realisierter PV-Anlagen unterschiedlicher Aufbauweisen dargestellt.



Freifeldanlage, starr nach Süd ausgerichtet



Freifeldanlage, gerammte Unterkonstruktion



Dachanlage auf Flachdach, aufgeständert



Dachanlage auf Schrägdach, dachparallel



Dachanlage auf Flachdach, aufgeständert Ost-West-Ausrichtung

Abbildung 5: Beispiele zu PV-Anlagen. Quelle: TÜV Rheinland

## 5.1 PV-Module

### 5.1.1 Funktion

PV-Module bzw. die darin integrierten Solarzellen wandeln das Sonnenlicht in elektrische Leistung (in Form von Gleichspannung und -strom) um. Dabei sind die einzelnen Solarzellen typischerweise elektrisch seriell bzw. parallel verschaltet um für die weitere Nutzung günstige Strom-, und Spannungswerte erzielen zu können. Die umhüllenden Komponenten und Materialien nehmen die Solarzellen mechanisch auf, schützen sie vor Umwelteinflüssen, dienen der mechanischen Stabilität des gesamten PV-Modules und gewährleisten die sichere und zuverlässige elektrische Isolation.

### 5.1.2 Aufbau

Als PV-Modul bezeichnet man eine Einheit, die einzelne elektrisch verbundene Solarzellen in einem Materialverbund (Laminat) bzw. Gerät oder Gehäuse mechanisch aufnehmen und über einen elektrischen Anschluss verfügen. PV-Module gibt es in vielen verschiedenen Größen und Formaten. Am weitesten verbreitet sind starre PV-Module, die aus einem Glas-Folie oder Glas-Glas-Laminat bestehen, in welches die Solarzellen eingebettet sind. Diese Lamine können mit einem Rahmen ausgestattet sein, als auch als rahmenlose Lamine konzipiert sein. Daneben sind auch flexible Lamine am Markt vertreten, welche meist aus polymeren äußeren Schichten bestehen und üblicherweise später auf feste Unterlagen aufgebracht werden. Elektrisch sind PV-Module durch Kenngrößen definiert, die neben den mechanischen Angaben auf Typenschildern und Datenblättern mit Bezug auf Standard-Test-Bedingungen (STC) angegeben sind.

## 5.1.3 Technologien

### 5.1.3.1 Kristalline Technologie

Die sogenannte kristalline Technologie bezieht sich auf die verwendete Zelltechnologie. Kristalline Solarzellen basieren auf der Siliziumtechnologie. Die Zellen werden in einer Schmelze hergestellt und anschließend in einzelne Zellen gesägt bzw. entsprechend aus einer Schmelze gezogen. Die Zellgröße kann variieren, bewegt sich aber üblicherweise innerhalb der aktuell gängigen technologischen und marktbedingten Größen. Die Zellen durchlaufen verschiedene Dotierungsschritte und Oberflächenveredelungen bzw. Kontaktierungsschritte. Die bearbeiteten Zellen werden zu Zellsträngen elektrisch miteinander verbunden (meist mittels Zellverbinder) und in einem Laminat eingebracht, welches mit Anschlusspunkten versehen wird.

### 5.1.3.2 Dünnschichttechnologie

Die sogenannte Dünnschichttechnologie bezieht sich auf die verwendete Zelltechnologie. Dünnschichtzellen werden mittels speziellen Verfahren auf eine Trägerschicht aufgebracht und im Nachgang separiert, dotiert und elektrisch verbunden. Danach wird ein Laminat erstellt und mit Anschlusspunkten verbunden. Die bekanntesten Technologien sind Cadmiumtellurid-Dünnschicht-Solarzellen (CdTe), Kupfer-Indium-Selen-Dünnschicht-Solarzellen (CIS), Kupfer-Indium-Gallium-Selen-Dünnschicht-Solarzellen (CIGS), bzw. amorphes Silizium (a-Si) und beziehen sich auf die verwendeten Zellmaterialien. Diese Zelltechnologie beeinflusst auch die Bauform und die elektrischen Kennwerte der PV-Module. In Bezug auf den Wirkungsgrad liegt die Dünnschichttechnologie deutlich hinter den kristallinen Technologien und benötigt für die gleiche elektrische Leistung entsprechend mehr Fläche.

### 5.1.3.3 Bifaziale Modultechnologie

PV-Module können sowohl als monofaziale als auch als bifaziale Module aufgebaut sein. Bei monofazialen PV-Modulen ist nur eine Seite (die Frontseite) aktiv und trägt zur Energieerzeugung bei. Bei bifazialen PV-Modulen tragen beide Seiten (Front- und Rückseite) zur Energiegewinnung bei, wobei eine Seite dominant ist. Der Anteil der Rückseite an der Energiegewinnung in PV-Systemen liegt bei heutigen bifazialen Modultechnologien bei 5 % bis 30 % der Energiegewinnung der Frontseite, je nach Aufbau und Ausrichtung. Somit gibt es sowohl eine technologische Komponente, als auch eine von der Ausrichtung und umgebenden Reflexionsbedingungen abhängige Komponente. Die Kenngrößen der PV-Module basieren auf der dominanten Seite (Frontseite). Der Anteil der Rückseite wird durch Bifazialitätskoeffizienten ausgedrückt. Sie sind alle in Prozent ausgedrückt und repräsentieren das Verhältnis zwischen den auf der Vorder- und Rückseite gemessenen Werten bei einer definierten Einstrahlung.

## 5.1.4 Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur

In Bezug auf die Verwendbarkeit für die Direkteinspeisung gibt es bei der Modultechnologie keine generellen Einschränkungen. Die Module können durch serielle und parallele Verschaltung zu PV-Generatoren zusammengeschaltet werden. Diese sind daher sowohl in baulicher Ausdehnung als auch in der Leistungsgröße sehr variabel. Typische PV-Module haben Systemspannungen zwischen 1000 V und 1500 V Gleichspannung. Dies bedeutet, bei der seriellen Verschaltung einzelner Module, summieren sich die Einzelspannungen, die Gesamtspannung über den Modulstrang darf aber die Systemspannung nicht

überschreiten. Somit sind in der Spannungsebene Grenzen vorgegeben. Die von den Solarmodulen bzw. PV-Generatoren erzeugte Leistung muss mittels Umwandlung und Transformation an das gewünschte Frequenz- und Spannungslevel angepasst werden. Herausforderungen können durch standortbedingte Umgebungsparameter, z. B. hohe mechanische Beanspruchung, entstehen. Insbesondere bei Installationen innerhalb oder in unmittelbarer Nähe des Gleisbettes sind mechanische Beanspruchungen zu erwarten, denen Standardmodule möglicherweise nicht gewachsen sind. Die Belastungsgrenze hängt stark von der Baugröße und Aufbauart der PV-Module ab. Entscheidend ist auch die Art der Befestigung an der Unterkonstruktion, die nach Belastungsanforderungen angepasst oder modifiziert werden kann. Dies bezieht sich auf Anzahl und Position der Haltepunkte. PV-Module müssen gemäß Bauartprüfung (IEC 61730) einer mechanischen Belastung von mindestens 2500 Pa widerstehen können. Für erhöhte Belastung sind Module mit Belastungsgrenzen von 5400 Pa erhältlich (z. B. für Regionen mit Schneelastzone II). Darüber hinaus sind für Anwendungen mit extremen Belastungen (z. B. Taifun-Regionen oder alpine Regionen) spezielle Module mit weitaus höheren Belastungsgrenzen erhältlich. PV-Module können durch Anpassung der Rahmenstärke bzw. der Profilart, als auch durch Verwendung einer höheren Glasdicke für höhere Belastungen angepasst werden. Falls aus den spezifischen Anwendungen in der Bahninfrastruktur höhere Belastungsgrenzen erforderlich scheinen, sind die benannten Anpassungs- und Modifizierungsmaßnahmen kurzfristig und mit überschaubarem Aufwand umsetzbar. Die generelle Bewertung der Verfügbarkeit und Anpassungsfähigkeit für spezifische Anwendungen in der Bahninfrastruktur ist in nachfolgendem Diagramm als Übersicht dargestellt, die folgenden drei Bewertungsmerkmale sind in einer Punkteskala von 0 bis 10 eingeordnet.

Der **Anpassungsaufwand** beschreibt die erforderlichen Maßnahmen, die Komponente an die benannten Anforderungen anzupassen. Ein niedriger Anpassungsaufwand bedeutet, dass kaum Modifikationen erforderlich sind. Ein hoher Anpassungsaufwand bedeutet, umfangreiche Änderungen sind erforderlich.

Bewertung Anpassungsaufwand: Je niedriger desto besser.

Die **Anpassungsfähigkeit** beschreibt die Möglichkeiten der Komponente durch Modifikationen an unterschiedliche Anforderungen angepasst zu werden. Eine hohe Anpassungsfähigkeit bedeutet, die Komponenten können leicht an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden.

Bewertung Anpassungsfähigkeit: Je höher desto besser.

Die **Verfügbarkeit geeigneter Komponenten** bewertet die aktuelle Erhältlichkeit dieser Komponenten am Markt.

Bewertung Verfügbarkeit geeigneter Komponenten: Je höher desto besser.

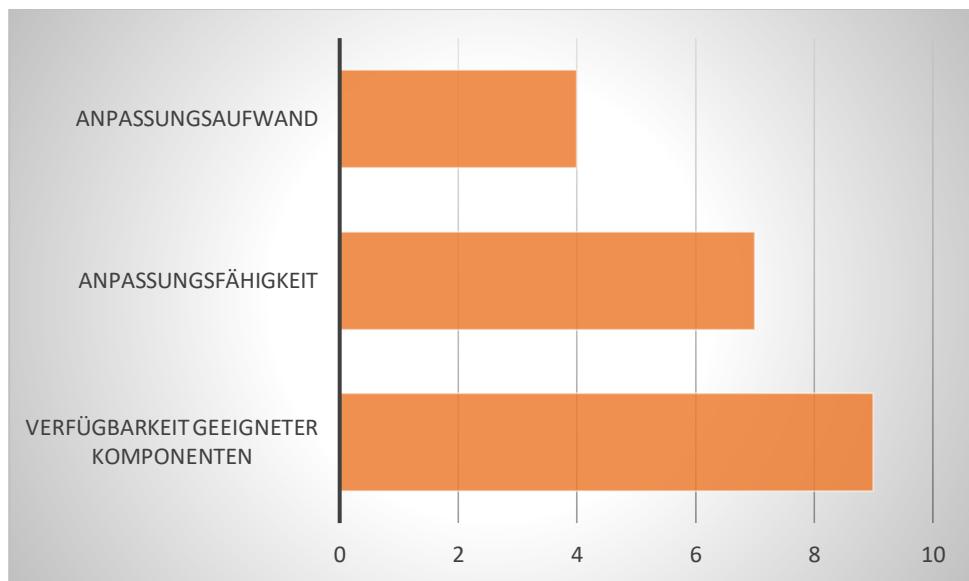


Abbildung 6: Bewertungstabelle: geeignete PV-Module (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch) . Quelle: TÜV Rheinland

Der Anpassungsaufwand wird als moderat (4) eingeschätzt, da z. B. durch Änderungen des Rahmenprofiles, der Anzahl der Haltepunkte oder der Glasdicke, die mechanische Stabilität erhöht werden kann. Die Anpassungsfähigkeit wird unter der Berücksichtigung der produktsspezifischen Maßnahmen, als auch der weiteren flexiblen Möglichkeiten der Aufstellung und Ausrichtung, mit hoch (7) bewertet. Für viele Anwendungsfälle in der Bahninfrastruktur stehen geeignete PV-Module bereit, die Verfügbarkeit ist somit als hoch (9) bewertet worden.

## 5.2 Unterkonstruktion und Befestigungssysteme

### 5.2.1 Funktion

Die Unterkonstruktion und/oder Befestigungssysteme dienen der Aufnahme und Befestigung der PV-Module. Diese muss die Kräfte in das Fundament bzw. Gebäude übertragen und für eine spannungsfreie Befestigung der Module sorgen. Geländeunebenheiten oder bauliche Höhenunterschiede müssen durch die Unterkonstruktion ausgeglichen werden. Üblich sind Klemmverbindungen oder Schraubverbindungen, welche die Module halten. Diese werden auf einen Unterbau oder an vorhandenen Konstruktionen oder Objekten befestigt. Es sind auch Klebeverbindungen möglich, welche bei flexiblen Modultypen vermehrt Anwendung finden.

#### 5.2.1.1 Aufbau

Die Unterkonstruktion besteht üblicherweise aus einer Stahl- und/oder Aluminiumkonstruktion, in einigen Systemen auch aus Kunststoffelementen, welche die PV-Module aufnehmen und tragen. Die PV-Module werden über Halteklemmen oder Schraubverbindungen an der Unterkonstruktion befestigt. Am häufigsten kommt dort eine 4-Punkt-Lagerung oder ein Schienensystem, welches auch Einlegesystem genannt wird, zum Einsatz. Die Ausführung der Modulbefestigung und der Unterkonstruktion muss gemäß der zu erwartenden statischen und dynamischen Belastungen ausgelegt werden. Hier sind vorrangig Wind- und Schneelasten sowie Sog- und Druckbelastung aufgrund vorbeifahrender Züge zu benennen. Es muss dabei sichergestellt werden, dass die Vorgaben des Modulherstellers zur mechanischen Installation eingehalten werden.

Im Fall einer freistehenden PV-Anlage muss die Unterkonstruktion entsprechend im Boden verankert werden. Aktuell werden vorrangig Systeme verwendet, bei denen die Stützen der Unterkonstruktion in den Boden gerammt werden oder Schraubanker in den Boden gesetzt werden. Darüber hinaus finden auch Betonfundamente Anwendung.

Bei PV-Anlagen auf oder an Gebäuden können konstruktive Elemente des Gebäudes als Teil der Unterkonstruktion verwendet werden. Hierfür müssen dann geeignete Anbindungselemente z. B. Halteklemmen oder Schienensysteme verwendet werden. Insbesondere für Flachdachanwendungen werden auch Systeme eingesetzt, die keine mechanische Verbindung zum Objekt haben, sondern über Eigengewicht bzw. zusätzliche Ballastierung und/oder aerodynamische Elemente in Position gehalten werden.



Unterkonstruktion mit 2-Punktveankerung



Unterkonstruktion mit 1-Punktveankerung



Dachunterkonstruktion mit Schüttung



Dachunterkonstruktion mit Schüttung

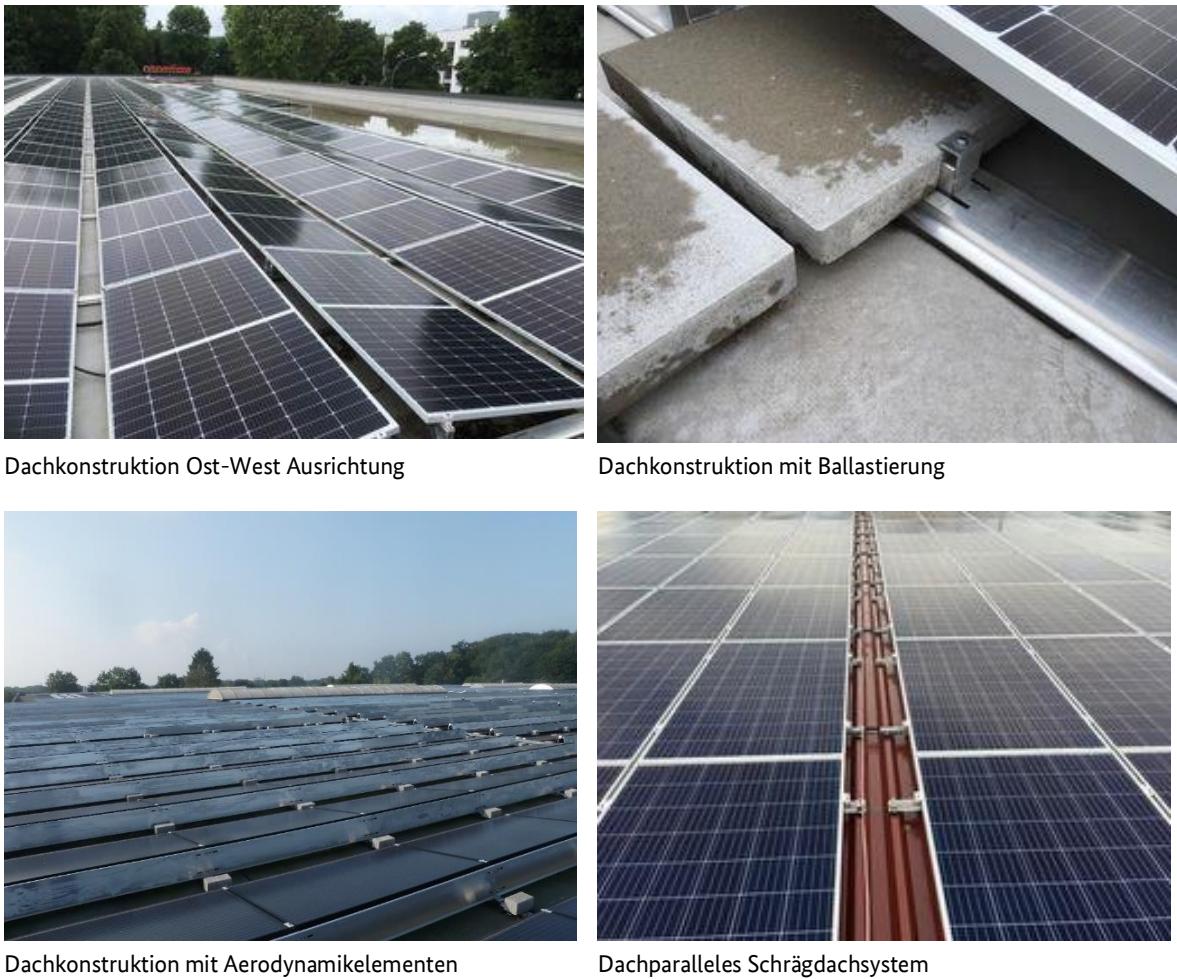


Abbildung 7: Beispiele zu Unterkonstruktionen . Quelle: TÜV Rheinland

## 5.2.2 Technologien

### 5.2.2.1 Aufständerung

Hierbei wird das Modul auf ein Ständerwerk montiert, welches durch entsprechende Modulneigung einen günstigen Winkel zur Sonne einstellt. Eine Aufständerung wird üblicherweise bei Freifeldanlagen oder auf Flachdächern eingesetzt.

### 5.2.2.2 Dach- und Fassadenanlagen

Hierbei wird das PV-Modul mittels Verbindungselementen auf eine vorhandene Konstruktion (Dach- oder Fassadenelement) montiert. Die Modulneigung folgt dabei üblicherweise dem Dach- oder Fassadenelement. Bei geneigten Dächern wird dies oft als dachparallele Anlage bezeichnet.

### 5.2.2.3 Nachgeführte Systeme

Zur besseren Energieausbeute können die Module dem Sonnenstand folgen bzw. „nachgeführt“ werden. Dabei werden die Module auf ein sogenanntes Nachführsystem oder Trackingsystem montiert, welches

dem Tagesverlauf der Sonnen folgt. Grundsätzlich unterscheidet man 1-achsige und 2-achsige Nachführsysteme. Während 1-achsige Systeme dem Sonnenverlauf nur in Ost-West-Richtung folgen, können die 2-achsigen Systeme auch den Winkel zur Sonnenhöhe einstellen.

#### 5.2.2.4 BIPV

BIPV steht für building integrated photovoltaik, also gebäudeintegrierte PV-Anlagen. Die PV-Anlage ist somit zumindest teilweise in das Gebäude integriert. Die PV-Anlage übernimmt neben der Energieproduktion auch Teile der Gebäudefunktionen. Sie ist z. B. Bestandteil der statischen Konstruktion und/oder dient zum Regen- oder Witterungsschutz, da sie als Dach- oder Fassadenkonstruktion eingesetzt wird. Oft finden PV-Fassadenanlagen Anwendung als gestalterisches Element und erfüllen durch die Energieproduktion einen Doppelzweck.

### 5.2.3 Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur

In Bezug auf die Unterkonstruktion sind insbesondere die mechanischen und dynamischen Belastungen zu benennen, die durch Erschütterungen und zusätzlichen Sog und Druck durch Bahnbetrieb verursacht werden. Drüber hinaus ist zu beachten, dass bei elektrifizierten Bahnanlagen Sicherheitsabstände zu den elektrischen Anlagen und/oder zusätzliche Potenzialausgleichs- und Erdungsmaßnahmen erforderlich sind.

Für Unterkonstruktionen ist ein Statiknachweis erforderlich. Dieser wird individuell für die spezifische Anwendung und unter Berücksichtigung der lokalen Belastungsbedingungen erstellt. Für einige Aufbauarten, die konstruktiv vergleichbar sind (z. B. Dachanlagen mit gleichen Abständen und Befestigungspunkten), liefern Hersteller Systemstatiken, die bei Einhaltung der Randbedingungen als Statiknachweis herangezogen werden können.

Viele Unterkonstruktionen können für spezifische Belastungsszenarien angepasst werden. Dies kann durch zusätzliche Aussteifungselemente, verminderte Abstände der tragenden Elemente, Anpassung der Materialstärken oder Anpassung der Verankerung realisiert werden.

Falls aus den spezifischen Anwendungen in der Bahninfrastruktur höhere Belastungsgrenzen erforderlich scheinen, sind die benannten Anpassungs- und Modifizierungsmaßnahmen kurzfristig und mit überschaubarem Aufwand umsetzbar. Material- und installationsbedingt kann dies allerdings je nach Ausmaß der erforderlichen Maßnahmen zu erheblichen Mehrkosten führen.

Bei Gebäuden und Objekten (Hallendächer, LSW etc.) auf die eine PV-Anlage montiert werden soll, ist zu prüfen, ob die erhöhten Lasten durch die PV-Anlage aufgenommen werden können. Die Lastreserven von Gebäuden und Objekten, inklusive der Lärmschutzwände, sind sehr unterschiedlich und müssen individuell geprüft werden. Dabei ist anzumerken, dass lastoptimierte Systeme verfügbar sind, die nur geringe Zusatzlasten aufbringen.

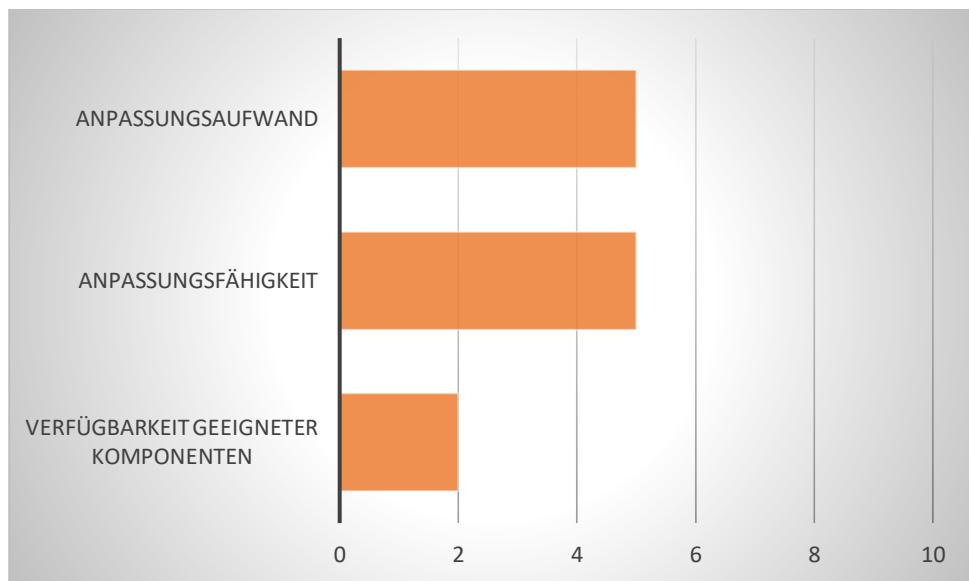


Abbildung 8: Bewertungstabelle: geeignete Unterkonstruktion (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch). Quelle: TÜV Rheinland

## 5.3 Umwandlungs- und Transformierungselemente

### 5.3.1 Funktion

Umwandlung der von den PV-Modulen gelieferten Gleichstrom-Leistung in für den Verbraucher oder das aufnehmende Netz angepasste Form der Elektrizität innerhalb definierter Spannungs- und Frequenzbereiche. Für die Direkteinspeisung in die Fahrleitung muss auf 15 kV und 16,7 Hz umgewandelt und transformiert werden. Dies wird meist aus einer Kombination von Wechselrichtern und Mittelspannungstransformator realisiert. Darüber hinaus sind in die Umwandlungseinheiten üblicherweise Sicherheitseinrichtungen wie Netzüberwachung und Erdungswiderstandsmessung integriert. Weiterhin können Betriebszustandsüberwachungs- und Monitoringeinheiten integriert sein.

### 5.3.2 Aufbau

Wechselrichter sind je nach Leistungsklasse und Ausführung als Wandgeräte- oder Standgeräte, die auch aus mehreren Einheiten bestehen können, aufgebaut. Dabei können sie als Indoor- oder Outdoor-Geräte konzipiert sein. Kernaufgabe ist die Umwandlung des vom PV-Generator gelieferten Gleichstromes in Wechselstrom. Hierzu kommen unterschiedlichen Technologien zum Einsatz.

Zu den Hauptgruppen des Wechselrichters gehören typischerweise die folgenden Elemente:

- Gehäuse
- Anschlussbereich für den DC-Bereich (DC-Eingang)
- Anschlussbereich für den Wechselstrom (AC)-Bereich (AC-Ausgang)
- Umwandlungs- und Leistungsteil mit und ohne Transformator
- Kühlseinrichtung bzw. Lüftung
- Sicherheitseinrichtungen

- Bedien- und Kommunikationseinheit

Transformatoren können in den Wechselrichtern integriert sein. Sie liefern üblicherweise Ausgangsspannungen im Niederspannungsbereich bis 1000 V. Für die Netzanbindung in Mittel oder Hochspannungsbereich sind separate nachgelagerte Transformatoren erforderlich.



Generatoranschlusskasten



Strangwechselrichter an Gebäudewand



Strangwechselrichter an Unterkonstruktion



Strangwechselrichter Bodengerät



Zentralwechselrichterstation mit MV-Transformator



Transformatorstation



Transformatorstation



Mittelspannungsschaltanlage



Mittelspannungsschaltanlage



Mittelspannungstransformator

Abbildung 9: Beispiele zu Umwandlungs- und Transformierungssystemen. Quelle: TÜV Rheinland

### 5.3.3 Technologien

#### 5.3.3.1 Modul-Wechselrichter

Modul-Wechselrichter sind Kleinstwechselrichter im Leistungsbereich einzelner Module (< 500 Watt Peak (Wp)), die meist direkt am PV-Modul installiert sind. Beim Einsatz von Modulwechselrichtern ist keine DC-seitige Verkabelung der PV-Module untereinander erforderlich. Die Energieumwandlung erfolgt im Modul-Wechselrichter und die Energieweiterleitung erfolgt über AC-Leitungen im 230-V-Netz. Die PV-Module können immer im optimalen Arbeitspunkt gehalten werden. Dies ist bei unterschiedlicher Ausrichtung und partieller Verschattung von Vorteil. Verschattungen wirken sich somit nur proportional zu Fläche aus und nicht überproportional wie bei seriell verschalteten Modulen in einem Modulstrang. Die Überwachung einzelner oder kleiner Gruppen von Modulen ist ein weiterer systembedingter Vorteil dieser Technik.

#### 5.3.3.2 Power-Optimizer

Power-Optimizer (PV-Leistungsoptimierer) sind DC/DC-Wandler im Leistungsbereich einzelner Module, die meist direkt am PV-Modul installiert sind. PV-Module werden einzeln oder paarweise an den Power-Optimizer angeschlossen, der einen entsprechenden Arbeitspunkt einstellt. Die Power-Optimizer sind wiederum an einen spezifischen Wechselrichter angeschlossen. Die PV-Module können immer im optimalen Arbeitspunkt gehalten werden. Dies ist bei unterschiedlicher Ausrichtung und partieller Verschattung von Vorteil. Verschattungen wirken sich somit nur proportional zu Fläche aus und nicht überproportional wie bei seriell verschalteten Modulen in einem Modulstrang. Wie bei den Modulwechselrichtern ist die Überwachung einzelner oder kleiner Gruppen von Modulen ein weiterer systembedingter Vorteil dieser Technik.

#### 5.3.3.3 Strangwechselrichter

Strangwechselrichter (engl. Stringinverter) zeichnen sich dadurch aus, dass die einzelnen Modulstränge direkt mit dem Wechselrichter verbunden sind. Diese Systeme haben kleine Bauformen und sind üblicherweise dezentral in der PV-Anlage positioniert. Überwiegend sind sie für die Außeninstallation geeignet und können innerhalb des Generatorfeldes, entweder an der Unterkonstruktion oder an anderen Objekten angebracht werden. Die Wechselrichter bewegen sich in Leistungsbereichen von 1 kWp bis ca. < 100 Kilowatt Peak (kWp). Die größeren Leistungsklassen werden manchmal auch als „Mini-Zentralwechselrichter“ oder „Multistringwechselrichter“ bezeichnet und sind für den Anschluss mehrerer Modulstränge ausgelegt. Multistringwechselrichter haben meist mehrere Maximum Power Points (MPP)-Tracker, die jeweils die angeschlossenen Stränge in angepassten Arbeitspunkten betreiben. Damit kann für jeden Modulstrang die optimale Betriebseinstellung gewählt werden. Somit ist der Anschluss von Modulsträngen unterschiedlicher Neigungen oder Ausrichtungen als auch unterschiedlicher Leistungsklassen an einem Wechselrichter möglich. Diese Art von Wechselrichter kommt gerne bei größeren PV-Anlagen oder bei Anlagen mit unterschiedlichen Modulausrichtungen und somit unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen zum Einsatz. Typischerweise haben Strangwechselrichter eine Ausgangsspannung von 230 V (einphasig einspeisend) oder 400 V (dreiphasig einspeisend), da sie direkt in das Niederspannungsnetz einspeisen oder an einen nachgelagerten Mittelspannungstransformator angebunden sind.

### 5.3.3.4 Zentrale Wechselrichter

Zentralwechselrichter werden als zentrale Einheiten mit großen Leistungsklassen von 30 kWp bis > 100 kWp aufgebaut. Die einzelnen Modulstränge werden in Generatoranschlusskästen zu größeren Gruppen zusammengeschaltet. Ein oder mehrere Generatoranschlusskästen werden dann über DC-Hauptleitungen an den Wechselrichter angeschlossen. Hierbei ist zu beachten, dass alle an die Wechselrichtereinheit angeschlossenen Modulfelder, die gleiche Ausrichtung und Leistungsparameter haben sollten, da sonst durch die Parallelschaltung Verluste (sogenannte „Mismatchverluste“) durch Fehlpassung entstehen können. Zentralwechselrichter gibt es als Indoorgeräte, die in Stationen oder Gebäuden eingebaut werden, als auch als Outdoorgeräte. Typischerweise haben sie eine Ausgangsspannung von > 400 V bis ca. 1000 V, da sie mittels nachgelagertem Transformator in das Mittelspannungsnetz einspeisen. Beides ist oft in Kompaktstationen, bestehend aus Wechselrichtereinheiten, Mittelspannungstransformator und Mittelspannungsschaltfeld, eingebaut.

### 5.3.3.5 Unterscheidung Wechselrichter mit und ohne Transformator

Wechselrichter mit integriertem Transformator haben eine galvanische Trennung zwischen AC- und DC-Seite. Dies hat in Bezug auf Sicherheitsaspekte einige Vorteile, die bei transformatorlosen Geräten durch zusätzliche Maßnahmen kompensiert werden müssen. Neben den Sicherheitsaspekten, kann die galvanische Trennung auch Vorteile bei der Auswahl der angeschlossenen Module bieten, indem gewisse negative Effekte bei spezifischen Modulen (z. B. bei einigen Dünnschichtmodulen) vermieden werden können. Ein weit verbreiteter negativer Effekt ist z. B. die potenzial induzierte Degradation (PID), die eine Leistungsreduzierung und Schädigung spezifischer Module verursacht. Im Gegensatz zu transformatorlosen Modellen können Wechselrichter mit galvanischer Trennung sowohl an positiv, wie auch negativ geerdete PV-Modulstränge angeschlossen werden. Diese Maßnahmen können PID-Effekte verhindern und werden teilweise in Installationsanleitungen spezifischer Module vorgegeben. Andererseits ist üblicherweise der Wirkungsgrad bei Geräten mit Transformator tendenziell geringer. Dieser Fakt, als auch das geringere Gewicht und geringer Gerätekosten haben dazu geführt, dass bei kleineren bis mittleren Leistungsklassen überwiegend Geräte ohne Transformator zum Einsatz kommen.

### 5.3.3.6 Nachgelagerter Transformator für die Mittel- und Hochspannungsebene

Üblicherweise liefern die Wechselrichter einer Ausgangsspannung auf der Niederspannungsebene (z. B. 230 V – 400 V oder bis 1000 V). Für den Anschluss an das Mittel- oder Hochspannungsnetz (z. B. 15 kV, 20 kV oder 110 kV), was bei entsprechenden Leistungsgrößen erforderlich ist, wird ein weiterer Mittel- oder Hochspannungstransformator bzw. beides benötigt. Bei der Direkteinspeisung in das Fahrleitungsnetz der Bahn wird ein 15-kV-Transformator benötigt.

## 5.3.4 Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur

Für die Direkteinspeisung müssen die Umwandlungs- und Transformierungseinheiten die Energie aus den PV-Generator (Gleichstrom und Niederspannung) auf 15 kV und 16,7 Hz konform zum Bahnnetz umwandeln und transformieren. Aktuell gibt es am Markt keine Wechselrichteranbieter für diese Anwendungsart, da die Wechselrichter üblicherweise für das 50-Hz-Netz konzipiert sind. Bisher sind nur für einzelne Pilotprojekte Wechselrichter spezifisch umgebaut bzw. angepasst worden. Neben den be-

sonderen Anforderungen zu Spannungs- und Frequenzbereich sind die Schutz- und Sicherheitseinrichtungen und Parameter teilweise abweichend zu den bisherigen Standardanwendungen. Somit sind dort weitere Anpassungen erforderlich. Da die Anpassungen eher grundlegender Art sind, ist keine kurzfristige Adaption möglich. Der Anpassungsaufwand umfasst Baugruppen, Steuer- und Regelung, sowie Softwaremodifikationen. Namhafte Hersteller zeigen sich interessiert und sind überzeugt, entsprechende Lösungen anbieten zu können. Da die Anpassungen umfangreich und aufwendig sind, werden die Hersteller die Investitionsentscheidungen abwägen und je nach eingeschätzter Marktrelevanz tätigen oder zurückstellen.

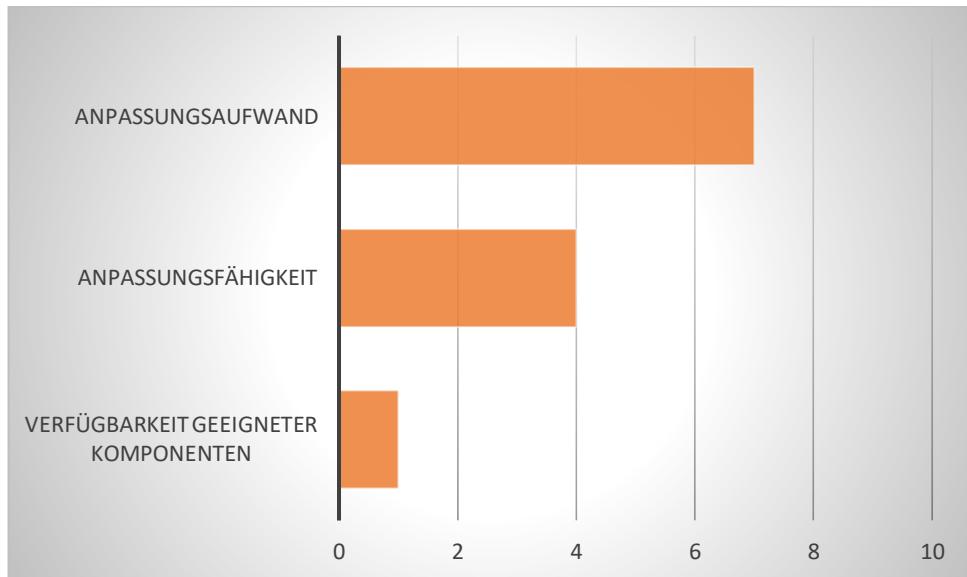


Abbildung 10: Bewertungstabelle: geeignete Umwandlungseinheiten (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch). Quelle: TÜV Rheinland

## 5.4 Kabel und Leitungen

### 5.4.1 Funktion

Die Hauptfunktion der Kabel und Leitungen ist die elektrische Verbindung der eingesetzten Komponenten und die Weiterleitung der elektrischen Energie. Dies soll möglichst ohne hohe Verluste erfolgen. Darüber hinaus muss die Kabel- und Leitungsanlage Schutzfunktionen, wie Schutz vor Erd- und Kurzschluss als auch vor elektrischen Schlag, übernehmen. Grundsätzlich kann auch der Potenzialausgleich und die Erdung der Anlage zugerechnet werden, die allgemein nur Schutzfunktionen übernehmen. Da die Kabel- und Leitungsanlagen im DC- als auch im AC-Teil eingesetzt werden, müssen entsprechende spezifische Anforderungen berücksichtigt werden. Insbesondere im AC-Teil, kommen bei Großanlagen auch Hochspannungsleitungen zur Anwendung (z. B. zur Verbindung von Anlagenteilen und zur Verbindung zum Netzanschlusspunkt). Die Mittel und Hochspannungsanlagen müssen gesonderte Anforderungen und normative Vorgaben berücksichtigen.

Je nach Definition, ist auch der Leitungsschutz (insbesondere der Überstromschutz) der Kabel- und Leitungsanlage zuzurechnen. In diesem Kapitel sollen nur die Kabel und Leitungen zur Energieübertragung berücksichtigt werden. Die Betrachtung von Kommunikations- und Sensorkabeln usw. wird hier nicht behandelt.

### 5.4.1.1 Aufbau

Grundsätzlich ist immer ein elektrischer Leiter vorhanden, der üblicherweise aus Kupfer oder Aluminium besteht. Je nach Anwendungsfall werden sie als flexible oder starre Kabel und Leitungen ausgeführt und eingesetzt. Die Querschnitte werden gemäß der Lastströme, Leiterlängen, Verlegearten und Umgebungsparametern gewählt. Während die Leiter bei Freileitungsanlagen typischerweise ohne Isolation sind, haben Erdkabel und Kabel in sonstigen Leitungsanlagen eine Umhüllung, die Schutz vor mechanischen und sonstigen Umgebungseinflüssen sowie elektrische Isolation gewährleistet.

In Bezug auf den Aufbau und insbesondere die Isolierung unterscheiden sich Niederspannungs- und Hochspannungsleitungen erheblich und unterliegen unterschiedlichen Normengruppen bei der Bauart und der Installation.

Bei einigen Anwendungen werden auch geschirmte Kabel eingesetzt. Diese haben neben Mantel- und Isolierschichten einen elektrischen leitfähigen Schirm, der Schutzfunktionen übernimmt. Kabel mit konzentrischem Leiter (z. B. NYCWY) werden oft eingesetzt, wo erhöhter elektrischer als auch mechanischer Schutz gefordert wird. Verlegung im Wasser, im Freien, in Beton, in Innenräumen und Kabelkanälen. Der konzentrische Leiter kann als PE-, PEN-Leiter oder als Schirm verwendet werden.

Darüber hinaus sind Kabelführungssysteme (Kabelkanäle, Kabelhalter, etc.), die die sichere Befestigung und Führung und ggf. mechanischen Schutz gewährleiten, Teil der Kabel- und Leitungsanlage. Ebenfalls gehören die Kabelanschlüsse (Kabelschuhe, Schraubklemmen etc.) zum System.

## 5.4.2 Technologien

### 5.4.2.1 Erdverlegte Kabel

Erdverlegte Kabel sind für die direkte Verlegung in den Boden geeignet und zeichnen sich durch entsprechende Robustheit der Leiter als auch Ummantelung und Isolierung aus. Sie können auf den Niederspannungs- und Hochspannungsbereich ausgelegt sein. Bei der Verlegung sind die üblichen Anforderungen z. B. zu Verlegetiefe und steinfreien Boden etc. zu beachten.

### 5.4.2.2 Freileitungen

Freileitungen bei PV-Anlagen kommen typischerweise nur für den Mittelspannungs- und Hochspannungsbereich und bei größeren Entfernung zur Netzanbindung zur Anwendung. Üblicherweise werden sie freihängend über Isolatoren an Strommasten installiert; die Leiter haben keine isolierende Umhüllung.

### 5.4.2.3 Installationsleitungen

Hierunter fallen die üblichen Kabel und Leitungen innerhalb des PV-Generators sowie Teile der AC-Verbindungen. Sie werden üblicherweise in Kabelführungssystemen geführt und als isolierte Kabel- und Leitungen ausgeführt. DC-seitig werden zur Verbindung der Module und Modulstränge überwiegend flexible Leitungen eingesetzt, die mittels Steckverbindern verbunden werden. AC-seitig kommen eher starre Leitungen zum Einsatz, die in die Anschlussgeräte oder –Boxen eingeführt und an Kabelklemmen angeschlossen werden.

Die DC-Hauptleitungen und die AC-Leitungen werden teilweise als Erdverlegte Kabel ausgeführt und wären somit dem Abschnitt 6.4.2.2 zuzuordnen.

### 5.4.3 Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur

Auf der DC-Seite werden die üblichen DC-Komponenten eingesetzt. Für die AC-Seite gibt es ebenfalls gängige Komponenten. Durch die Installation und den Betrieb darf die Bahnanlage nicht gestört werden. Somit können gewisse Einschränkungen bzw. Herausforderungen (mechanische Eigenschaften, Isolationseigenschaften, Verlegarten etc.) je nach Anwendungsfall entstehen. Geeignete Komponenten sind am Markt verfügbar.

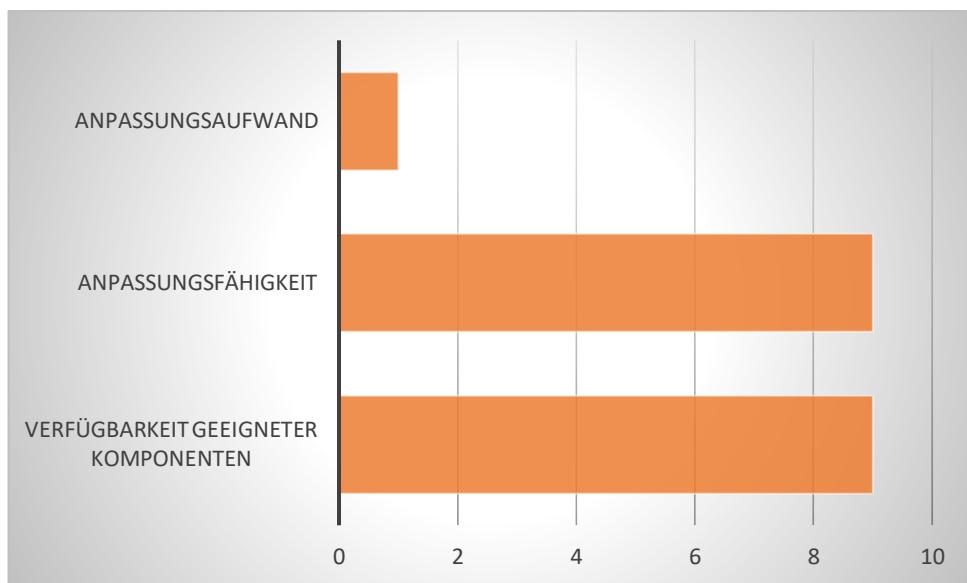


Abbildung 11: Bewertungstabelle: geeignete Kabel- und Leitungssysteme (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch) Quelle: TÜV Rheinland

## 5.5 Steuerungs- und Überwachungssysteme

### 5.5.1 Funktion

Um Betriebsparameter steuern oder überwachen zu können, muss ein Steuerungs- und Überwachungssystem installiert sein. Üblicherweise sind diese Systeme mit einem Fernzugriff ausgestattet. Die DC-seitige Steuerung zum Hochfahren der Systeme bzw. Abschalten der Systeme, in Abhängigkeit von der Einstrahlungsleistung, übernehmen die Wechselrichter. Sie stellen auch den optimalen Arbeitspunkt bei unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen ein. Üblicherweise sind die Wechselrichter auch mit einem Monitoringsystem zur Parameterüberwachung ausgestattet.

Während des Betriebs der PV-Anlage kann es zu Störungen kommen, die nur durch den Einsatz eines Überwachungssystems, das die Betriebsweise der Anlage und die zugehörigen Parameter beobachtet, erkannt werden können. Daher ist das Überwachungssystem ein entscheidender Punkt für den erfolgreichen Betrieb der PV-Anlage. Im Falle einer Fehlererkennung wird in einem zweiten Schritt die Fehlerquelle untersucht und ggf. Maßnahmen eingeleitet. Eine genaue Überwachung kann wertvolle Informationen liefern, die für mögliche Verbesserungsschritte genutzt werden können.

Darüber hinaus wird durch die Netzbetreiber eine Fernwirkanlage verlangt, über welches die Anlagen Leistung stufenweise bis auf 0 % reduziert werden kann.

Neben den Betriebsparametern sind Wetterdaten, insbesondere Einstrahlung und Temperatur, wichtig, um die Betriebsparameter entsprechend einordnen zu können.

Darüber hinaus sind üblicherweise Energiezähler und Netzüberwachungssysteme, bzw. Systeme zur Einstellung der erforderlichen Netzparameter, Bestandteil der Anlage. Auch diese Systeme sind, zumindest zu einem gewissen Teil, üblicherweise in den Wechselrichtereinheiten integriert. Darüber hinaus kommen auch Steuer- und Überwachungssysteme zum Einsatz, die in weiteren Einheiten z. B. in den Unter- oder Hauptverteilungen, integriert sein können. Zu diesen Systemen können Netzüberwachung, Isolationsüberwachung und Fernsteuereinheiten gehören.

Teil der Netzüberwachung sind auch Abschalteinrichtungen (z. B. ENS oder Netz- und Anlagenschutz (NA-Schutz)). Es handelt sich dabei um eine vorgeschriebene Vorrichtung, die ein weiteres Einspeisen von Solarenergie sicher verhindert, wenn das öffentliche Versorgungsnetz ausgesessen sein sollte.

Diese Systeme werden hier nicht weiter behandelt, da dieser Teil standardmäßig und klar durch Normen und RiL geregelt ist und/oder mit dem lokalen Netzbetreiber abzustimmen ist.

### 5.5.1.1 Aufbau

Das System besteht aus Einheiten zur Abfrage, Darstellung und Steuerung der Betriebsparameter. Meist wird dies durch eine Steuerungszentrale vor Ort und/oder mittels Fernzugriff gewährleistet. Üblicherweise sind Routinen zur automatischen Auswertung von Betriebsparametern und Fehlererkennung/-meldung und Weiterleitung integriert. Einige Systemelemente sind bereits in den Wechselrichtern integriert. Diese bieten oft eigene Onlineportale mit Fernzugriff und Dashboards zur Anzeige und Analyse an.

Weitere Parameter, wie Wetterdaten oder spezifische Messgrößen können in die vorhandenen Systeme oder übergeordnete Systeme eingebunden werden. Betreiber von mehreren PV-Anlagen führen oft die einzelnen PV-Anlagen in einer zentralen Leitstelle zusammen und binden die unterschiedlichen Systeme in ein übergeordnetes und individuell zugeschnittenes System ein.

## 5.5.2 Technologien

### 5.5.2.1 Wechselrichterüberwachung allgemein

Die allgemeinen Betriebszustände und Parameter der Wechselrichter (Schaltzustände, Ein- und Ausgangsparameter, Fehler- und Warnmeldungen, etc.) werden überwacht. Darüber hinaus können Fehler- und Warnmeldungen automatisch generiert und weitergeleitet bzw. archiviert werden. Üblicherweise erlauben die Geräte einen Fernzugriff und bieten herstellerabhängige Portale zur Überwachung und Analyse. Generell besteht bei den meisten Herstellern auch die Möglichkeit mittels Interface oder Datenexport die Überwachung durch ein geräteunabhängiges Monitoringsystem zu bewerkstelligen.

### 5.5.2.2 Strangüberwachung DC-Eingang

Bei der Strangüberwachung werden die Parameter Strom und/oder Spannung der einzelnen Modulstränge bzw. von paarweise angeschlossenen Strängen erfasst und analysiert. Somit sind Fehler (Strom-

oder Spannungsabweichung) im Modulstrang erkennbar. Einzelne Modulfehler sind zwar nicht direkt, aber möglicherweise indirekt über die Beeinflussung der Strangparameter erkennbar. Die Strangüberwachung kann direkt im Wechselrichter erfolgen (bei Strangwechselrichter) oder in Generatoranschlusskästen (bei Zentralwechselrichtern) mit zusätzlicher Überwachungseinheit.

### 5.5.2.3 Überwachung DC-Eingang bei Zentralwechselrichtern ohne Strangüberwachung

Technologiebedingt sind bei Zentralwechselrichtern die einzelnen Modulstränge durch Parallelverschaltung zu Teilgeneratoren zusammengeschaltet. Somit können nur die Eingangsparameter von gesamten Teilgeneratoren überwacht werden. Fehler in einzelsträngen Strängen sind nicht direkt erkennbar.

## 5.5.3 Herausforderungen für die Einbindung in die Bahninfrastruktur

Die Anlagen müssen an das Bedarfsprofil des Bahnnetzes angepasst werden. Ggf. sind sehr dynamische Leistungsregelungen erforderlich. Je nach Netzgröße, Kapazität und Bedarfsprofil, kann dies sehr unterschiedlich sein. Es ist zu analysieren, inwiefern die Einbindung in übergeordnete Netzstrukturen möglich ist.

Angepasste oder zusätzliche Sicherheitselemente bzw. Elemente zur Netzüberwachung und Einspeiseregelungen können je nach Anwendungsfall erforderlich sein. Die Anpassungen erfordern Hardware und Softwaremodifikationen.

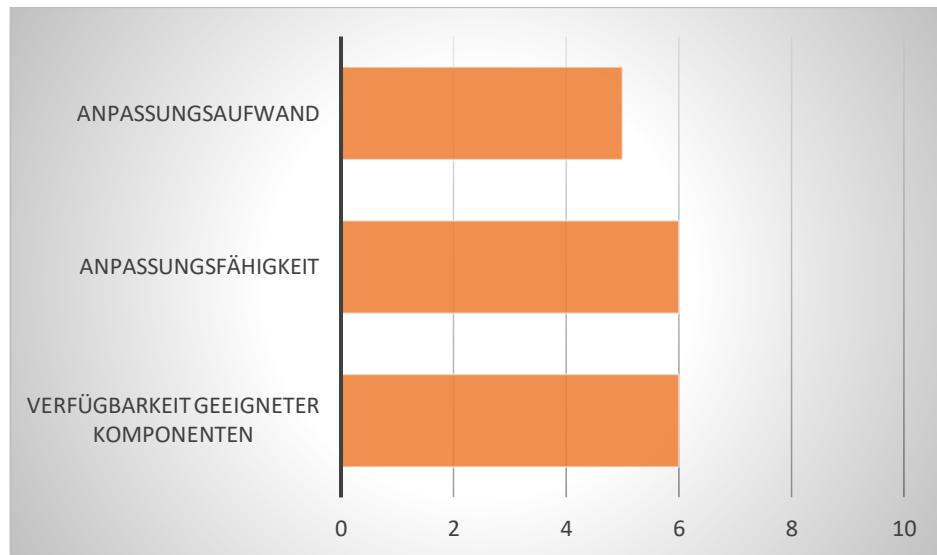


Abbildung 12: Bewertungstabelle: geeignete Steuerungs- und Überwachungssysteme (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch). Quelle: TÜV Rheinland

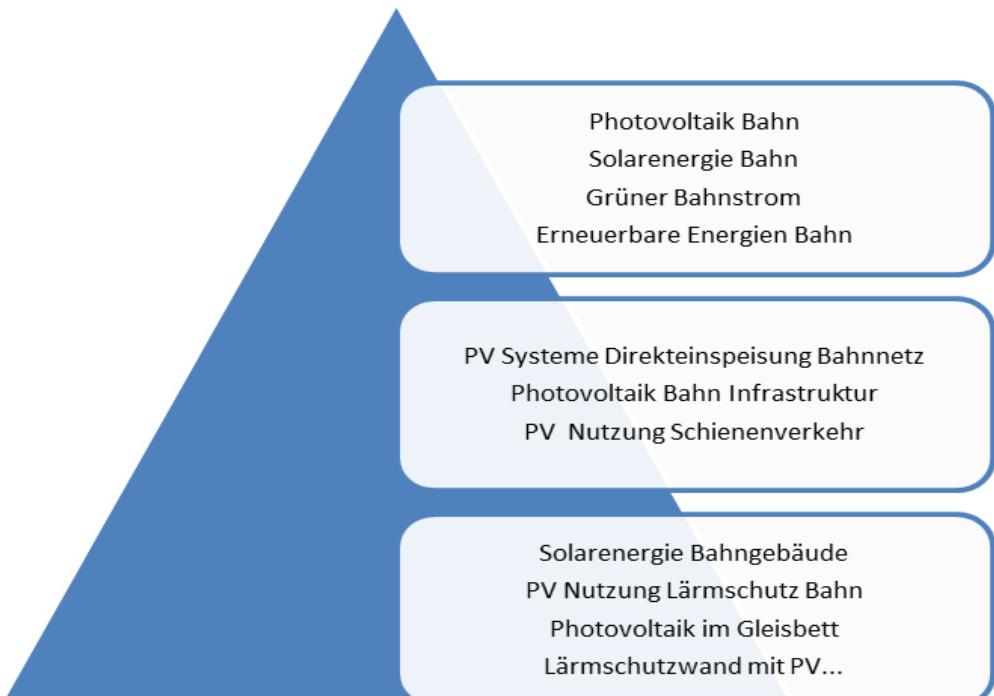
# 6 Bereits realisierte Projekte

## 6.1 Durchführung der Recherche

Durch die Erfassung und Bewertung bereits erfolgreich in Betrieb befindlicher PV-Systeme innerhalb der Schieneninfrastruktur können sowohl Erfolgsfaktoren als auch besondere Herausforderungen an Design und Komponenten identifiziert werden. Eine Recherche zu weltweit durchgeföhrten Projekten soll auch laufende oder in Planung befindliche Projekte oder Studien umfassen, um die verfolgten Strategien, die Akteure in diesem speziellen Segment und nach Möglichkeit bereits erfolgreich im Bahnbetrieb eingesetzte Komponenten zu ermitteln.

Die systematische Recherche wurde methodisch in insgesamt vier verschiedenen Ebenen in Deutsch und Englisch durchgeföhr. Die Abfragen erfolgten mit relevanten Stichwortkombinationen, wobei der Detaillierungsgrad von allgemein zu konkret durchlaufen wurde. Alle Kombinationen wurden außerdem mit üblichen Synonymen durchgeföhr.

Beispiel Detaillierungsgrad:



### Recherche-Ebenen

- [1] Allgemeine deutsch- und englischsprachige Suchmaschinenrecherche (**Google** und **BING**) sowie visuelle Suchmaschinenrecherche (Online-Pinnwand **Pinterest** für Grafiken und Fotografien)
- [2] PV-branchenspezifische Informationen in deutschen und internationalen Fachzeitschriften für PV bzw. Erneuerbare Energien und deren Newslettern u.a.
  - Deutsch: **PHOTON**; **Sonne, Wind und Wärme**; **Solarserver**

- Englisch: **PV Tech; PV Power Tech; PV Magazine**
- Themenrelevante Foren in Social Media-Plattformen wie **XING** und **LinkedIn**

[3] Ausgewählte Fachgesellschaften, Forschungsplattformen, Ministeriumsinformationen ergaben Informationen zu geförderten Studien und Aktivitäten in diesem Bereich.

- Fachgesellschaften, z. B.  
**DGS** - Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie,  
**BSW** - Bundesverband der Solarwirtschaft  
**IEA** - Internationale Energieagentur für sichere und nachhaltige Energiezukunft.
- Forschungsplattformen, z. B.  
**Cordis** der europäischen Union,  
**FIS** (Forschungsinformationssystem Mobilität und Verkehr),  
**KIT**  
**Fraunhofer Gesellschaft** mit vielfältigen Forschungsaktivitäten in der Solarbranche  
**(ISE)**,  
**ResearchGate** - internationale Informationsplattform für Forschungsvorhaben  
Europäische Akademie Bozen (EURAC)  
Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC).
- Informationsseiten der deutschen und ausgewählter internationaler Behörden, z. B.  
**Umweltbundesamt**,  
**Bundesministerium für Digitales und Verkehr**,  
**Bundestag - Anfragen und Antworten**,  
**Department of Energy (energy.gov - Ministerium für Energie der USA - Förderprojekte)**.

Unternehmenswebseiten von einigen namhaften Akteuren der PV-Industrie, die die gesamte Lieferkette abdecken, wurden exemplarisch nach Informationen z. B. Referenzen, Auszeichnungen, Pressemitteilungen o. ä. durchsucht. Dies erwies sich als wenig erfolgreicher Weg.

[4] Eine weitere Recherche-Ebene ergab sich aus den aufgefundenen Projekten und Studien mittels weiterführender Informationen und Links zu Aktivitäten, Akteuren, Herstellern und teilweise Komponenten im Einsatz.

Darüber hinaus wurden Projektleiterinnen und -leiter von TÜV Rheinland nach durchgeföhrten Sonderprüfungen für PV-Komponenten befragt, die einen Einsatz speziell für den Bahnbetrieb bedeuten oder vermuten lassen (keine Ergebnisse).

## 6.2 Rechercheergebnisse

### 6.2.1 Grundsätzliches

Zusammenfassend wurden international eine große Zahl an Forschungsaktivitäten, geförderten und auch privat finanzierten Initiativen und Testprojekten im Zusammenhang mit der verstärkten Nutzung

erneuerbarer Energien und speziell der Nutzung der PV im Bahnbetrieb recherchiert. Die Selbstverpflichtung zum Erreichen der Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 für Europa [12] und weiteren Industriekontinenten wie z. B. den USA, Japan, Südkorea, Australien, Brasilien oder den VAE zur Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens spiegeln sich in den nationalen Energie-Strategien der Länder wider. Für die nationalen Klimaschutzziele in Deutschland wird mit der 2021 in Kraft getretenen Novelle des Klimaschutzgesetzes die Klimaneutralität bereits bis 2045 anvisiert [13].

Der Verkehrssektor ist dabei regelmäßig einer der größten Energieverbraucher der Länder. Dem Schienennetzverkehr wird jeweils eine besondere Bedeutung zugeordnet, sowohl in Hinsicht des vorhandenen Potenzials zur umfassenden Nutzung erneuerbarer Energien, als auch der möglichen Kapazitätserweiterung zum Zweck der Verschiebung von Transportaufgaben von der Straße in Richtung Schiene.

Die Elektrifizierungsrate der vorhandenen Infrastruktur ist aktuell heterogen ausgeprägt. Während diese im Europäischen Union(EU)-Mittel bei 54 % liegt, ist das Streckennetz der Schweizer Vollbahn bereits zu 100 % elektrifiziert. Deutschland liegt hier nach Information des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, Stand März 2021 [14], mit 61 % im unteren Drittel.

In der Antwort der Bundesregierung auf eine „kleine Anfrage“ mehrerer Abgeordneter und der Fraktion „Die Linke“ im April 2020 zum Einsatz Erneuerbarer Energien bei der Bahn werden der aktuelle Stand zu den bisherigen Aktivitäten und den Projekten des DB Konzerns ausführlich erläutert [15]. Die einzelnen Antworten werden nachfolgend den jeweiligen Themen zugeordnet mit aufgeführt.

## 6.2.2 Bahnstromsysteme

Nur bei den Ländern, in denen ein vom allgemeinen öffentlichen Stromnetz abweichendes Bahnnetz (Frequenz) betrieben wird, wird der Direkteinspeisung besondere Aufmerksamkeit gewidmet und nur bei einem Bahnnetz mit 15 kV Wechselspannung und 16,7 Hz werden Komponenten zur Direkteinspeisung benötigt, die auch für den Einsatz in Deutschland verwendet werden können.

In Europas landesweiten Eisenbahnnetzen sind historisch bedingt vor allem vier Stromsysteme verbreitet, teilweise auch grenzüberschreitend wie beispielsweise im Raum Deutschland/Österreich/Schweiz oder in Südosteuropa.

Andererseits gibt es in manchen Staaten auch zwei unterschiedliche Bahnstromsysteme ihrer Vollbahnen (Frankreich, Spanien, Russland) [16].

- Gleichstrom DC 1.500 V
- Gleichstrom DC 3.000 V
- Wechselstrom AC 15 kV/16,7 Hz
- Wechselstrom AC 25 kV/50 Hz

Dem seit 1912 in Deutschland üblichen System mit 15 kV/16,7 Hz Wechselstrom [156] schlossen sich die österreichischen, schweizerischen, schwedischen und norwegischen Staatsbahnen an [17]. Darüber hinaus wird weltweit eine große Vielfalt an weiteren Bahnsystemen betrieben.

Projekte für direkt in das Bahnnetz einspeisende PV-Systeme wurden in Österreich, der Schweiz und in Deutschland gefunden. Die größte Erfahrung mit einer Anzahl kleinerer Projekte ist hier offensichtlich bei der ÖBB (Österreichische Bundesbahn) vorhanden.

### 6.2.3 Internationale Schwerpunktentwicklungen zur verstärkten Nutzung der PV

Ziel der veröffentlichten Aktivitäten ist allgemein, die elektrifizierten Strecken mit 100 % Erneuerbaren Energien – überwiegend PV und Wind – zu versorgen.

Wo keine ökonomisch sinnvolle Elektrifizierung möglich ist, orientiert man sich auf Alternativantriebe. Mehrere Fundstellen beschreiben Batteriezüge, die an bedarfsgerecht positionierten Orten über Speichereinheiten (Batterien) aufgeladen werden. Diese Speichereinheiten sollen mit Erneuerbaren Energien – bevorzugt PV – beliefert werden.

#### (1) Schwerpunkt große Freifeldsysteme

Der Schwerpunkt der PV-Systeme zur Bahnstromversorgung liegt international bei großen Erzeugungseinheiten im zweistelligen MW-Bereich mit langjährigen (25 – 30 Jahre) Energie-Lieferverträgen für die Bahn. Die Recherche ergab mehrere, bereits erfolgreich operierende PV-Großsysteme, die als PV-Freifeldanlagen nahe der Bahninfrastruktur betrieben werden. Hierfür werden Standardsysteme verwendet, die in das allgemeine 50-Hz-Stromnetz einspeisen.

Die DB betreibt seit 2021 eine große PV-Anlage dieser Art in Gaarz (Brandenburg) mit ca. 90 MWp, Liefervertrag (PPA) für 30 Jahre, Betreiber Enerparc. Eine zweite Anlage in Wasbek (Schleswig-Holstein) mit 42 MWp befindet sich seit 2020 im Bau. Diese Anlage soll über das nahegelegene Umspannwerk der DB in Neumünster erstmalig direkt in das Bahnnetz einspeisen. Nach einer Presseinformation der DB vom 23.04.2023 ist die Anlage in Betrieb genommen [104].

#### (2) Schwerpunkt Aufdachanlagen

Daneben liegt der Fokus auf PV-Systeme verschiedener Größe, oder auf Bahnhöfen und anderen bahn-eigenen Gebäuden an der Infrastruktur. Hier werden teilweise sehr große überdachte Bereiche mit Aufdach-PV oder BIPV ausgestattet. Bei Neubauten oder Rekonstruktionen wird dies üblicherweise mit Energie-Effizienzmaßnahmen und ebenso verbessertem Service und Komfort für Passagiere und Personal kombiniert, um zusätzlich die Akzeptanz und Nutzung des Verkehrsmittels Bahn zu erhöhen. Eine weitere Motivation für kombinierte Bahnhofsprojekte ist die Verbesserung des Stadtbildes durch architektonisch besonders ansprechende Lösungen. Die erzeugte Energie der bahnhofgebundenen PV-Systeme wird größtenteils direkt in den Stationen verbraucht (Eigenverbrauch).

Bei größeren Bahnhofs-Installationen oder PV-Anlagen auf Gebäuden mit geringem Eigenbedarf ist auch eine direkte Einspeisung in das Bahnnetz über geeignete spezielle Umwandlungs-Komponenten (siehe Abschnitt 5.3) in die Fahrleitungsspannung von 15 kV, 16,7 Hz denkbar. Alternativ kann auch in das allgemeine dreiphasige Netz mit der Frequenz 50 Hz eingespeist werden.

Global wurden bereits zahlreiche PV-Dachsysteme sehr unterschiedlicher Bauarten und Leistungsklassen im Betrieb überwiegend an Bahnhöfen gefunden. Auch PV-Systeme auf anderen Bauten, wie auf einem mehrere Kilometer langen Bahntunnel oder einer Bahnsteigüberdachung auf einer Brücke zeigen das vielfältig vorhandene Potenzial zur PV-Nutzung. In dieser Anwendungsklasse gibt es ebenfalls größere, leistungsstarke Anlagen.

Die DB Station & Service AG betreibt nach Auskunft der Bundesregierung bisher nur drei kleinere PV-Anlagen im Eigenbetrieb: die Gleishalle in Berlin Hbf, mit einer installierten Leistung von 189 kWp sowie die Bahnhofsgebäude Horrem (38 kWp) und Lutherstadt Wittenberg (24 kWp). Darüber hinaus gibt es einige weitere kleinere PV-Anlagen, die von Dritten über Dachvermietungsmodelle betrieben werden [15].

Im Jahr 2018 wurden mit insgesamt ca. 500 kWp installierter PV-Leistung dabei ca. 0,2 % des Strombedarfs der DB Station & Service AG unmittelbar durch PV-Anlagen an Bahnhöfen abgedeckt [15].

Die DB Station & Service AG und die DB Energie GmbH prüfen derzeit, inwiefern künftig Flächen an Bahnhöfen und auf Bahnhofsdecken für eine Stromerzeugung mittels PV-Anlagen genutzt werden können.

### (3) Schwerpunkt Lärmschutzwände (LSW)

Als weiterer Schwerpunkt der Aktivitäten zur Nutzung der vorhandenen und auch der geplanten Infrastruktur entlang des Schienenwegs wurden Lärmschutzwände entlang der Bahnstrecken identifiziert. Seit ca. 1990 wurden in etlichen Ländern die verschiedenen konstruktiven Möglichkeiten erforscht und getestet:

Die PV-Module wurden beidseits über Unterkonstruktionen senkrecht oder abgewinkelt auf die eigentliche LSW montiert oder direkt aufgeklebt. Es wurden alternativ obenauf Modulreihen senkrecht oder abgewinkelt aufgesetzt, oder in den letzten Jahren zunehmend direkt in die LSW integriert. Hierbei kommen auch bifaziale, teiltransparente PV-Module zum Einsatz, die optisch ansprechende halbtransparente Designs ermöglichen.

Eine Übersicht der verschiedenen untersuchten Konstruktionen von PV-Modulen an Schallschutzwänden entlang von Straßen wurde in einem Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen 2015 veröffentlicht [18].

Obwohl vielfältige Forschungsarbeiten und Entwicklungen, die einerseits eine erhöhte Belastbarkeit am Schienenweg und andererseits den erforderlichen Schallschutz berücksichtigen, das große Interesse der Bahnbetriebe und das Engagement der Industrie für diese Anwendungsklasse belegen, erbrachten die Recherchen abgesehen von kleineren Pilotprojekten keine in Betrieb befindlichen größeren Anlagen an Schallschutzwänden der Bahnstrecken.

Für Schallschutzwände an Autobahnen oder anderen vielbefahrenen Straßenabschnitten gibt es im Gegensatz dazu eine (überschaubare) Anzahl in Betrieb befindlicher Systeme. Hier ist der Anwendungsfall prinzipiell gleichartig, jedoch sind die durch den Verkehr erzeugten aerodynamischen Belastungen geringer einzuschätzen als beim Durchfahren von Zügen, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten.

Die bereits seit den 1990er-Jahren, langjährigen Erfahrungen mit PV an LSW haben jedoch auch hierbei noch nicht zum flächendeckenden Bau dieser Anwendungsklasse geführt.

In einem Bericht des Bundesrats (Schweiz) [19] wurden Erkenntnisse einer Studie aus 2021 zu den Haupteinschränkungen für diesen Einsatz wie folgt zusammengefasst:

- Mindestabstände, die aus Sicherheits- und Betriebsgründen zu Verkehrswegen oder Bahnstromleitungen eingehalten werden müssen
- akustische Auswirkungen des Vorhandenseins von reflektierenden PV-Modulen auf überwiegend absorbierenden Wänden
- Beschattungen
- Hindernisse beim erforderlichen Zugang zu den Wänden
- die erforderliche Investition ist höher als bei einer energetisch vergleichbaren Anlage auf Gebäudedächern

Als Kostentreiber werden die notwendigen Zulassungsverfahren und Studien sowie die zusätzlichen Kosten für den Anschluss der Anlage an einen Anschlusspunkt, sei es eine Infrastruktur des Bundesamtes für Straßen (ASTRA), der SBB oder das nächstgelegene öffentliche Netz aufgeführt [19].

Es darf angenommen werden, dass die genannten Punkte auch in Deutschland zutreffen. Akzeptanzprobleme der Anwohnerinnen und Anwohner und Einwände von Naturschützerinnen und -schützern wurden als weitere Hemmnisse und Zusatzkostentreiber in einzelnen Projekten genannt.

Nach Auskunft der DB AG gab es bis April 2020 keine LSW -Systeme mit integrierter PV-Nutzung, die eine Zulassung für den Eisenbahn-Betrieb haben. „Die DB AG beobachtet den Markt für diese Systeme und die weitere Entwicklung“ [15].

Zur Erprobung von PV-Anlagen auf LSW an Streckenabschnitten der DB Netz AG wurden im Rahmen des Konjunkturprogramms II in Nürnberg (166 kWp) und Duisburg (179 kWp) PV-Anlagen an LSW errichtet. Am Standort Vaterstetten wird eine PV-Anlage zu Probezwecken auf einer LSW aus Holz von einem dritten Unternehmen betrieben. Alle drei Anlagen sind bereits über zehn Jahre in der Erprobung.

#### (4) Schwerpunkt Lärmschutzwall

Auf Lärmschutzwällen wurden nur vereinzelt Projekte recherchiert, obwohl hier die Belastung auf die PV-Konstruktion im Vergleich zu LSW deutlich geringer ist und der Einsatz von Standardmodulen angenommen werden kann. Die bisherige Verbreitung von Lärmschutzwällen entlang des Schienenweges ist deutlich geringer einzuschätzen als bei LSW.

Es wurden auch Konstruktionen gefunden, die eine Mischung aus LSW und Lärmschutzwall darstellen, z. B. wurde ein Lärmschutzwall mit oben aufgesetzt montierten PV-Modulen ergänzt.

#### (5) Spezialfall PV im Gleisbett

Die Idee der potenziellen Nutzung des Gleisbetts für die Energieerzeugung wurde von zwei international tätigen Akteuren in Europa und einer Interessensgruppe in Japan aufgegriffen. Während die zwei europäischen Akteure Bahnschwellen bisher üblicher Größe im Gleisbett für die Installation von PV-Modulen entweder als Unterlage oder direkt zur Integration nutzen, testeten die japanischen Forscher einen Platzierung größerer PV-Module im Gleisbett.

Darüber hinaus wurde eine chinesische Potenzialstudie veröffentlicht, die ebenso von PV im Gleisbett – schotterlos – ausgeht und eine wartungsarme Anwendung annimmt (Abschnitt 6.6).

Bei diesem Anwendungsfall sind allerdings die höchsten mechanischen Beanspruchungen für die im Gleisbett installierten Komponenten zu erwarten, die eine Nutzung von Standardkomponenten ausschließen. Schwingungen, aerodynamische Belastungen, Verschmutzungen, Diebstahl- und Vandalismus-Risiko sowie Verschattungen erscheinen als wichtige Hindernisse für eine wirtschaftlich sinnvolle Implementierung. Positiv zu werten ist das große vorhandene Flächenpotenzial.

Die Recherche ergab außerhalb der genannten Testprojekte geringer Größe aktuell keine im Betrieb befindlichen Systeme.

#### (6) Nicht elektrifizierte Strecken

Bei nicht elektrifizierten Strecken liegt der Fokus auf dem Betrieb klimaneutraler Triebwagen, z. B. batteriebetriebener Hybrid-Triebwagen. Die Batterien sollen mit Erneuerbarer Energie aufgeladen werden. Die PV-Stromerzeugung direkt am Bahnhof oder anderen ortsfesten Stationen an definierten Streckenabschnitten wird aktuell in mehreren Ländern erprobt und favorisiert.

Ergänzend orientieren sich einige Ländern, allen voran Indien, seit ca. 5 Jahren auf die PV-Stromversorgung direkt vom Dach der Triebwagen und der Waggons. Diese Energie (DC) wird als Eigenverbrauch in die Bordnetze (DC, 3 x 400 V AC) eingespeist, z. B. für Steuerung, Beleuchtung und Belüftung.

## 6.3 Die Gesamtzahl recherchierter PV-Projekte und Studien zur Nutzung des PV-Potenzials

Weltweit gibt es bereits eine sehr große Anzahl realisierter PV-Projekte in der Bahninfrastruktur wie sie unter Kapitel 4.2 beschrieben wurden. Die genaue Anzahl ist nicht bekannt und auch für diese Potenzialstudie nicht relevant. Die Größenordnung der Fundstellen während dieser Recherche ergibt jedoch einen Hinweis auf die Schwerpunkte verschiedener Länder anhand erfolgter Untersuchungen und bereits erfolgreich betriebener PV-Energieerzeugung.

Die nachfolgende Tabelle gibt die Anzahl der PV-Projekte wieder, die mittels der unter 4.2 beschriebenen Recherchen mit Angaben zum Ort, der Anwendungsklasse, zum Installationsjahr und Leistungs- bzw. Größenangaben recherchiert wurden.

Bei etlichen Projekten wurden darüber hinaus Angaben zu den Projektbeteiligten gefunden, während es zu den eingesetzten Komponententypen bzw. deren Herstellern und auch den Kosten nur sehr wenige Informationen gibt.

Es wurden darüber hinaus verschiedene Quellen evaluiert, die über den erreichten Status oder geplante Aktivitäten berichten. Diese beziehen sich überwiegend auf Indien, das hier eine besondere Intensität zeigt. Die genannten Quantitäten sind jedoch nicht belastbar, da das gesamte Feld sehr dynamisch ist und teils verschiedene Angaben gefunden wurden. Zur Orientierung zu den berichteten Aktivitäten im Marktsegment wurden daher nur grobe Angaben aufgeführt.

Zahlenmäßig wurden die meisten PV-Projekte für Aufdachanlagen bei Bahngebäuden genannt. Eine größere Anzahl von Freilandprojekten ist aktuell im Bau oder in der Ausschreibung. Das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 hat seit ca. fünf Jahren einen regelrechten Boom für Erneuerbare Energien im Rahmen von Bahnprojekten ausgelöst.

TABELLE 5: ANZAHL DER AUFGENOMMENEN RELEVANTEN FUNDSTELLEN FÜR REALISIERTE PV-PROJEKTE

ART DER EINSPEISUNG	IN BETRIEB/ TESTBETRIEB	IM BAU	STUDIEN
<b>DIREKTEINSPEISUNG BAHN- NETZ (VGL. KAP. 6.4)</b>	9	1	8
<b>EINSPEISUNG ÖFFENTLICHES 50-HZ-NETZ (VGL. KAP. 6.5)</b>	37	4	18
<b>GLEICHSTROMEINSPEISUNG</b>	2	-	-

## 6.4 Projekte für Direkteinspeisung

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
Anwendungsklasse 1: Am oder im Gleisbett								
1	Montage auf Schwellen	Deutschland, Schweiz	2018	DB, Bankset Energy	38 Stk	Test*		<a href="http://www.bank-set.com/">http://www.bank-set.com/</a>
2	Schwellen mit integriertem PV-Modul	Italien, Netz von Ferrovie Emilia Romagna		Green-rail		Test*	Förderung durch EU Innovationsprogr. "Horizon 2020",	<a href="https://cordis.europa.eu/project/id/738373/reporting">https://cordis.europa.eu/project/id/738373/reporting</a>
3	Montage auf + zwischen den Schwellen	Japan	2014	Umweltministerium, NEDO, EB-Gesellschaften	37 Wp / Modul	Test	Gemeinsames Projekt mit Energieversorger, Modulhersteller zum Test der Direktein speisung durch Module im Gleisbett	<a href="http://www.flug.co.jp/?page_id=55">http://www.flug.co.jp/?page_id=55</a>
Anwendungsklasse 2: Installation an oder auf einer LSW								
4	Weltweit 1. Bahn-Stromanlage LSW 16,7 Hz	Österreich, Tullnerfeld	2020	ÖBB	30 kWp 16,7 Hz	Test* Betrieb	Flexible Module aufgeklebt vs. aufgeständerte Module im Test, Pilotprojekt	<a href="http://Bahn- und Drehstrom - ÖBB-Infrastruktur AG (oebb.at)">Bahn- und Drehstrom - ÖBB-Infrastruktur AG (oebb.at)</a>
Anwendungsklasse 3: Installation an oder auf einem Lärmschutzwall								
-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anwendungsklasse 4: Installation an oder auf baulichen Bahneinrichtungen								
5	Weltweit 1. Bahn-Strom PV-Aufdachanlage 16,7 Hz	Österreich, Tonnendach Frequenz-Umformerwerk Auhof	2020	ÖBB	88,3 kWp / 16,7 Hz, 80 MWh	Betrieb	Die erzeugte Energie wird direkt im Umformerwerk verbraucht, Überschüsse in Fahrleitung gespeist	<a href="http://Bahn- und Drehstrom - ÖBB-Infrastruktur AG (oebb.at)">Bahn- und Drehstrom - ÖBB-Infrastruktur AG (oebb.at)</a>
6	Aufdachanlage, Frequenzumformer	Frequenz-Umformerwerk in Zürich-Seebach,	2020	SBB, Innovationsfonds SBB + Förderprogramm ESÖV 2050 des BAV	132 kW/ 80 kVA 125 MWh /a (16,7 Hz)		Direktein speisung, Verwendung: Bahnstrom der SBB, Art der PVA: Kiesdach, nach Süden aufgeständert, SBB nutzte Pionierleistung der ÖBB, Spezial-WR der Firma Fronius. Einspeisung in Fahrleitung über bestehende Transformatoren.	<a href="http://www.swissolar.ch, [20]">www.swissolar.ch, [20]</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
Anwendungsklasse 5: Installation neben dem Schienenweg								
7	Deutschland (DE), Freifläche mit Direkt Einspeisung	Wasbek/SH	2020 – 2022	DB, Enerparc AG	42 MWp	Betrieb	1. DB-Projekt mit Direkteinspeisung	<a href="https://www.solarserver.de/2020/01/21/db-speist-erstmals-photovoltaik-bahnstrom-direkt-ein/">https://www.solarserver.de/2020/01/21/db-speist-erstmals-photovoltaik-bahnstrom-direkt-ein/</a>
8	Österreich (AT), 1. PV-Projekt Direkteinspeisung Bahnnetz	Wilfleinsdorf bei Bruck an der Leitha	2016	ÖBB	1 MWp 1,1 Mio kWh	Betrieb	96 WR /16,7 Hz. Direkte Einspeisung in die Bahn-Fahrleitung.	<a href="https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-drehstrom/solarenergie/wilfleinsdorf">https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-drehstrom/solarenergie/wilfleinsdorf</a>
9	GB, Freifläche Direkteinspeisung	Hampshire, Aldershot	2019	Network Rail, Riding Sunbeams (Forschung)	31 kWp, 100 Module	Betrieb	Test, aktuell Belieferung Beleuchtung und Signalanlagen Skalierung geplant für Traktionsenergie	<a href="https://www.theguardian.com/business/2019/aug/22/rail-line-in-hampshire-is-worlds-first-to-be-powered-by-solar-farm">https://www.theguardian.com/business/2019/aug/22/rail-line-in-hampshire-is-worlds-first-to-be-powered-by-solar-farm</a>
Anwendungsklasse 6: Sonstige Installationsorte								
-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* siehe auch unter Studien

## 6.5 Projekte für Einspeisung in das 50-Hz-Netz

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
Anwendungsklasse 1: am oder im Gleisbett								
-								
Anwendungsklasse 2: Installation an oder auf einer LSW								
1	DE, LSW Bahnstrecke	Vaterstetten	2004	Phoenix Solar, Phönix Sonnen-Fonds GmbH & Co. KG D3	180 kWp, 4 m Höhe, 17.8 MW h/a	Betrieb	1 Reihe oben Amorphe PV-Module (Herst. Mitsubishi Heavy Industries), Nachhaltigkeit vs. Brandschutz (2021 Brand!): Verwendung von heimischem Lärchenholz mit Stroh als Absorptionsmaterial in Kombination mit PV.	<a href="https://www.solar-branche.de/news/presse/pm-1399-phoenix-sonnenstrom-ag-baut-photovoltaikanlage-auf-laerm-schutzwand-erste-solare-laermschutzwand-an-bahnstrecke">https://www.solar-bran- che.de/news/presse /pm-1399-phoenix- sonnenstrom-ag- baut-photovoltaik- anlage-auf-laerm- schutzwand-erste- solare-laermschutzwand-an-bahnstrecke</a>
2	DE, LSW, „Konjunkturpaket II“, Bahnstrecke	Nürnberg, Duisburg	2011	Bund	166 kWp 179 kWp EEG Vergütung	unbekannt	Eine Reihe PV oben- auf der LSW, Bis 2020 keine Zulassung für Eisenbahnbetrieb! □ Statik, Modulbefestigung, Schallschutz (Dichtung).	<a href="#">SONNENENERGIE: Zerriebene Vergütung statt Lärm- schutz</a> [15]
3	DE, LSW Bifazial senkrecht, Straße	Neuötting	2016	Energiegenoss. Inn-Salzach (EGIS)	234 x 5 m Kosten: 75. T € 51.5 MW h/a	Betrieb	KOHLHAUER VOLTA® / R.KOHLHAUER GmbH (Herst.).	<a href="#">Photovoltaik-Lärm- schutzwand hat sich bewährt   Lärm- schutzwände und Schallschutzwände von KOHLHAUER</a>
4	LSW an BAB	Aschaffenburg	2019	Bund, Stadt Aschaffenburg, Hörnig/ O&M	890 x 3 m 3,25 Mio € 2020: ca. 112 MW h	Betrieb	KOHLHAUER VOLTA® / R.KOHLHAUER GmbH (Herst.)	<a href="#">A3: Lärm- schutzwand mit Photovoltaik: Pilotprojekt ist ein Erfolg   Die Autobahn GmbH des Bundes</a>
5	Italien, LSW an Autobahn	Isera, Brennerautobahn	2009		1,067 x 5.6 m 750 MW h/a	Betrieb	Sehr gute Ergebnisse zum Lärm- schutz, Reduzierung um 10 dB auf dem Abschnitt.	<a href="https://www.autobrennero.it/en/sustainability/photovoltaic/">https://www.autobrennero.it/en/sustainability/photovoltaic/</a>
6	LSW an Autobahn	Australien, Zufahrt Essendorn Airport, Melbourne	2007	Schott Solar (Amorphe PV)	24 kWp, 500 m		Case study 1. LSW Australien an Freeway, BIPV Module, schallreflektierend.	<a href="https://www.goingsolar.com.au/">https://www.goingsolar.com.au/</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
Anwendungsklasse 3: Installation an oder auf einem Lärmschutzwall								
6	Lärmschutzwall	Deutschland, ICE-Strecke Nürnberg-Regensburg, Pölling (Pfalz)	2012	Kreisstadt Neu-markBühl IB Treiber („Lärmschutzplaner“, Potsdam)	744 x 7 m <sup>2</sup> , 1,2 MWp, 1.2 MWh/a, 4,1 Mio €	Betrieb	Verwendung "blend-darmer" Solarmodule, Aufständerung mittels Gabionen, Einspeisung in das öffentliche Netz (EEG).	<a href="https://www.sonnenwind-waerme.de/photovoltaik/pv-laerm-schutz-neben-der-bahn">https://www.sonnenwind-waerme.de/photovoltaik/pv-laerm-schutz-neben-der-bahn</a>
7	Lärmschutzwall	Kerpen-Buir	2012	Stadt Kerpen und RWE Deutschland, Errichter: Sybac	17.000 m <sup>2</sup> , 8500 Module, 1,9 Mio kWh	Betrieb	Die Energie soll über das Verteilnetz von Buir in das Netz eingespeist werden.	<a href="https://sybac.com/pv-anlagen/referenzen.html">https://sybac.com/pv-anlagen/referenzen.html</a>
8	Lärmschutzwall	Schweiz, PV Plant Domat / Ems A13	1989 Repowering 2017		100 kWp (260 kWp)	Betrieb	In den Schweizer Alpen, 1. PV-Anlage an einer Autobahn weltweit und die größte PV-Anlage der Schweiz. Die Anlage hat über den gesamten Zeitraum gut produziert. <u>Monitoring Daten über 28 Jahre</u> , Vergleich mit Repowering Anlage (2017 – 2019).	<a href="https://www.tnc.ch/wp-content/uploads/2020/02/Artikel_photovoltaik_A13_012020.pdf">16 European Photovoltaic Solar Energy Conference, "100 kWp Gridconnected PV Plant A13 in Switzerland - 10 Years and 1'000'000 kWh Later" 28 Years of operational data (1989-2017)</a> <a href="https://www.tnc.ch/wp-content/uploads/2020/02/Artikel_photovoltaik_A13_012020.pdf">https://www.tnc.ch/wp-content/uploads/2020/02/Artikel_photovoltaik_A13_012020.pdf</a>
Anwendungsklasse 4: Installation an oder auf baulichen Bahneinrichtungen								
9	Berlin HBF		2003	DB	189 kWp	Betrieb	Durch die PV werden ca. 2 % des Strombedarfs des Bahnhofs-bereichs (inkl. aller Anlagen der Verkehrsstation, Zugangsbereiche und Bahnhofsgebäudes ohne Mieter-einzelpunkt) gedeckt.	<a href="https://www.bls-energieplan.de/de/technologien/sonnenenergie/projektdetail/projekt/PV-Anlage_Berliner_Hauptbahnhof.html">https://www.bls-energieplan.de/de/technologien/sonnenenergie/projektdetail/projekt/PV-Anlage_Berliner_Hauptbahnhof.html</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
10	Wittenberg Lutherstadt			DB	24 kWp	Betrieb	Ca. 5 % des Gesamtbedarfs des Bahnhofs.	<a href="https://www.dbin-frago.com/web/bahnhoefe/bahnhofs-und-stadtentwicklung/Gruener_Bahnhof-11114804">https://www.dbin-frago.com/web/bahnhoefe/bahnhofs-und-stadtentwicklung/Gruener_Bahnhof-11114804</a>
11	Horrem			DB	38 kWp	Betrieb	Ca. 14 % des Gesamtbedarfs des Bahnhofs.	
12	11 PV Anlagen auf Bahnhöfen der DB	Plauen, Bf Solingen, Hbf Hameln, Uelzen EG, Delmenhorst, Landshut, Mering, Plattling, Schwabach, Straubing, Vilshofen	n.n.	Dachvermietung	10...90 kWp	Betrieb		[15]
13	Österreich, Bahnhof-Aufdach PV	Wien HBF, Bahnsteigdach	2012	ÖBB	141 kWp 148 MWh/a	Betrieb	Der erzeugte Strom wird in das hauseigene Stromnetz eingespeist, z. B. Beleuchtung oder die Aufzüge des Hauptbahnhofs.	<a href="https://future-zone.at/digital-life/stromerzeugung-am-dach-des-wiener-hauptbahns/92.704.448">https://future-zone.at/digital-life/stromerzeugung-am-dach-des-wiener-hauptbahns/92.704.448</a>
14	Österreich, Aufdachanlage	Wörth, Betriebsgebäude 1	2020	ÖBB	199,9 kWp / 198 MWh / 50 Hz	Betrieb	Schrägdach, dachparallele Standardanlage	<a href="https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-drehstrom">https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-drehstrom</a>
15	Österreich, Parkdeck Überdachung	Krems,	2020	ÖBB	69,7 kWp / 72 MWh / 50 Hz	Betrieb	Flachdach, PV-Aufdach-Anlage flach	<a href="https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-drehstrom">https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-drehstrom</a>
16	Österreich	19 weitere PV-Dachanlagen	2013 - 2020	ÖBB	5 - 230 kWp	Betrieb	PV-Aufdachanlagen Bahnhöfe, Werkstätten, Betriebsgebäude, Parkflächen.	<a href="https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-drehstrom">https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-drehstrom</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
17	Niederlande	Eindhoven, Bahnhof	2017	ProRail	1.900 Module, 450 MWh/a		Die PV deckt aktuell 60 % des Energiebedarfs des Bahnhofs in Eindhoven.	<a href="https://www.railtech.com/infrastructure/2019/03/29/dutch-train-stations-will-generate-more-solar-energy/?gdpr=accept">https://www.railtech.com/infrastructure/2019/03/29/dutch-train-stations-will-generate-more-solar-energy/?gdpr=accept</a>
18	Niederlande, Bahnhof	Delft	2023	ProRail	200 MWh/a	Plan/Bau	Erster energieneutraler Bahnhof, Strecke zwischen Hague und Rotterdam, die Gleisanzahl wird verdoppelt, ein Tunnel und ein Radweg werden zusätzlich versorgt.	<a href="https://dutchreview.com/culture/innovation/prorail-build-netherlands-first-fully-solar-train-station/">https://dutchreview.com/culture/innovation/prorail-build-netherlands-first-fully-solar-train-station/</a>
19	GB	London, Denmark Hill Station	2021	Network Rail, gefördert vom Verkehrsministerium			Erster CO <sub>2</sub> -Positiver Bahnhof! Überschuss wird ins Netz gespeist. Installation von flexiblen Dünnenschichtmodulen auf Bahnsteigdach. Modernisierung mit Mehr-Komfort.	<a href="https://www.mynewsdesk.com/uk/govia-thameslink-railway/pressreleases/new-and-improved-denmark-hill-station-delivers-first-carbon-positive-upgrade-on-rail-network-3125625">https://www.mynewsdesk.com/uk/govia-thameslink-railway/pressreleases/new-and-improved-denmark-hill-station-delivers-first-carbon-positive-upgrade-on-rail-network-3125625</a>
20	GB, Brückendach	London, Blackfriars Solar Bridge	2012	Solar Century, Jacobs engineering	900 MWh/a Sanyo electric modules with AR coated glass	Betrieb	Die Brücke über die Themse wurde rekonstruiert. Energie für den Bahnhof-Eigenbedarf.	<a href="https://blackfriars-solar-bridge.london-renewable-technology.com/">Blackfriars Solar Bridge, London - Renewable Technology (renewable-technology.com)</a>
21	Finnland	PV auf dem Dach der "Pendolino hall" (Depot)		Finnish railway company, VR Group (Kooperation)	928 kWp	Betrieb	PV-Strom wird für die Wartung der Pendolino-Züge verwendet, deckt ca. 25 % des jährlichen Strombedarfs der Halle. An sonnigen Tagen wird die Produktion zusätzlich an anderer Stelle im Bahnbetriebswerk genutzt.	<a href="https://railway-international.com/news/36457-trains-are-maintained-with-the-electricity-produced-by-one-of-the-largest-solar-power-plants-in-finland">https://railway-international.com/news/36457-trains-are-maintained-with-the-electricity-produced-by-one-of-the-largest-solar-power-plants-in-finland</a>
22	China, Bahnhof	Peking, Xiong'an Station	2020	SOURCE Yingli Energy (China) Company Limited	42000 m <sup>2</sup> , 6 MWp, 5,8 GWh/a	Betrieb	Neubau der Hochgeschwindigkeitsstation (größte in Asien), Installation hocheffizienter und hochqualitativer Module, 20 % des Strombedarfs des Bahnhofs.	<a href="https://cleantech-nica.com/2020/09/28/asias-largest-railway-station-uses-yinglis-high-efficiency-solar-products/">https://cleantech-nica.com/2020/09/28/asias-largest-railway-station-uses-yinglis-high-efficiency-solar-products/</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
23	Indien, Bahnhof, Bahnsteigdächer	Chennai Central railway station, Puratchi Thalaivar Dr. M.G. Ramachandran Central	2019	South Central Railway (SCR)	1,5 MWp Anlage, aufgeständert/ flach aufdach und BIPV	Betrieb	Soll 100 % des Tagesbedarfs liefern! Die Bahngesellschaft verfolgt das Konzept des „Energieneutralen Bahnhofs“.	<a href="https://currentaffairs.adda247.com/mgr-railway-station-gets-powered-by-solar-energy/">https://currentaffairs.adda247.com/mgr-railway-station-gets-powered-by-solar-energy/</a>
24	Indien	Assam, Bahnhof Guwahati	2018	Indian Railways	0,7 MWp		Der Bahnhof ist eine wichtige Bahnverbindung im Nordosten Indiens und befördert täglich rund 20.000 Fahrgäste, Deckung des Eigenbedars des Bahnhofs und Busbahnhofs.	
25	Indien, Bahnhof	<b>963</b> Bahnhöfe in Indien mit PV-Installation, Z.B. Varanasi, New Delhi, Old Delhi, Jaipur, Secunderabad, Kolkata, Hyderabad and Howrah	2020	Indian Railways u.a.	unbekannt	Betrieb + Bau + Planung	Weitere <b>550</b> PV-Anlagen sind seit 2020 im Bau mit insgesamt 198 MWp, Die Indische Bahn will bis 2030 netto CO <sub>2</sub> -Neutralität erreichen, bereits 2023 soll das Schienennetz komplett elektrifiziert sein (Klimaneutralität bis 2030).	<a href="https://economic-times.india-times.com/industry/transportation/railways/963-railway-stations-solarised-550-more-to-get-rooftop-solar-panels-soon-indian-railways/article-show/77853689.cms?from=mdr">https://economic-times.india-times.com/industry/transportation/railways/963-railway-stations-solarised-550-more-to-get-rooftop-solar-panels-soon-indian-railways/article-show/77853689.cms?from=mdr</a>
Anwendungsklasse 5: Installation neben dem Schienenweg								
26	Freifläche neben Bahnstrecke	Deutschland, Gaarz (bei Plau am See)	2021	DB/Enerparc AG	90 MWp, 91 ha	Betrieb	Liefervertrag mit Enerparc für 30 Jahre (PPA), Alle Züge der Bahn könnten 2,5 Tage fahren (DB Energie).	<a href="https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/bahn-plau-am-see-photovoltaikpark-in-betrieb-genommen-strom-fuer-die-bahn-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-210531-99-807032">https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/bahn-plau-am-see-photovoltaikpark-in-betrieb-genommen-strom-fuer-die-bahn-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-210531-99-807032</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
27	Frankreich, Stromabnahmeverträge (PPA)	Südliche Departments Gard und Var	Inbetriebnahme 2022-2023	Voltalia, Abnehmer: SNCF Mobilités	143 MWp, 200 GWh (Initial)	Im Bau	Voltalia wird drei Solaranlagen bauen und betreiben, PPA 25 Jahre, Deckung von 3 – 4 % des SNCF's Zugbetrieb Bedarfs, geplant ist die 6 – 7-fache Leistung an PVPP.	<a href="https://www.pv-tech.org/solar-powered-trains-propel-frances-dormant-ppa-scene/">https://www.pv-tech.org/solar-powered-trains-propel-frances-dormant-ppa-scene/</a>
28	Freifläche an Rangierbahnhof	Japan, Keiyo Rolling Stock Center (Chiba City, Präfektur Chiba)	2013		6.600 m <sup>2</sup> , 1.050 MWp 1.0 GWh/a	Betrieb	Eigenverbrauch im Keiyo Rolling Stock Center sowie über Verteilung für Bahnbetrieb, JR East erprobt Technologie zur Steuerung der Einspeisung ins Stromnetz (Netzschutz), um durch Bündelung mehrerer Stationen effektivere Nutzung der PV zu ermöglichen.	<a href="https://www.japansfs.org/en/news/archives/news_id032818.html">https://www.japansfs.org/en/news/archives/news_id032818.html</a>
29	Freifläche	Indien, Entwicklung und Bau von PVPP auf verfügbaren Flächen neben der Bahn bis 2030"	2020 – 2030	Indian Railways	3 GWp, Plan bis 2030 20 GWp auf ca. 51.000 ha	Planung / Im Bau	Eisenbahnministerium und das Joint-Venture-Unternehmen Railway Energy Management Company der indischen Eisenbahnen holten Angebote für Solarprojekte mit einer Leistung von drei GW auf unbebauten Grundstücken sowie auf Abschnitten entlang von Bahngleisen ein.	<a href="https://www.pv-tech.org/indian-railways-to-develop-20gw-of-solar-on-vacant-land-by-2030/">https://www.pv-tech.org/indian-railways-to-develop-20gw-of-solar-on-vacant-land-by-2030/</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
30	Freifläche	Argentinien, Strecke mit PV-Energie sowohl statioäre PV als auch auf dem Wagedach. Volcán und Humahuaca	2019 -	Latein-amerikanische Entwicklungsbank (CAF), Internationale Ausschreibung für 3 Abschnitte	1. Phase 80 km 2. Phase 157 km Humahuaca u. La Quiaca 3. Phase Süden bis San Salvador de Jujuy	Unklar	Idee: Die Züge werden mit PV-Modulen auf den Dächern ausgestattet und außerdem von Batterien gespeist, die in einem neu errichteten 6-MW-Solarpark und an Bahnhöfen im Abstand von je 10 km aufgeladen werden (75 Mio. USD).	<a href="https://www.globalconstructionreview.com/argentina-launch-latin-americas-first-solar-train/">https://www.globalconstructionreview.com/argentina-launch-latin-americas-first-solar-train/</a>
Anwendungsklasse 6: Sonstige Installationsorte								
31	PV-System auf Einhausung	Belgien, Antwerpen Hochgeschwindigkeitsstrecke	2011	Infrabel (belg. Bahn), Enfinity, Solar Power Systems, Brasschaat, Schoten	16.000 Module, 3.300 M Wh/a	Betrieb	„Solartunnel“, Energie dient Infrastruktur aber auch Bahnbetrieb.	<a href="https://www.uic.org/com/eneews/nr/242/article/first-green-train-in-belgium">https://www.uic.org/com/eneews/nr/242/article/first-green-train-in-belgium</a>
32	PV an Brücke	Deutschland, Bonn Brücke mit PV-Brüstung	2011	Solarworld AG	400 m, 90 kWp speist in das öffentliche Netz ein	Betrieb	Kennedybrücke, Südseite, Brüstung speist in das öffentliche Netz ein.	<a href="http://www.solarprinz.de/solarworld-ag-asbeck-setzt-bonner-solarbrücke-durch/675">http://www.solarprinz.de/solarworld-ag-asbeck-setzt-bonner-solarbrücke-durch/675</a>
33	PV auf Zugdach	Indien, „Solartrain“	2017	Schienennetz, z.B. Dehli, Jamapur, Bihar, Lucknow Sitapur-Delhi-Rewari railway section	15 % der Energie des Zugbetriebs	Betrieb	Großteil der elektrisch betriebenen Züge sind mit Solar auf dem Dach ausgestattet, Energiebedarf Beleuchtung, Anzeigen und Belüftung an Bord, 120-Ah-Batterie + MPPT-Solarladeregler kann Energie gespeichert werden, die auch nachts genutzt werden kann.	<a href="https://www.multirail.com/news/photo-voltaic-and-rail-transport-where-we-stand/">https://www.multirail.com/news/photo-voltaic-and-rail-transport-where-we-stand/</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
34	PV auf Zugdach, Australien	South Wales, Byron Bay Train,	2017	Byron Bay Railroad Company (gemeinnütziger Personenverkehr)	6,6 kW, 18 km/h, 3 km Strecke	Betrieb	Touristenattraktion zwischen Bahnhöfen North Beach und Byron Beach, 100 % mit PV-betriebener Zugverkehr. PV-Energie vom Bahnhofsdeck speist in Speicher des Zuges, ebenso wird Bremsenergie rückgespeichert.	<a href="https://byronbay-train.com.au/">https://byronbay-train.com.au/</a>
35	PV auf Zugdach, Ungarn	Budapest, Strecvke Királyrét - Kismaros	2013	hungarotrain	25 km/h 12 km-Strecke, 9,9 m <sup>2</sup> PV-Fläche	Betrieb	Touristenzug „Vili“ wird vollständig durch auf den Wagons montierte PV-Module mit Strom versorgt. Notfallversorgung von außen ebenfalls möglich.	<a href="https://www.multirail.com/news/photovoltaic-and-rail-transport-where-we-stand/">https://www.multirail.com/news/photovoltaic-and-rail-transport-where-we-stand/</a>
36	PV für Batteriespeisung	Tübingen, Schnellladestation	2021	Stadtwerke TÜ, Furrer und Frey AG	Ladezeit 20 min für 120 km	Probebetrieb	Batteriezug „Flirtakku“ und Ladestation „Voltap“ Hersteller Bahn: Stadler Rail (CH) Furrer+Frey: Das Berner Unternehmen baut Fahrleitungsanlagen und Ladesysteme für Elektrobusse. <u>Der erste Ladetest unter Realbedingung bestätigte das reibungsfreie Zusammenspiel zwischen Batteriezug, Schnellladestation und Umgebungsstromnetz.</u>	<a href="https://www.energie-und-management.de/nachrichten/strom/detail/erstes-schienendrendezvous-fuer-schnellladestation-145764">https://www.energie-und-management.de/nachrichten/strom/detail/erstes-schienendrendezvous-fuer-schnellladestation-145764</a>

Nummer	Anwendung	Wo	Wann	Investor / Planer, EPC	Daten	Status	Besonderheiten	Quelle
37	Solarzaun, Einzäunung und Agri-PV	A3-Solarge-sellschaft (Elektrizitätswerk Goldbach-Hösbach und Rallos Vertriebs-GmbH), Voigt & Schweitzer (Verzinkung)	2020	Next2Sun, Modulhersteller: EvergreenSolar (16.000 Stück), SMA WR, 500 / 350 / 250 kW	2.649 kWp. 3 Teilanlagen mit je 1 Wechselrichterstation, Monitoring, 20-kV, 950 kWh/kWp/a. 10 Mio €	Betrieb	Verschiedenartige Konstruktionen sind denkbar, Agri-PV, Einzäunungen zur Gefahrenabwehr, z.B. Betreten, Wild, Steinschlag... Einspeisung: Netzeinspeisung auf 20-kV-Schiene der Elektrizitätswerke Goldbach-Hösbach.	<a href="https://www.pv-magazine.de/2020/07/03/next2sun-realisiert-vertikale-photovoltaik-anlage-mit-bifazialen-jollywood-modulen/">https://www.pv-magazine.de/2020/07/03/next2sun-realisiert-vertikale-photovoltaik-anlage-mit-bifazialen-jollywood-modulen/</a>

## 6.6 Studien

Die Recherchen ergaben vielfältige Arbeiten zu den Möglichkeiten der Nutzung von Erneuerbaren Energien, insbesondere mit dem Schwerpunkt PV im Bahnbetrieb. Mögliche Szenarien auf dem Weg zur Klimaneutralität werden beschrieben. In allen Studien wird eine grundsätzlich positive Aussage für den massiven Ausbau von PV in der Schieneninfrastruktur getroffen.

Die Studien werden nachfolgend unterteilt in die Themengebiete

1. Verbrauchs-, Bedarfs- und Potenzialanalysen
2. Machbarkeitsstudien hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Faktoren
3. Anwendungsklassenbezogene Studien zu Regularien und Design
4. Studien zu Anforderungen bei Direkteinspeisung
5. Klimaneutralität für nichtelektrifizierte Bahnstrecken im DB-Netz

### 6.6.1 Verbrauchs-, Bedarfs- und Potenzialanalysen

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
1	2016-2019	<b>Einsatzpotenziale erneuerbarer Energien für Verkehr und Infrastruktur verstärkt erschließen (Ergebnisbericht) [9]</b>	BMVI-Expertennetzwerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identifizierung von Hauptverbrauchern und Einsparpotenzialen</li> <li>- Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten für reg. EE-Anlagen an oder in der Verkehrsinfrastruktur für die Verkehrsträger Straße, Schiene, Waser</li> <li>- Vorstellung von Pilotprojekten</li> <li>- Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten des erzeugten Stroms durch Verbraucher an der Infrastruktur</li> </ul>
	Fazit/ Nutzen	1. Energieverbrauchsanalyse, z. B. Traktionsenergie, Bahnhöfe, u. ä.		

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
		2. Methodik/Datennutzung für Potenzialberechnung: Im Rahmen des Pilotprojekts wurde ein Gebiet um Elbe-Seitenkanal und Mittellandkanal untersucht. In diesem Bereich wurden standortbezogene Daten zur Installation von PV auf Betriebsgebäuden erhoben, sowie im angenäherten Areal von 7,5° – 11° E und 52°-53° N auch für LSW an Straßen- und Schienenwegen. Diese Daten wurden für mehrere Szenarien berechnet.		
2	2021	<b>Kurzstudie über die Potenziale von Solarenergie für das Klima und die Wirtschaft in Deutschland [21]</b>	Fraunhofer ISE im Auftrag von Greenpeace Energy	Analyse des Energiebedarfs, der Preisentwicklung und der Flächenverfügbarkeit. Ein Schwerpunkt ist dabei die integrierte PV: Äcker, Gebäude, Parkplätze, Lärmschutzwände, Fahrzeuge, etc.
		Fazit/ Nutzen		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Die Integration von PV in Verkehrswege (Road Integrated Photovoltaics, RIPV) könne als LSW, als Fahrwegüberdachung oder als begeh- und befahrbarer Straßenbelag erfolgen.</li> <li>2. Aus den technologisch sinnvoll nutzbaren Flächen (z. B. Lärmschutzwände, Radwege, Seitenstreifen) ergibt sich ein Potenzial von ca. 72 GW, das auf bereits bebauter Fläche erreicht werden kann.</li> <li>3. Allein an LSW entlang von Bahnstrecken und Autobahnen sieht das Autorinnen und -autorenteam ein Potenzial von 2,8 GW.</li> <li>4. Auch die Integration in Fahrzeuge (Vehicle Integrated Photovoltaics, VIPV) sieht die Studie als Option. Dabei gebe es ein technisches Potenzial von 44 GW für PKW und 11 GW für LKW.</li> </ol>
3	2021	China, <b>"Using existing infrastructures of high-speed railways for photovoltaic electricity generation"</b>	University of Shanghai for Science and Technology und weitere Universitäten, Shanghai Climate Center, u. a.	Potenzialstudie zur Nutzung der bestehenden Infrastrukturen von Bahnhöfen und verfügbaren Flächen entlang der Bahnstrecken für die Stromerzeugung durch (PV) für Traktionsenergie (Hochgeschwindigkeitszüge) und Belieferung umliegender Verbraucher mit überschüssiger Elektroenergie.
		Fazit/ Nutzen		<p>Beschreibung einer auf einem geografischen Informationssystem basierenden Methodik, um das PV-Potenzial entlang der Bahn- Strecken und auf den Dächern von Bahnhöfen zu bewerten.</p> <p>Als Fallstudie wurde die Hochgeschwindigkeitsstrecke Peking-Shanghai (HSR), Energieversorgung mit 25 kV bei Landesfrequenz, herangezogen. Ihr gesamtes PV-Potenzial erreicht 5,65 GW (davon entfielen 264 MW auf das Bahnhofspotenzial, etwa 4,68 % des Gesamtpotenzials).</p> <p>Trotz differenzierter Strompreise und Solarressourcen entlang der Bahnlinie waren alle PV-Systeme rentabel.</p> <p>Darüber hinaus zeigt ein Vergleich zwischen Stromverbrauch und -erzeugung, dass das PV+HSR-System den Großteil des Strombedarfs der Beijing-Shanghai HSR ohne ein Speichersystem decken kann. Dieses Konzept lässt sich auch auf andere Bahnstrecken und Bahnhöfe erweitern.</p>
4	2020	<b>The Potential of Photovoltaics to Power the Railway System in China</b>	China Institute of Energy and Transporta-	Bewertung der Durchführbarkeit der Integration von Bahnsystemen und photovoltaischer Stromerzeugung in China, Analyse der geografischen Bedingungen und des Bahnlayouts Chinas.

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
			tion Integrated Development, North China Electric Power University, Beijing, u. a.	Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Maßnahmen zur Energietransformation, die für die nationalen Bedingungen geeignet sind, Vorschlag für ein Vorgehen zur Energietransformation von Bahnsystemen.
			Fazit/ Nutzen	<p>Es wurde eine Methode zur Potenzialermittlung von PV-Strom zur Direkteinspeisung vorgestellt.</p> <p>Der wirtschaftliche Effekt wird für drei Intensitätsszenarien dargestellt. China wurde in vier verschiedene Zonen eingeteilt, die sowohl geographische- als auch Bedarfsgrößen berücksichtigen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Potenzial für Erneuerbare Energien und das Planungspotenzial von Chinas Bahnanlagen groß sind und die Energieprobleme des chinesischen Bahnsystems wirksam reduziert werden können.</p>
5	2020	<p><b>The Potential of Noise Barrier Technology in Europe</b></p> <p>16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1 – 5 May 2000, Glasgow, United Kingdom</p>	TNC AG, CH, Fraunhofer ISE (DE), Utrecht University (NL), NPAC (UK), PHEBUS (FR), ENEA (IT)	<p>Nutzbare Potenzial für PV auf LSW entlang von Autobahnen und Schienenstrecken, um den Anteil der EE am Strommarkt der EU zu erhöhen. Im Gegensatz zu vielen zuvor veröffentlichten PV-Potenzialstudien konzentriert sich dieser Vorschlag auf PVNB (PV-LSW) als eine der kostengünstigsten Möglichkeiten zur Realisierung von netzgekoppelten PV-Anlagen in großem Maßstab.</p>
		Fazit/ Nutzen	<p>Das Ergebnis dieser Studie bestätigt die aktuellen Aktivitäten zur PV auf LSW als einen wichtigen Anteil am PV-Markt.</p> <p>Die Partner gehen davon aus, dass gute Chancen zur großflächigen Realisierung in Deutschland, den Niederlanden und der Schweiz bestehen. In Frankreich, dem Vereinigten Königreich und Italien ist die Realisierung von größeren PVNB eher unwahrscheinlich.</p> <p>Die Studie bezieht in die Rentabilitätsbetrachtungen jedoch die Förderung der Einspeisung in das öffentliche Netz ein. Man erwartet verstärkte Maßnahmen zur Installation weiterer LSW.</p>	
6	2017	USA, <b>Highway Renewable Energy: Photovoltaic Noise Barriers</b> (FHWA-HEP-17-088) [22]	U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration, BA für Straßenwesen, DE, CH, Innovia Technology UK, Massachusetts Department of Transportation, u. a.	Verkehrsministerien der USA verfolgen mit Partnern die PVNB (PV-LSW) -Pilotprojekte an Autobahnen. Angesichts der beträchtlichen Ausdehnung der Lärmschutzwände in den USA (fast 3.000 Meilen), erwarten grobe Schätzungen im Rahmen dieser Studie ein Potenzial für die Erzeugung von Solarenergie auf amerikanischen LSW bei mindestens 400 Gigawattstunden (GWh) jährlich.

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
	Fazit/ Nutzen	Zusammenstellung etlicher Beispiele für international realisierte Projekte von PV-LSW inklusive "Lessons Learned".  Bifaziale Solarzellen, werden zunehmend häufiger in Europa verwendet. Diese Paneele haben den Vorteil, dass sie in jeder Ausrichtung verwendet werden können. Weitere potenzielle Technologien sind flexible Dünnschichtmodule und konzentrierende PV-Module.		

## 6.6.2 Machbarkeitsstudien hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Faktoren

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
1	2021	<b>Aktuelle Fakten zur PV in Deutschland [23]</b>	Fraunhofer ISE	Zusammenstellung aktueller Fakten, Zahlen und Erkenntnisse soll eine gesamtheitliche Bewertung des PV-Ausbaus in Deutschland unterstützen.
		Fazit/ Nutzen		Markt und PV-Technologiedaten im Überblick: Klimaneutralität – Zuwachszahlen – PV-Beitrag – LCOE u. v. m. aktuell und auf hohem fachlichem Niveau
2	2021	China, <b>Application of photovoltaic power generation in rail transit power supply system under the background of energy low carbon transformation [24]</b>	Department of Economy and Management, North China Electric Power University, Baoding 071002, China,	Betrachtet wird die Direkteinspeisung des PV-Stroms in das Bahnstromversorgungssystem. Zufälligkeit und Ungewissheit der photovoltaischen Stromerzeugung haben jedoch gewisse Auswirkungen auf das Stromversorgungssystem des Schienenverkehrs: Auswirkungen auf die Stromqualität und die Stabilität des Netzes.
		Fazit/ Nutzen		Die Verbesserung der Genauigkeit der <u>Vorhersage der photovoltaischen Stromerzeugung</u> ist der Schlüssel zur Gewährleistung eines stabilen Betriebs des Stromnetzes.
3	2020	Japan, <b>Application of Smart Grid Technology to Railway Power Supply [25]</b>	Japan Railways (JR) East	Seit 2012 bemüht sich JR East um die Verbesserung der Energieeffizienz zur Energieeinsparung und die Nutzung der Erneuerbaren Energien zur CO2-Reduktion. Die Verbesserung der Nutzung von regenerativer Energie, die effektive Nutzung der Solarenergie und die Reduzierung des Stromverbrauchs <u>von Bahnhöfen und Gebäuden</u> wird untersucht.
		Fazit/ Nutzen		Die effektive Nutzungsmöglichkeit der Solarenergie für den Bahnverkehr der JR East wurde unter Verwendung der Smart-Grid-Technologie untersucht. Erzeugung und Verbrauch können so besser aufeinander abgestimmt werden.
4	2019	Indien,	Cawas Phi-roze Nazir, Consulting Engineer,	Netzgekoppelte PV-Anlage mit Batteriespeicher wurde untersucht. Das Konzept basiert auf Installation von PV-Modulen entlang des Hochgeschwindigkeits-Schienennetzes, <u>Nutzung der schotterlosen</u>

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
		<b>Solar Energy for Traction of High Speed Rail Transportation: A techno-economic Analysis [157]</b>	Kalkutta, Indien	<u>Gleise als Installationsort</u> . Schotterlose Gleise erfordern wenig Wartung, und der Raum entlang der Gleise bietet eine große Fläche, auf der PV-Module angebracht werden können.
		Fazit/ Nutzen		Die Arbeit befasst sich mit dem Potenzial und der Kosteneffizienz eines netzgekoppelten Solaranlagenwerks mit Batteriespeicher zur Deckung des Spitzenbedarfs an Strom im High-Speed-Korridor Mumbai-Ahmedabad. Die Ergebnisse zeigen die Effektivität des neuen Konzepts in Bezug auf die Investitions- und Betriebs- und Instandhaltungskosten. Vorliegendes Einspeisesystem: Einphasiger Wechselstrom, 50 Hz, 2 x 25 kV, PV: 191 MWp, Batteriespeichersystem mit 268 MWh, max. 12 h, Unterwerke alle 50 – 60 km.
5	2017	Schweiz, <b>Machbarkeitsstudie (veröffentlichte Information in PV-Magazine [26])</b>	Die Schweizerische Südostbahn AG (SOB), Schweizer CMT AG	Energiebedarf und Betriebskosten der Bahn senken, Ermittlung wirtschaftlich geeigneter PV-Anwendungsklassen.
		Fazit/ Nutzen		Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass sich PV-Anlagen auf den Dächern von Bahnhöfen, Haltestellen und Schallschutzwänden entlang der Bahnstrecken "gut eignen". Ursprünglich lag der Schwerpunkt auf <u>PV auf den Dächern der Züge</u> selbst. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass die Netto-Energieerzeugung der Module hinter den Erwartungen zurückblieb, Verschmutzung und die räumliche Enge wirken sich negativ aus. Daher wurden sie als <u>nicht wirtschaftlich</u> eingestuft.
6	2019	Niederlande <b>Delft Zuid and ProRail to Build Netherlands First Fully Solar Powered Train Station</b>	The municipality of Delft in cooperation with the Ministry of Infrastructure and Water Management	Umbau/Transformation In den „Delfter Campus“ wird das Reisen erleichtern. Den Haag – Rotterdam ist die verkehrsreichste Strecke, nach der Modernisierung von Delft sollen stündlich acht weitere Züge zur Verfügung stehen.
		Fazit/ Nutzen		Wirtschaftlichkeitsanalysen für die Neuplanung von Bahnhöfen, klimaneutraler Bahnhof Innovatives BIPV Studie/Projekt.

### 6.6.3 Anwendungsklassenbezogene Studien zu Regularien und Design

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
1	2020-2023	<b>PVwins – Entwicklung von wandintegrierten PV-Elementen für den Lärmschutz [27]</b>	ISE + R. Kohlhauer GmbH; Megason Energies AG; Energiegenossenschaft Inn-Salzach eG; Bundesanstalt für Straßenwesen; DZSF	Auftraggeber: Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) - Entwicklung spezieller PV-Module für die Integration in Lärmschutzwände an Kraftfahrstraßen und Bahngleisen. - Schallabsorbierende /schalldämmende Modulkonzepte für Nachrüstung, Aufstocken und Neubau von LSW. - Die Beteiligten identifizieren mögliche Hürden für die Implementierung von PV-Lärmschutzprojekten und zeigen Wege für die erfolgreiche Projektentwicklung auf.

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele	
	Fazit/ Nutzen	<p><b>Systematische Entwicklung geeigneter Module/Wandelemente ist auf dem Weg!</b></p> <p>Inkludiert sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung der regulatorischen Anforderungen für LSW an Straße und Schiene</li> <li>- Vorqualifizierung plausibler Materialklassen und Moduldesigns für mehrere Anwendungsfälle</li> <li>- Identifizierung geeigneter Herstellprozesse für die PV-Module, vorgefertigte PV-Lärmschutzelemente und Nachrüst-Lösungen</li> <li>- Referenzen je Moduldesign werden montiert und ein Monitoring durchgeführt</li> <li>- Produktkosten werden analysiert</li> </ul>			
2	2015	<b>Photovoltaics noise barrier: acoustic and energetic study,</b> ATI 2015 - 70th Conference of the ATI Engineering Association [28]	Universität Rom, DIAEE (Abteilung für Raumfahrt-, Elektro- und Energietechnik)	Kombination von PV und vorhandener Infrastruktur, zur Vermeidung von zusätzlichen Flächenverbrauch. Für die „photovoltaische LSW“ (PVNB), bei der eine LSW entlang einer Autobahn oder Eisenbahnlinie als Unterkonstruktion für PV-Module verwendet wird, wird die beste Form der Barriere untersucht, um die akustischen und energetischen Eigenschaften zu optimieren.	
	Fazit/ Nutzen	Es wurden verschiedene Konstruktionsarten von LSW hinsichtlich der akustischen und der energetischen Eigenschaften untersucht. Die Untersuchungen wurden auf 8 verschiedene Straßenausrichtungen angewendet. Die Ertragssimulation und Lärmanalyse wurde für den Standort Rom mit dem Simulationstool PVGIS durchgeführt.			
3	2020	Italien: <b>Studie zur Entwicklung von smarten Bahnschwellen, EU-Projekt, Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020</b> [29]	Greenrail SRL (KMU Italien), Riding Sunbeams, Ricardo, Thrive Renewables, Cuckmere Community Solar, Network Rail	Greenrail Solar™ ist eine Greenrail-Schwelle, in die ein PV-Modul integriert ist, sodass die Bahnstrecke in ein PV-Kraftwerk mit hoher Produktivität an nachhaltiger Energie verwandelt wird.	
	Fazit/ Nutzen	<p>Derzeit ist Greenrail an drei Forschungsprojekten zur Implementierung schwellenintegrierter Systeme beteiligt, mit dem Ziel, neben der Greenrail™-Schwelle auch Greenrail Solar™, Greenrail LinkBox™ und Greenrail Piezo™-Schwellen auf den Markt zu bringen.</p> <p>Das Finanzierungsprogramm des KMU-Instruments Horizon 2020 Phase 2 der Europäischen Union kofinanziert das Greenrail-Projekt auch für die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten dieser drei SMART-Produkte.</p> <p>Intelligente Bahnschwellen – Solar, LinkBox und Piezo, wurden im Netz von Ferrovie Emilia-Romagna verbaut und haben sich in verschiedenen Praxistests bewährt, Geräusch- und Vibrationsniveaus konnten reduziert und Sonnenenergie erzeugt werden. Die vorhersagende Instandhaltung und Echtzeitdiagnosedaten der Bahnschwellen waren ebenfalls ein großer Erfolg. Aktuell unklar, ob dieses Produkt in absehbarer Zeit anwendungsreif für Praxisprojekte jenseits von Mini-Teststrecken sein könnte.</p>			

#### 6.6.4 Studie zur Direkteinspeisung

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
1	2014	<b>Design Aspects for High Voltage MW PV Systems for Railway Power Supply [30]</b> 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	GE Global Research/ Renewable Energy & Power Systems Lab, Garching, Deutschland	Ziel dieser Publikation ist es, die technischen Herausforderungen und gestalterischen Aspekte für den elektrischen Anschluss von PV-Anlagen an das Schienennetz aufzuzeigen. Faktoren wie elektrischer Energieertrag, einphasiger Anschluss, Netzstabilität, Spannung, Lastschwankungen, mechanische Schwingungen durch vorbeifahrende Hochgeschwindigkeitszüge (Druckschallwelle), Installation, Sicherheitsaspekte und vor allem Kosten müssen berücksichtigt werden.
	Fazit/ Nutzen	Die Studie bestätigte die Eignung von PV-Anwendungen zur Direkteinspeisung in das Bahnnetz insbesondere in Verbindung mit Speichereinheiten. Die Studie beschreibt mögliche technische Lösungen für Wechselrichtereinheiten dezentral/zentral geeignet zur Direkteinspeisung in das 15 kV/16,7 Hz Netz und deren Herausforderungen. Unter wirtschaftlichen Aspekten wurde eine bessere Eignung von Standard PV-Anwendungen – Freifeld PV neben der Schiene – im Vergleich zu LSW/Wällen festgestellt: Hemmnisse: massive Verschmutzung bei Regenwetter (nach sieben Monaten), dynamische Verschattungen, schwierige Wartungsarbeiten, etc.		

#### 6.6.5 Klimaneutralität für nichtelektrifizierte Bahnstrecken im DB-Netz

Nr.	Wann	Titel	Wer	Ziele
1	2021	<b>Klimaneutrale Mobilität: Alternative Antriebskonzepte für die Schiene</b> , Wirtschaftkeitsstudien entsprechend des Streckennetzes der DB	VDE	Der Schienenverkehr soll bis 2050 klimaneutral werden. Allerdings sind 40 % des deutschen Schienennetzes noch nicht elektrifiziert. Etwa 1/3 der gefahrenen Zugkilometer wird heute von Diesel getriebenen Fahrzeugen erbracht.
	Fazit/ Nutzen	Technische, systemische und wirtschaftliche Aspekte emissionsfreier Antriebe im Bahnbereich. Mit konkreten Fallbeispielen, klar definierten Entscheidungskriterien und individueller Beratung.		

## 7 Anforderungen an PV-Systeme in der Schieneninfrastruktur

In diesem und den Folgeabschnitten werden im Wesentlichen die technischen Anforderungen an PV-Systeme betrachtet. Dies sind die Anforderungen, die zur sicheren Funktionsweise des PV-Systems dienen und sie werden von den im Abschnitt 2 beschriebenen baulichen Voraussetzungen unterschieden. Nicht betrachtet werden Anforderungen an die Bahnstromrückführung von PV-Systemen, da diese nur mittelbar mit dem PV-Potenzial zu sehen sind. Bei den technischen Anforderungen für in der Schieneninfrastruktur genutzte PV-Systeme werden in diesem Bericht drei grundlegende Kategorien unterschieden:

1. Die PV-Systeme müssen den allgemeinen Umweltbedingungen genügen;
2. Die PV-Systeme müssen den besonderen bahnspezifischen Belastungen genügen;
3. Die PV-Systeme sind so auszulegen, zu implementieren und zu betreiben, dass von ihnen keine Gefahren ausgehen, die entweder unmittelbar oder mittelbar bzw. indirekt in einem Unfall resultieren, dem ein nicht tolerierbares Risiko zugeordnet werden kann.

Unter die allgemeinen Umweltbedingungen fallen beispielsweise Einflüsse durch Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Regen, Schnee, Hagel, Eis, Sonneneinstrahlung etc. Bahnspezifischen Belastungen bzw. Umweltbedingungen sind z. B. Verschmutzung, Schwingungen, Stöße, elektromagnetische Einstrahlung etc.

Ein Beispiel für die zweite Kategorie ist Sog. Auswirkungen von Sog sind u. a. abhängig von den örtlichen Begebenheiten und den Fahrzeugarten und deren Geschwindigkeiten.

Eine durch ein PV-System ausgelöste Gefahr, die mittelbar bzw. indirekt einen Unfall verursachen kann, ist z. B. eine Blendung von Verkehrsteilnehmern infolge von durch das PV-System oder PV-Modulen reflektierten Sonnenstrahlen.

TABELLE 6: ANFORDERUNGEN AN PV-SYSTEME, ÜBERSICHT

Beschreibung	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Referenz
<b>Statik</b>			x	7.1
<b>Temperatur</b>	x			7.2
<b>Wind</b>	x			7.3
<b>Seitenwind</b>		x		7.4
<b>Sog/Druck</b>		x		7.5
<b>Regen</b>	x			7.6
<b>Schnee</b>	x			7.7
<b>Hagel</b>	x			7.8
<b>Schotterflug</b>		x		7.9
<b>Sand</b>	x			7.10

Beschreibung	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Referenz
<b>Sonneneinstrahlung</b>	x			7.11
<b>Blitzschlag</b>	x			7.12
<b>Verschmutzung</b>		x		7.13
<b>Schwingung</b>		x		7.14
<b>Vibration</b>		x		7.14
<b>Stöße</b>		x		7.15
<b>EMV - Störfestigkeit</b>		x		7.16.1
<b>EMV - Störaussendung</b>			x	7.16.2

Die Europäische Norm DIN EN 50125-2:2002 [31] beschreibt Einflüsse der Umgebung auf ortsfeste elektrische Anlagen der Bahnstromversorgung und Betriebsmittel, die für einen Bahnbetrieb notwendig sind:

- im Freien;
- in überdachten Flächen;
- in Tunneln;
- innerhalb von Gehäusen auf diesen Flächen.

Bei den nachfolgenden Abschnitten wird der Fokus auf Freigelände gelegt, da davon ausgegangen werden kann, dass PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur mehrheitlich im Freien platziert werden.

Bei den in der Norm festgelegten Grenzwerten besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass sie überschritten werden. Schwere Bedingungen können zwischen den Vertragspartnern bei Bedarf (z. B. besondere Mikroklima) festgelegt und vereinbart werden. Bei den Grenzwerten handelt es sich um Minimal- und Maximalwerte und die Häufigkeit des Auftretens innerhalb eines bestimmten Zeitraumes kann in Abhängigkeit von der jeweiligen Gegebenheit unterschiedlich sein. Solche Häufigkeiten des Auftretens wurden nicht in DIN EN 50125-2:2002 [31] einbezogen, sollten aber, falls zutreffend, für jede Umwelt-einflussgröße in Betracht gezogen werden und müssen in einem solchen Fall festgelegt werden. Es soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass DIN EN 50125-2:2002 [31] keine Prüfanforderungen an die Betriebsmittel bzw. Anlagen beinhaltet.

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten weiterführende Informationen zu den technischen Anforderungen an PV-Systeme in der Schieneninfrastruktur.

## 7.1 Statik

Gemäß § 4 Abs. 3 AEG i. V. m. § 2 Abs. 1 EBO sind bauliche Anlagen sowie andere Anlagen und Einrichtungen so zu bauen, zu ändern, instand zu halten und zu nutzen, dass die Einhaltung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen, die aus dem Bahnbetrieb herrühren, gewährleistet ist. Hierzu muss jede bauliche Anlage im Ganzen und in ihren einzelnen Teilen für sich allein standsicher sein. Die Standsicherheit anderer baulicher Anlagen und die Tragfähigkeit des Baugrundes der Nachbargrundstücke dürfen nicht gefährdet werden. Darüber hinaus dürfen die während der Errichtung und Nutzung möglichen Einwirkungen keine Beschädigungen anderer Teile des

Bauwerks oder Einrichtungen und Ausstattungen infolge zu großer Verformungen der tragenden Baukonstruktion zur Folge haben.

Die vom EBA veröffentlichten Eisenbahnspesifischen Technischen Baubestimmungen (EiTB) beinhalten in ihrem Abschnitt A 1.2 eine Liste der technischen Regeln, die zur Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Planung, Bemessung und Ausführung baulicher Anlagen maßgeblich sind.

## 7.2 Temperatur

Umgebungstemperaturen können technische Systeme beeinflussen und müssen daher bei der Entwicklung dieser Systeme berücksichtigt werden. So hat gerade die Temperatur einen maßgeblichen Einfluss auf die Ausfallrate von elektronischen Bauteilen und somit indirekt auf die Zuverlässigkeit der Systeme. Die Häufigkeit von Ausfällen elektronischer Bauteile steigt mit höherer Temperatur überproportional stark an. Insofern ist die Auswahl von geeigneten Bauteilen und ein gutes Systemdesign nur unter Berücksichtigung der einwirkenden Temperaturen möglich.

In DIN EN 50125-2:2002 wird bezüglich der Lufttemperatur und -feuchtigkeit zwischen Betriebsmitteln im Freien und auf wettergeschützten Flächen unterschieden. Die Norm selbst legt keine Grenzwerte für die Temperatur fest, sondern verweist für wettergeschützte Flächen auf DIN EN 60721-3-3 und für Freiluft auf die Tabelle 2 von HD 478.2.1<sup>1</sup>, wobei das erste und die beiden letzten Klimate ausgeschlossen sind. Abhängig von nationalen Anforderungen sind abweichende Werte möglich. Diese Werte müssen entsprechend den örtlichen Bedingungen separat zwischen Käufer und Lieferant vereinbart werden.

Bezüglich der Temperatur werden in DIN EN 60721-3-3 geeignete Klassen festgelegt, die insbesondere von der Lufttemperatur, der Sonnenstrahlung, sowie von der Bauweise des Gebäudes abhängen. So gilt beispielsweise die Klasse 3K20 für vollständig klimatisierte, geschlossene Einsatzorte, bei denen anhand der Regelung von Lufttemperatur und Luftfeuchte die erforderlichen Bedingungen ständig aufrechterhalten werden können. Die Klasse 3K23 hingegen gilt für geschlossene Einsatzorte, die über keine Temperatur- oder Luftfeuchteregelung verfügen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur die Klimatabelle 2 von HD 478.2.1 und im Falle von Installationen auf wettergeschützten Flächen die jeweilige Klasse gemäß DIN EN IEC 60721-3-3 auszuwählen und vertraglich zu vereinbaren sind.

## 7.3 Wind

Gemäß DIN EN 50125-2 ist bei der Auslegung von ortsfesten Anlagen, zu denen PV-Anlagen zur Direkt einspeisung zu zählen sind, auch die örtliche Windwirkung zu berücksichtigen. Betriebsmittel im Freien müssen so konstruiert und aufgebaut sein, dass sie der Belastung durch Luftbewegungen widerstehen können. In DIN EN 50125-2 werden die Windgeschwindigkeiten, die bei der Bewertung der Betriebsvoraussetzungen in Betracht gezogen werden müssen, in vier Klassen (W1 – niedrig, W2 – normal, W3 – schwer, W4 – außergewöhnlich) eingeteilt. Werte für Windgeschwindigkeiten für alle Länder in Europa sind in ENV 1991-2-4 enthalten, abweichende Werte sind jedoch möglich und müssen zwischen Käufer und Lieferant vereinbart werden. DIN EN 50125-2 enthält im Zusammenhang mit Wind weiterhin zwei Anmerkungen:

---

<sup>1</sup> Anmerkung: Die Europäische Norm HD 478.2.1:1990 wurde als Deutsche Norm DIN IEC 60721-2-1:1992-07 veröffentlicht.

- Der Wert der Windgeschwindigkeit für die Auslegung von Bauwerken ist gewöhnlich höher als der Wert für den Betrieb des Bahnsystems.
- Bei Windgeschwindigkeit W 3 darf das Betriebsmittel außer Betrieb sein, aber keine dauernden Schäden erleiden.

Es soll an dieser Stelle auch nochmals auf EN 50125-3 hingewiesen werden. Der für diese Norm originäre Anwendungsbereich sind ortsfeste Anlagen der Signal- und Telekommunikationstechnik in Bahn-anwendungen und zu diesen müssen PV-Anlagen nicht gerechnet werden. Nichtsdestotrotz kann die Norm freiwillig angewendet werden und stellt beispielsweise eine Gleichung zur Berechnung der durch Wind verursachten Kraft bereit.

## 7.4 Seitenwind

Im Gegensatz zu Schienenfahrzeugen stellt für ortsfeste Anlagen möglicher Seitenwind eine untergeordnete Rolle dar. Aus diesem Grunde sind Anforderungen bzgl. Seitenwind zwar sehr wohl in der Fahrzeugnorm DIN EN 50125-1, nicht jedoch in der für ortsfeste Anlagen geltenden DIN EN 50125-2 enthalten. Auch die TSI INF beinhaltet weder eine Bewertung der Einwirkungen von Seitenwind noch Anforderungen hinsichtlich des Nachweises der Sicherheit gegen Einwirkungen von Seitenwind. Ein entsprechender Nachweis muss somit auch nicht von einer benannten Stelle überprüft werden. Die TSI enthält lediglich die allgemeine Anforderung, dass der Nachweis vom Infrastrukturbetreiber, gegebenenfalls in Zusammenarbeit mit dem Eisenbahnunternehmen, zu erbringen ist.

## 7.5 Sog/Druck

Im Eisenbahnwesen sind vielfältige Aspekte der Aerodynamik von Relevanz und mit steigenden Höchstgeschwindigkeiten der Schienenfahrzeuge sind auch anspruchsvollere Anforderungen zur Vermeidung unzulässiger aerodynamischer Einwirkungen erforderlich. Insbesondere das Entstehen von Sog/Druck durch überfahrende oder vorbeifahrende Züge ist hierbei von Bedeutung, da dadurch Krafteinwirkungen auf Teile benachbarter Systeme/Anlagen ausgelöst werden können. Die Normenreihe EN 14067 bedient dieses Thema und aufgrund der unterschiedlichen aerodynamischen Auswirkungen werden in separaten Teilen der Norm zum einen Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel (DIN EN 14067-3, DIN EN 14067-5) und zum anderen auf offener Strecke (DIN EN 14067-4) betrachtet. In DIN EN 14067-4 findet sich die Anforderung, flächige Bauwerke, die parallel zum Gleis verlaufen (z. B. Lärmschutzwände), so auszulegen sind, dass sie den zugverursachten aerodynamischen Belastungen während ihrer vorausbestimmten Lebensdauer standhalten können. Es ist die genaue Berücksichtigung des dynamischen Charakters der aerodynamischen Belastung sowie des dynamischen Verhaltens des Bauwerks erforderlich und die Auslegung von flächigen Bauwerken, die sich parallel zum Gleis mit den Begrenzungslinien GA, GB, GC befinden, muss nach DIN EN 15273 zugverursachte Drucklasten wie in DIN EN 1991-2 dargestellt berücksichtigen. Des Weiteren sind dynamische Effekte zu berücksichtigen und um die Auswirkung des Umgebungswinds auf die zugverursachten Drucklasten mit einzubeziehen, sollte die Komponente der gleisparallelen Windgeschwindigkeit zur Zuggeschwindigkeit addiert werden. DIN EN 14067-4 beinhaltet weiterhin Näherungsgleichungen zur Ermittlung der charakteristischen Drücke, die mit den in DIN EN 1991-2 grafisch dargestellten Drucklasten übereinstimmen.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auch in EN 14067-4 aerodynamische Belastungen im Gleisbett nicht betrachtet werden. Es wird lediglich die Anmerkung gemacht, dass dieser Punkt u. U. durch nationale Bestimmungen geregelt ist.

## 7.6 Regen

Zum Einsatz in der Schieneninfrastruktur müssen PV-Anlagen ausreichend robust gegen Regen sein. DIN EN 50125-2 [31] gibt zum einen die in Betracht zu ziehende normale Regenmenge mit 6 mm/min an, zum anderen gilt jedoch, dass wenn es erforderlich ist, andere Werte aus HD 478.2.2 ausgewählt werden können. Zudem wird festgestellt, dass der Einfluss des Regens in Abhängigkeit von der Montage des Betriebsmittels in Verbindung mit Wind und anderen Luftbewegungen und, wenn anwendbar, mit negativen Temperaturen auf der Oberfläche, die vom Regen getroffen wird, berücksichtigt werden (Ausbildung von Eismänteln) muss.

## 7.7 Schnee und Eis

In der Bahnnorm DIN EN 50125-2 [31] sind zwar auch bzgl. Einwirkung durch Schnee und Eis Anforderungen beschrieben, diese beziehen sich in der Norm jedoch ausschließlich auf die Schnee- oder Eislast auf Leitern, den Zugang zu Gehäusetüren und die Höhe zu aktiven Teilen, sowie von exponierten bewegbaren Teilen, die unter vereisten Bedingungen mechanisch betätigt werden.

Im Falle von PV-Anlagen ist jedoch insbesondere die mögliche Beeinträchtigung ihrer Statik bei Schneelast und ihrer prinzipiellen Aufgabe von Bedeutung. Schneelasten müssen getragen werden können. Die prinzipielle Funktion der Stromerzeugung ist bei aufliegendem Schnee nicht mehr gewährleistet. Hier gilt wie im Falle von Verschmutzung, dass ausschließlich durch geeignete betriebliche Maßnahmen, in diesem Falle Schneeräumung bzw. Enteisung, Abhilfe geschaffen werden kann.

## 7.8 Hagel

Insbesondere die PV-Module sind möglichem Hagel ausgesetzt und gemäß DIN EN 50125-2 [31] muss der größte Durchmesser von Hagelkörnern mit 15 mm angenommen werden. Es ist eine entsprechende Robustheit gegen Hagel sicherzustellen.

## 7.9 Schotterflug

Das aerodynamische Zusammenwirken von Fahrzeug und Infrastruktur kann dazu führen, dass Schotter aus dem Gleisbett gelöst und herausgeschleudert wird. Schotterflug kann somit eine wesentliche Gefahr für die Beschädigung gleisnaher Systeme darstellen. Aus diesem Grunde wird dieses Thema auch in der TSI INF aufgegriffen, allerdings werden zum einen die diesbezüglichen Anforderungen der TSI nur auf Strecken mit Höchstgeschwindigkeiten von  $\geq 200$  km/h begrenzt und zum anderen sind die Anforderungen auch nicht harmonisiert, sondern stellen einen sogenannten „offenen Punkt“ dar. Bezuglich Schotterflug sind auch in DIN EN 50125-2 [31] Anforderungen für ortsfeste elektrische Anlagen beschrieben. Steine aus dem Schotterbett werden in dieser Norm der Kategorie „mechanisch aktive Stoffe“ zugeordnet, jedoch ohne weitere konkrete Vorgaben für den Umgang mit Schotterflug. Da bei PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur wahrscheinlich bzw. in überwiegenden Fällen insbesondere die PV-Module und deren Verkabelungen möglichem Schotterflug ausgesetzt sind, müssen diese Komponenten mit einer entsprechenden Robustheit gegen Stoß und Verkratzung durch Steinflug ausgestattet sein.

## 7.10 Sand

Sand stellt eine Art von möglichen Verschmutzungen der PV-Anlage dar und entsprechende Anforderungen (s. a. Kap. 7.13) sind in DIN EN 50125-2 [31] beschrieben.

Im Falle von PV-Anlagen ist jedoch insbesondere eine mögliche Beeinträchtigung ihrer prinzipiellen Aufgabe von Bedeutung. Hier gilt generell wie im Falle von jeglichen Verschmutzungen, dass ausschließlich durch geeignete Reinigung der Anlagenteile Abhilfe geschaffen werden kann.

## 7.11 Sonneneinstrahlung

In der Bahnnorm DIN EN 50125-2 [31] sind auch bzgl. thermischer Einwirkung durch Sonneneinstrahlung Anforderungen für ortsfeste elektrische Anlagen beschrieben. Es wird dabei zwischen zwei Klassen R1 (niedrig) und R2 (hoch) unterschieden und für jede der Klassen ein Wert für die Sonneneinstrahlung in  $\text{W/m}^2$  definiert. Für die Klasse R2 liegt dieser Wert beispielsweise bei  $1.120 \text{ W/m}^2$ . Es gilt die allgemeine Anforderung, dass Betriebsmittel, die der Sonnenstrahlung ausgesetzt sind, von dieser nicht beeinträchtigt werden sollen. Aus Sicht des Autors des vorliegenden Abschnitts kann im Falle der PV-Anlagen davon ausgegangen werden, dass die genannten Anforderungen bei PV-Anlagen, insbesondere bei den PV-Modulen alleine aufgrund der gewollten Sonneneinstrahlung und der generellen Funktion der Module bei der Konstruktion ausreichende Berücksichtigung finden. Aus diesem Grunde kann auf weitere Ausführungen verzichtet werden und das Thema wird an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

## 7.12 Blitzschlag

In der Bahnnorm DIN EN 50125-2 [31] ist auch das Thema Blitzschutz aufgeführt, allerdings wird dies bezüglich lediglich der Hinweis gegeben, dass Auswirkungen von Blitzschlägen beachtet werden sollten und als weitere Referenzen werden die Normen DIN EN 50124-1 [32] und DIN EN 50124-2 [33] aufgeführt.

In DIN EN 50124-1 [32] werden vier Überspannungskategorien (OV1 bis OV4) gebildet. Im Falle von PV-Anlagen trifft die Kategorie OV4 zu, da diese Stromkreise, die nicht gegen äußere oder innere Überspannungen geschützt sind (z. B. wenn sie direkt mit einer Fahrleitung oder einer Freileitung verbunden sind) und die durch Blitz- oder Schaltüberspannungen gefährdet sein können. Dies ist bei PV-Anlagen, bei denen wesentliche Bestandteile im Freien und häufig an exponierter Lage installiert sind, der Fall. DIN EN 50124-1 [32] gibt weiterhin für die vier Überspannungskategorien in Abhängigkeit der Nennspannung des Versorgungssystems bestimmte Werte für die Bemessungs-Isolationsspannung und die Bemessungs-Stoßspannung vor.

## 7.13 Verschmutzung

In der Bahnnorm DIN EN 50125-2 werden für ortsfeste elektrische Anlagen Anforderungen zum Umgang mit Verschmutzung der Anlagen erhoben. Allerdings liegt der Fokus dabei auf mittel- oder längerfristige Auswirkungen von Verschmutzungen. So können sich beispielsweise korrosive Wirkungen aufgrund von Regen negativ auf die Funktionsfähigkeit Non-Systemen bzw. Anlagen auswirken. Im Falle von PV-Modulen sind jedoch auch die kurzfristigen Ausfälle durch Verschmutzung zu berücksichtigen.

So ist beispielsweise denkbar, dass nach Staubstürmen oder aufgrund von Blütenstaub die PV-Module ihre Funktion nicht mehr in der erwarteten Quantität gewährleisten können.

Hinsichtlich der mittel- oder längerfristigen Auswirkungen von Verschmutzungen sind gemäß DIN EN 50125-2 die Auswirkungen der Verschmutzung unter folgenden Gesichtspunkten in Betracht zu ziehen:

- Verminderung der Spannungsfestigkeit der Isolierung;
- korrosive Wirkung von verschmutzter Luft und Regen;
- für die Auslegung der Belüftungseinrichtung.

Für den Fall der Verminderung der Spannungsfestigkeit der Isolierung verweist DIN EN 50125-2 auf die Bahnnorm DIN EN 50124-1, welche konkrete Anforderungen an die Isolation bei Verschmutzung festlegt. Des Weiteren wird in DIN EN 50125-2 zwischen folgenden Verschmutzungsarten unterschieden:

- chemisch aktive Stoffe;
- biologisch aktive Stoffe;
- mechanisch aktive Stoffe (z. B. Steine aus dem Schotterbett).

Für jede der drei Verschmutzungsarten kann gemäß DIN EN 50125-2 eine der wiederum drei Klassen (niedrig, mittel, hoch) von Verschmutzungsgraden bestimmt werden. Für die Definitionen der Klassen wird auf die entsprechenden Ausführungen in DIN EN IEC 60721-3-4 verwiesen. Dort sind den jeweiligen Klassen weitere Informationen (z. B. Menge des aufgewirbelten Staubes in mg/m<sup>3</sup>) zugeordnet und diese Informationen sollten als Anforderungen für die Konstruktion berücksichtigt werden.

Zusammenfasst kann festgestellt werden, dass bei einem Einsatz von PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur mögliche Verschmutzungen, soweit möglich, bereits konstruktiv berücksichtigt werden sollten. Die genannten Normen DIN EN 50125-2, DIN EN 50125-3 und DIN EN IEC 60721-3-4 enthalten diesbezügliche Information und Anforderungen. Den kurzfristigen Auswirkungen von insbesondere temporären Verschmutzungen kann jedoch in erster Linie nur durch betriebliche Maßnahmen entgegengetreten werden. Denkbar sind hier planmäßige und/oder regelmäßige Reinigungen sowie die zeitnahe Reaktion auf nicht planbare oder unvorhergesehene Ereignisse (z. B. Sandsturm). Bei gleisnahen oder in dem Gleisbett verbauten Teilen kann es auch sinnvoll sein, für die Reinigung spezielle neue Techniken zu entwickeln.

## 7.14 Schwingung/Vibration

Für ortsfeste elektrische Anlagen, zu denen PV-Anlagen gezählt werden können, gilt gemäß DIN EN 50125-2, dass Schwingungen nur dann betrachtet werden müssen, wenn sich das Betriebsmittel so nahe am Gleis befindet, dass es durch vorbeifahrende Fahrzeuge beeinflusst werden kann. Festlegungen zu Schwingungen und Stößen sollten in Übereinstimmung mit DIN EN IEC 60721-3-3 und DIN EN IEC 60721-3-4 zwischen Käufer und Lieferant abgestimmt werden. DIN EN 50125-2 verweist im Zusammenhang mit Festlegungen zu Schwingungen und Stößen auch auf die DIN EN 50125-3, die falls notwendig, herangezogen werden kann. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass sich die DIN EN 50125-3 originär zwar auf Umweltbedingungen für Signal- und Telekommunikationseinrichtungen bezieht, die in der Norm angegebenen Grenzwerte bei ihrer Anwendung für PV-Anlagen jedoch gewissermaßen als konservative Werte angesehen werden können und dies unter Sicherheitsaspekten nicht nachteilig ist.

Bei Schwingungen und Stößen spielt die Örtlichkeit der PV-Anlage bzw. deren Teile eine erhebliche Rolle, da mit steigender Entfernung die Auswirkungen von Schwingungen und Stößen geringer wird.

Das Entstehen von Schwingungen ist sehr komplex und wird von vielen Parametern beeinflusst. In DIN EN 50125-3 werden diesbezüglich folgende Einflussgrößen genannt:

- Bauform und Wartungszustand des Oberbaus,
- Nähe von Schienenstößen (z. B. Schienenverbinder, Kreuzungsstellen),
- Achslast,
- Drehgestellausführung,
- Flachstellen der Räder,
- Geschwindigkeit.

Auch Amplituden, Energieinhalt und deren Verteilung über den Frequenzbereich sind ebenfalls unterschiedlich.

Gemäß DIN EN 50125-3 kann eine Vibrationsbelastung ab einem Abstand von 3 m zum Gleis vernachlässigt werden. Dies ist sicherlich oft bei Installationen an baulichen Einrichtungen (s. a. 4.2.4), neben dem Schienenweg (s. a. 4.2.5) und den im Abschnitt 4.2.6 beschriebenen sonstigen Standorten der Fall. Auch Lärmschutzwälle sollten (s. a. 4.2.3) den 3 m-Abstand nicht unterschreiten. Insofern kommt neben der Anbringung von PV-Anlagen oder deren Teilen an gleisnahen LSW insbesondere der Installation im Gleisbett eine besondere Bedeutung im Hinblick auf mechanische Einwirkungen zu.

In Abhängigkeit des Einsatzpunktes der Komponenten sind bezogen auf Vibrationen in DIN EN 50125-3 zu berücksichtigende vertikale, transversale und longitudinale Effektivwerte der Beschleunigung ( $m/s^2$ ) vorgegeben. Es werden dabei folgende Einsatzorte unterschieden:

- an der Schiene;
- auf der Schwelle;
- im Schotter;
- außerhalb der Gleise (Abstand 1 bis 3 m vom Gleis).

Es liegt in der Natur der Sache, dass hinsichtlich Vibrationen die Beschleunigungswerte an der Schiene am höchsten sind und daher die Anforderungen für das Design und insbesondere die Robustheit der PV-Anlagenteile (z. B. im Falle von PV-Modulen in der Schwelle) ebenfalls höher sind.

Zusammenfasst kann festgestellt werden, dass vor einem Einsatz von PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur in Bezug auf Schwingungen der Nachweis zu erbringen ist, dass die PV-Anlagen und deren Teile die Anforderungen aus DIN EN 50125-2 erfüllen. Gleichwohl soll an dieser Stelle der folgende in DIN EN 50125-3 gegebene Hinweis nicht unerwähnt bleiben: Der Systementwickler sollte wo immer möglich sicherstellen, dass Betriebsmittel dort eingebaut werden, wo die Auswirkungen von Schwingungen und Stößen minimal sind.

## 7.15 Stöße

Gemäß EN 50125-2 gilt, dass Stöße nur dann betrachtet werden müssen, wenn sich das Betriebsmittel, in diesem Fall die PV-Anlage bzw. deren Bestandteile, so nahe am Gleis befindet, dass es durch vorbeifahrende Fahrzeuge beeinflusst werden kann. Festlegungen zu Stößen sollten in Übereinstimmung mit EN 60721-3-3 und EN 60721-3-4 zwischen Käufer und Lieferant abgestimmt werden.

In Abhängigkeit des Einsatzpunktes der Komponenten sind bezogen auf Stöße in EN 50125-3 zu berücksichtigende Effektivwerte der Beschleunigung ( $m/s^2$ ) und deren Dauer (in ms) vorgegeben.

Zusammenfasst kann festgestellt werden, dass vor einem Einsatz von PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur in Bezug auf Stöße der Nachweis zu erbringen ist, dass die PV-Anlagen und deren Teile die An-

forderungen aus EN 50125-2 erfüllen. Gleichwohl soll an dieser Stelle der folgende in EN 50125-3 gegebene Hinweis nicht unerwähnt bleiben: Der Systementwickler sollte wo immer möglich sicherstellen, dass Betriebsmittel dort eingebaut werden, wo die Auswirkungen von Schwingungen und Stößen minimal sind.

## 7.16 Elektromagnetische Verträglichkeit

Die elektromagnetischen Bedingungen für Betriebsmittel sind komplex und viele sind kurzzeitig. In DIN EN 50125-2 werden daher keine umfassenden EMV-Parameter für ortsfeste elektrische Anlagen festgelegt, sondern es wird diesbezüglich für weitere Informationen auf die DIN EN 50121-5 verwiesen. Hinsichtlich elektromagnetischer Verträglichkeit ist zwischen der Störfestigkeit und der Störaussendung zu unterscheiden und Anforderungen an diese beiden Aspekte werden in den beiden nachfolgenden Abschnitten detailliert beschrieben.

### 7.16.1 EMV – Störfestigkeit

Unter der elektromagnetischen Störfestigkeit wird in der Hochfrequenztechnik die gewünschte Resistenz eines zu prüfenden Systems, bis zu einem bestimmten Pegel oder Sollwert gegenüber einer externen Störquelle ungestört arbeiten zu können, verstanden. In der DIN EN 50121-5 sind Anforderungen bzgl. Störfestigkeitspegel für folgende Einrichtungen formuliert:

- sicherheitsrelevante Einrichtungen (Geräte, Betriebsmittel), wie z. B. Schutzeinrichtungen,
- Einrichtungen (Geräte, Betriebsmittel), die Verbindung mit Traktionsleistungsleitern besitzen,
- Einrichtungen (Geräte, Betriebsmittel) innerhalb des Drei-Meter-Bereichs,
- Anschlüsse von Einrichtungen (Geräten, Betriebsmitteln) innerhalb des Zehn-Meter-Bereichs mit Verbindungen innerhalb des Drei-Meter-Bereichs (s. a. Abschnitt 0),
- Anschlüsse von Einrichtungen (Geräten, Betriebsmitteln) innerhalb des Zehn-Meter-Bereichs (s. a. Abschnitt 0) mit Kabellängen > 30 m.

Je nach Installationsort können PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur in eine oder mehrere der drei letztgenannten Gruppen fallen, insofern sind die DIN EN 50121-5 bzw. die darin formulierten Anforderungen bei der Implementierung entsprechender Anlagen zu berücksichtigen.

In DIN EN 50121-5 sind in sechs verschiedenen Tabellen Prüfanforderungen bzgl. der Störfestigkeit von Geräten/Betriebsmitteln festgelegt:

- Tabelle 1 – Störfestigkeit – Gehäuse
- Tabelle 2 – Störfestigkeit – Anschlüsse für Signal- und Datenbusleitungen, die nicht der Prozesssteuerung dienen
- Tabelle 3 – Störfestigkeit – Anschlüsse für Prozess-, Mess- und Steuerleitungen sowie lange Busleitungen
- Tabelle 4 – Störfestigkeit – Gleichspannungs-Leistungsein-/ausgänge
- Tabelle 5 – Störfestigkeit – Wechselspannungs-Leistungsein-/ausgänge
- Tabelle 6 – Störfestigkeit – Erdanschluss

In den genannten Tabellen sind Angaben zur Prüfspezifikation enthalten und es wird auf den jeweils anzuwendenden Teil der Normenreihe bzw. der Grundnorm DIN EN 61000 verwiesen, der detaillierte Informationen zur Beschreibung der Prüfungen, der Prüfgeneratoren, der Prüfverfahren und des Prüfaufbaus bereit stellt.

Zusammenfasst kann festgestellt werden, dass vor einem Einsatz von PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur in Bezug auf EMV-Störfestigkeit der Nachweis zu erbringen ist, dass die PV-Anlagen und deren Teile die Anforderungen aus DIN EN 50121-5 und der Normenreihe DIN EN 61000 erfüllen.

## 7.16.2 EMV – Störaussendung

Unter der elektromagnetischen Störausstrahlung wird die unerwünschte Eigenschaft eines elektrischen oder elektronischen Gerätes, als elektromagnetische Störquelle zu arbeiten und dadurch andere Geräte zu stören, bezeichnet. Gerade im Schienenverkehr sind unzulässige elektromagnetische Beeinflussungen auszuschließen, da sonst unter Umständen auch sicherheitsrelevante Einrichtungen auf vorbeifahrenden Schienenfahrzeugen (z. B. Bremssteuerungen, Türsteuerungen etc.) oder der Signalechnik (z. B. Achszähler) in ihrer ordnungsgemäßen Funktion beeinflusst werden können und es in der Folge zu Unfällen kommen könnte.

In den Abschnitten des Kapitels 5 im vorliegenden Dokument sind die Hauptkomponenten einer PV-Anlage beschrieben. In Bezug auf mögliche EMV-Störaussendung sind insbesondere Umwandlungs- und Transformierungselemente (s. a. Kap. 5.3) und die Steuerungs- und Überwachungsanlagen (s. a. Kap. 5.5) von Bedeutung. Für folgende Aspekte sind Nachweise zu erbringen:

- keine unzulässige Störaussendung vom Unterwerk in die Außenwelt
- keine unzulässige Störaussendung von Einrichtungen (Geräten, Betriebsmitteln), die mit Wechselspannungen mit einem Effektivwert unterhalb 1 000 V betrieben werden.
- keine unzulässige Störaussendung innerhalb der Grenzen des Unterwerks

Eine PV-Anlage ist zwar nicht selbst ein Unterwerk, jedoch erscheint die Anwendung der oben genannten Aspekte auch für die relevanten Teile einer PV-Anlage sinnvoll. DIN EN 50121-5 enthält selbst keine Grenzwerte für die Störaussendung, sondern es wird diesbezüglich auf DIN EN 50121-2 verwiesen. Dort finden sich soweit möglich Grenzwerte, aber auch Richtwerte:

- Grenzwerte für die Störaussendung für den Frequenzbereich 150 kHz bis 1 GHz
- Richtwerte für die Störaussendung von magnetischen Gleichfeldern und Magnetfeldern mit energetischen Frequenzen
- Richtwerte für die Störaussendung innerhalb der Grenzen des Unterwerks

Als weitere Norm wird in DIN EN 50121-5 auf DIN EN 61000-6-45012 verwiesen, die wiederum Grenzwerte der Störaussendung für Geräten und Betriebsmittel, die mit einer Wechselspannung mit einem Effektivwert unterhalb 1 000 V versorgt werden, vorgibt.

Zusammenfasst kann festgestellt werden, dass vor einem Einsatz von PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur in Bezug auf EMV-Störaussendung der Nachweis zu erbringen ist, dass die PV-Anlagen und deren Teile die Anforderungen aus DIN EN 50121-5, DIN EN 50121-1 und DIN EN 61000-6-4 erfüllen.

# 8 Anforderungen an die elektrische Einspeisung

In Kap. 5 wurde der Aufbau einer konventionellen PV-Anlage mit Einspeisung in das Landesnetz beschrieben. Für die Einspeisung in das Fahrleitungsnetz 15 kV, 16,7 Hz der Bahn sind einige Besonderheiten zu beachten. Diese werden in diesem Kapitel beschrieben.

Dazu wird nach einer kurzen Einführung in die Bahnenergieversorgung Deutschlands zunächst der prinzipielle Aufbau einer PV-Anlage mit Direkteinspeisung in das 15 kV-Fahrleitungsnetz dargestellt. Anschließend wird auf den Schutz der Komponenten, die Anforderungen bzgl. der Last für den PV-Generator, Anforderungen bezüglich des Anschlusses an das 15 kV-Fahrleitungsnetz sowie die Steuerung, Überwachung und Betriebsführung der PV-Anlage eingegangen.

## 8.1 Wechselstrom-Bahnenergieversorgung in Deutschland

Die Länge des Schienennetzes der DB AG (Betriebslänge) beträgt ca. 33.400 km [34]. Davon sind derzeit ca. 61 % elektrifiziert [35]. Im Koalitionsvertrag der amtierenden Bundesregierung [36] ist das Ziel festgelegt, bis 2030 den Elektrifizierungsgrad auf 75 % zu steigern. Das Bahnstromnetz (110 kV) ist etwa 7.700 km lang. Hierüber werden täglich rund 20.000 Züge mit Bahnstrom versorgt. Die allgemeine elektrische Energieversorgung in Deutschland erfolgt über ein Drehstromnetz mit einer Frequenz von 50 Hz. Bahnstromnetz und Fahrleitung (15 kV) werden mit einer eigenen Frequenz von 16,7 Hz betrieben.

Rund zwei Drittel der für den Zugbetrieb benötigten Energie wird in speziellen Bahnstrom-Kraftwerken erzeugt. Die übrige Energie wird aus dem öffentlichen Landesnetz (3 Phasen, 50 Hz) über Umformer und Umrichter entnommen, die den dreiphasigen 50-Hz-Strom in einphasigen Bahnstrom mit 16,7 Hz umwandeln.

Das Bahnstromnetz (110 kV) verteilt den für den Eisenbahnverkehr benötigten Strom zu den Unterwerken. Diese transformieren auf die Spannung mit einem Nennwert von 15 kV und speisen diese in die Fahrleitungen ein.

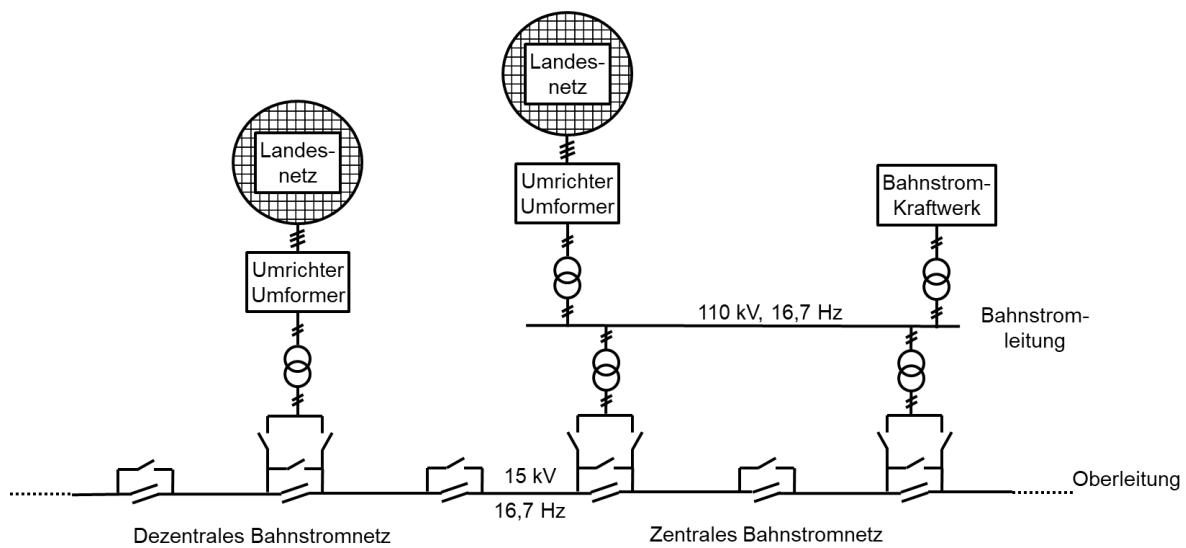


Abbildung 13: Prinzipielle Darstellung der Wechselstrom-Bahnenergieversorgung in Deutschland. Quelle: TÜV Rheinland.

Die Entwicklung der Bahnstromversorgung verlief bei der ehemaligen Deutschen Bundesbahn und Deutschen Reichsbahn etwas unterschiedlich. Anders als bei der Bundesbahn setzte die Reichsbahn in der DDR teilweise nicht nur auf eine eigene 110-kV-Bahnstromversorgung. Nach skandinavischem Vorbild installierte sie dezentrale Umformerwerke, die aus dem öffentlichen Netz gespeist wurden. Diese rotierenden Umformer wandeln die Frequenz in die benötigten 16,7 Hz um und speisen damit die Fahrleitung. Umformer (rotierende elektrische Maschinen) und Umrichter (leistungselektronische Anlagen) verändern die Frequenz, um 16,7 Hz Bahnstrom zu erzeugen. Ein Unterwerk transformiert die elektrische Spannung in die für die Fahrleitung erforderliche Spannung von 15 kV.

In [84], S. 9 sind die derzeit elektrifizierten Bahnstrecken gezeigt, die in Deutschland nach der EBO betrieben werden.

## 8.2 Prinzipieller Aufbau einer PV-Anlage mit Direkteinspeisung in die Fahrleitung

Zwei Arten der Direkteinspeisung von photovoltaisch erzeugter elektrischer Energie in die Fahrleitung sind bereits grundsätzlich erprobt worden und sind daher offensichtlich praktikabel.

1. Der vom PV-Generator zur Verfügung gestellte DC-Strom wird in einen dreiphasigen Strom mit der Frequenz 50 Hz gewandelt. Über ein dezentrales Umrichterwerk oder über einen dezentralen Umformer wird in die Fahrleitung mit der Frequenz 16,7 Hz eingespeist. Siehe z. B. [37].
2. Der vom PV-Generator zur Verfügung gestellte DC-Strom wird direkt in einen einphasigen Strom mit der Frequenz 16,7 Hz gewandelt und z. B. über einen Transformator an die Fahrleitungsspannung 15 kV angepasst. Siehe z. B. [20].

Der Aufbau der beiden Einspeisearten wird in folgender Abbildung 14 skizziert.

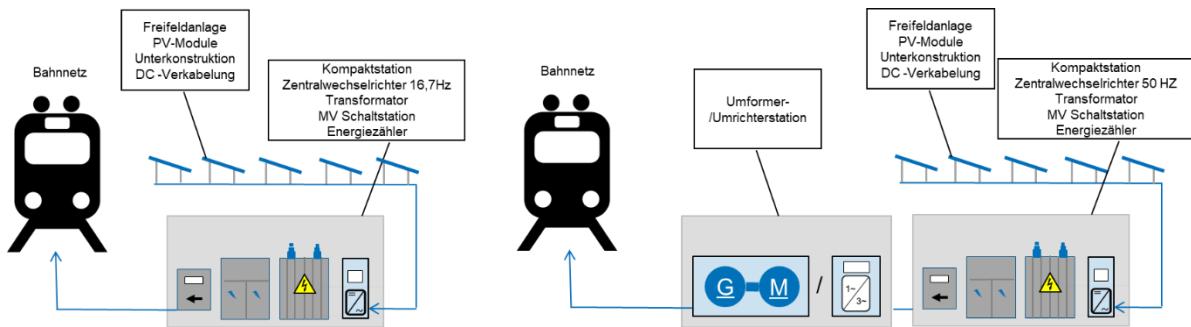


Abbildung 14: Direkteinspeisung in die Fahrleitung, mit direkter Wandlung in 16,7 Hz (links) und mit zwischengefügter Wandlung in 3 AC 50 Hz (rechts). Quelle: TÜV Rheinland

Die Einspeiseart mit zwischengefügter Wandlung in eine 3 AC 50 Hz Spannung wird in diesem Kapitel nicht weiter betrachtet, da sie auf existierenden, eingeführten und bekannten Subsystemen beruht. Zudem ist bei dieser Art der Einspeisung der Aufwand an Komponenten und Einheiten größer und der Wirkungsgrad kleiner.

Der prinzipielle Aufbau einer PV-Anlage mit Direkteinspeisung in die Fahrleitung mit direkter Wandlung in 16,7 Hz ist in Abbildung 15 dargestellt.

In Bezug auf die Verwendbarkeit für die Direkteinspeisung in das Fahrleitungsnetz gibt es bei PV-Modulen keine generellen Einschränkungen. Die Module können durch serielle und parallele Verschaltung zu PV-Strings zusammengeschaltet werden und sind daher sowohl in baulicher Ausdehnung als auch in der Leistungsgröße sehr variabel. Typische PV-Module haben Systemspannungen zwischen 1000 V und 1500 V Gleichspannung.

Neben den gegebenenfalls besonderen mechanischen Belastungen für PV-Module an oder in der Bahninfrastruktur sind die Anforderungen bezüglich der elektrischen Sicherheit wesentlich. Unter anderem ist dazu die Isolationskoordination in der für Bahnanwendungen relevanten Norm EN 50124-1 [32] spezifiziert. Die in der für PV-Module allgemein relevanten Norm IEC 61730-1 [38] spezifizierten Anforderungen bezüglich der Isolationskoordination entsprechen denen der EN 50124-1 [32], sodass diesbezüglich keine Unterschiede für die Anwendung bestehen. Die weiteren Anforderungen zur elektrischen Sicherheit für stationäre Bahnanlagen sind in der Norm EN 50122-1 [39] genannt. Der Aufbau des PV-Generators muss die darin genannten Anforderungen, insbesondere den Schutz gegen direktes und indirektes Berühren, erfüllen.

Mehrere PV-Module werden in Reihen- und/oder Parallelschaltung zu einem PV-String verschaltet. Die maximal entstehende Spannung in diesem PV-String darf die Systemspannung unter keinen Bedingungen überschreiten und muss an den Wechselrichter angepasst sein. Der Arbeitsbereich des Wechselrichters sollte an die von den PV-Strings generierte Spannung angepasst sein, wobei eine sinnvolle Abschaltschwelle bei kleiner Spannung (geringer Lichteinfall auf die Solarmodule) gewählt werden sollte.

Unterkonstruktion und Befestigungssysteme sind entsprechend der Anwendungsklasse und den konkreten örtlichen Gegebenheiten sowie den zu erwartenden mechanischen Belastungen zu wählen. Mögliche Anpassungen an standardmäßig verfügbaren PV-Modulen, Unterkonstruktionen und Befestigungssystemen sind in den Kapiteln 5.1.4 und 5.2.3 genannt.

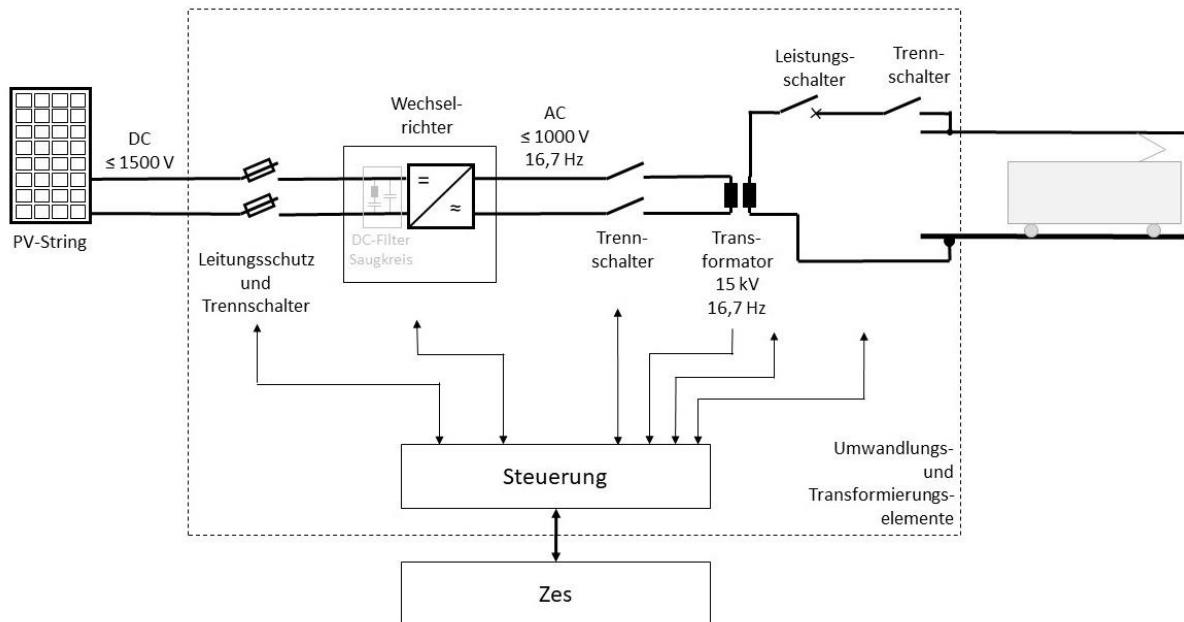


Abbildung 15: Prinzipieller Aufbau der PV-Anlage zur Direkteinspeisung. Quelle: TÜV Rheinland

Über eine entsprechend ausgelegte Verkabelung wird die Spannung des PV-Generators den Umwandlungs- und Transformierungselementen zugeführt, vgl. Kap. 5.3. Insbesondere falls der PV-Generator an oder in der Bahnstrecke aufgebaut ist, ist wahrscheinlich eine Kompaktstation für die Aufnahme der Umwandlungs- und Transformierungselemente vorteilhaft. Andere Räumlichkeiten oder Gehäuse, die eine geschützte Unterbringung entsprechend den Umweltbedingungen in [31] ermöglichen, sind selbstverständlich ebenfalls denkbar.

Im DC-seitigen Anschlussbereich des Wechselrichters ist ein Trennschalter, der den Rest der Anlage von dem PV-String trennen kann, anzuordnen. Aufgrund der konkreten Anforderungen ist zu entscheiden, ob der Schalter motorisch angetrieben und zusätzlich fernsteuerbar sein muss oder sollte. Je nach Auslegung der konkreten Anlage sind für die Steuerung nach DIN VDE 0100-712 [40] ebenfalls Überstromschutzeinrichtungen, z. B. Schmelzsicherungen, zu integrieren. Generell ist im Anschlussbereich zum Schutz der Anlage ein Überspannungsschutz vorzusehen.

Der Wechselrichter als Umwandlungs- und Leistungsteil steuert den Strom im PV-String. Auf seiner AC-Seite generiert der Wechselrichter eine Wechselspannung, die in Amplitude und Phasenlage so gewählt ist, dass die gewünschte Leistung über den Fünfzehn-kV-Transformator in das Fahrleitungsnetz eingespeist werden kann. Der für den Betrieb des Wechselrichters notwendige DC-seitige Kondensator, ist Bestandteil des Wechselrichters. Eine ergänzende DC-seitige Filterung kann notwendig sein. Diese ist dann anlagenspezifisch auszulegen.

Der Transformator transformiert die AC-Wechselrichterausgangsspannung auf die Fünfzehn-kV-Fahrleitungsspannung. Um den Wechselrichter freischalten zu können, kann ein Trennschalter zwischen Wechselrichter und Transformator vorgesehen werden. Anforderungen an stationäre einphasige Bahntransformatoren die Wechselspannungsfahrleitungen speisen sind in den Normen DIN EN 60076-1 [41] und DIN EN 61378-1 [42] festgelegt.

Im Netz der DB AG sind auch im großen Umfang Weichenheizungstransformatoren vorhanden. Die maximale Leistung dieser Transformatoren reicht bis zu 100 kVA. Prinzipiell wären auch diese für die Energieübertragung in das Fahrleitungsnetz geeignet. Nachteilig ist hier die geringe Spannung von 231 V auf der Unterspannungsseite. Zudem sind die Transformatoren für recht geringe Umgebungstemperaturen ausgelegt, sodass die tatsächlich übertragbare Leistung bei sommerlichen Bedingungen gegenüber den

Nennwerten noch reduziert werden muss. Aufgrund der geringen Spannung und der geringen möglichen Leistungsübertragung wird die Nutzung dieser Transformatoren in dieser Studie nicht weiter betrachtet. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass diese Art von Transformatoren für die Direkteinspeisung in die Fahrleitung bereits erfolgreich getestet wurden [20].

Eine alternative, innovative Möglichkeit wäre, eine entsprechend kaskadierte Stromrichterschaltung, bestehend aus in Reihe geschalteten Stromrichtermodulen, direkt an die Fahrleitung anzuschließen. Die Potenzialtrennung erfolgt über Mittelfrequenztransformatoren. Die Stromrichtertechnik wird hierdurch zwar komplexer, größer und teurer. Allerdings kann hierdurch der große und kostspielige Transformator eingespart werden. Die wahrscheinlich aufwändige Entwicklung der Stromrichtermodule könnte sich, bei Ausrollen dieser Technologie in der Fläche, aufgrund der benötigten großen Stückzahl schnell amortisieren. Eine solche Lösung ist vor einigen Jahren für die Anwendung in Fahrzeugen angedacht worden ([43], [44], [45], [46], [47]). Ähnliche Lösungen existieren bereits zur direkten Einspeisung in die Fahrleitung aus dem dreiphasigen Landesnetz, siehe z. B. [48]. Rückmeldungen möglicher Hersteller lassen allerdings erkennen, dass eine solche Technologie derzeit nicht vorangetrieben wird.

Die 15-kV-Oberspannungsseite des Transformators nachgeordnet ist ein Leistungsschalter vorzusehen. Er ist notwendig, um mögliche auftretende Kurzschlüsse auf der Oberspannungsseite abzuschalten. Die Koordination der Schutzeinrichtung ist mit der 15-kV-Betriebsführung des Fahrleitungsnetzes abzustimmen. Vom 15-kV-Leistungsschalter erfolgt die Energieübertragung je nach der zu übertragenen Leistung mittels eines oder mehrerer 15-kV-Einleiterkabel / (Speisekabel) in Richtung der Fahrleitung. Die Speisekabel sind nach den Anforderungen der Strombelastung und für den Kurzschlussfall dementsprechend elektrisch auszulegen.

Zum Schutz der Speisekabel vor auftretenden Überspannungen, vornehmlich durch Blitz einschläge, sind Überspannungsableiter unmittelbar am Kabelendverschluss fahrleitungsseitig einzusetzen. Am Kabelendverschluss fahrleitungsseitig am Mast ist ein Fahrleitungstrennschalter (Lasttrennschalter) für die Einspeisung der aus der Solarenergie gewonnenen 15-kV-Spannung anzugeben und mit dem Kabel unmittelbar zu verbinden. Vom Fahrleitungstrennschalter kann die Energie mittels eines kurzen Leiterseils direkt in das unmittelbar vor Ort befindliche Fahrleitungskettenwerk eingespeist werden. Alternativ dazu kann der Fahrleitungstrennschalter an eine zu planende Speiseleitung, die z. B. an der Fahrleitungstrasse entlang zu einer entfernten Einspeisestelle geführt wird, angeschlossen werden. Zur Gestaltung und Planung der Fahrleitungsanlage inklusive von Einspeisungen sind in Deutschland die Anforderungen der DIN EN 50119 [49] und die DB-Konzernrichtlinie, die DB Richtlinie (RiL) 997.0100 [50] einzuhalten.

Zur Sicherstellung der Rückstromführung ist am Ort des Transformators ein Flächenerder (Maschenerder) erforderlich, an den der Gegenpol des Transformators angeschlossen ist. Der Anschluss erfolgt üblicherweise über einen Nullschienenschrank, an dem ebenfalls Rückleitungskabel angeschlossen sind, die in Richtung Gleis geführt und dort direkt und/oder auch an eventuell vorhandene Rückleiterseile angeschlossen sind. Die Rückleiterkabel sind 1-kV-Einleiter-Niederspannungskabel, die für den entsprechenden Stromfluss ausreichend dimensioniert werden müssen. Durch die hier beschriebenen Maßnahmen ist sichergestellt, dass der Rückstrom sowohl über die Gleise, das Erdreich und/oder vorhandene Rückleiterseile kontrolliert geführt wird und dabei die elektrische Personensicherheit gewährleistet ist. Die Grundlagen und Anforderungen zur Rückstromführung sind in den DB-Konzernrichtlinien DB RiL 997.0201 [51] und DB RiL 955.0101 [52] festgeschrieben und zu berücksichtigen.

Weiterhin vorhanden in der PV-Anlage sind die in Kap. 5.3 genannten Schutz- und Sicherheitseinrichtungen. Sie sind gegebenenfalls in der Steuerungs- und Regelungseinrichtung der PV-Anlage integriert. Üblicherweise wird die Steuerung und Überwachung der PV-Anlage über die Zentralschaltstelle (Zes) erfolgen. Die dazu notwendige Datenübertragung muss integriert sein. Die Möglichkeit der Vor-Ort-Steuerung, zumindest für die wichtigsten Steuerungsaufgaben, sollte ebenfalls gegeben sein.

Kühl- und/oder Lüftungseinrichtungen sind in Abhängigkeit der verwendeten Technologie in der Anlage vorzusehen. Bei konventionellen PV-Anlagen werden die Nebenbetriebe inklusive der Steuerung und Überwachung üblicherweise vom Netz gespeist (außer bei Insel-Wechselrichtern). Kleinanlagen (Niederspannungsbetrieb) kommen ohne Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) aus und starten nach Netzausfall automatisch wieder ein. Bei Großanlagen (im Mittelspannungsbereich) ist eine USV üblich, um externe Anlagenüberwachung und geordnetes Anfahren oder Runterfahren zu gewährleisten. In den bisherigen zur Einspeisung von Bahnenergie genutzten Unterwerken und Umrichterwerken ist eine Batteriepufferung erwünscht und üblich, um die Schutzeinrichtungen sowie die Steuerung und Überwachung inklusive der Kommunikation zur Zes für 5 Stunden aufrecht zu erhalten. Siehe hierzu auch die DB-Konzernrichtlinie DB RiL 955.0101 [52]. Diese Anforderung ist gegebenenfalls für die Anwendung bei PV-Anlagen zur Einspeisung in die Fahrleitung anzupassen, da die PV-Anlagen regelmäßig über Nacht keine Leistung einspeisen können und vorteilhafterweise komplett außer Betrieb gehen können, bis am nächsten Morgen wieder ausreichend Sonnenlicht zur Verfügung steht. Störungen einer PV-Anlage könnten in der Zes auch anhand anderer Indikatoren erkannt werden.

Die Versorgung der Nebenbetriebe inklusive Steuerung und Überwachung mit elektrischer Energie sind prinzipiell aus drei Quellen denkbar:

- Versorgung aus dem dreiphasigen Landesnetz. Dies ist in den meisten Fällen vermutlich die günstigste Versorgung bei der Installation an oder in baulichen Einrichtungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass hier ohnehin eine dreiphasige 400-V-Versorgung zur Verfügung steht. Bei den anderen Anwendungsklassen (Installation am oder im Gleisbett, an oder in einer LSW, an oder auf einem Lärmschutzwand, neben dem Schienenweg) ist die Versorgung aus dem Landesnetz im Allgemeinen nicht aufwandarm möglich, da Versorgungsleitungen und Anschlusspunkte in der Nähe der Einspeisung normalerweise nicht vorhanden sind. Es ist gerade ein Vorteil der Direkteinspeisung in die Fahrleitung, ohne Anschluss zum Landesnetz auszukommen.
- Versorgung aus dem PV-Generator. Die Versorgung steht zu Zeiten mit ausreichendem Tageslicht zur Verfügung. Dies wäre prinzipiell ausreichend, da nur in diesen Zeiten die Anlage in Betrieb ist und Steuerung, Lüftung und Kühlung benötigt werden.
- Versorgung aus der Fahrleitung. Die PV-Anlage sollte nur in Betrieb sein, wenn Fahrleitungsspannung anliegt. Somit ist prinzipiell die Versorgung der Anlage aus der Fahrleitung möglich. Bei Ausfall der Fahrleitungsspannung wäre jedoch eine Fernsteuerung und -Überwachung nicht möglich. Auch müsste über Nacht, wenn keine photovoltaische Energie erzeugt wird, der Transformator an der Fahrleitung angeschaltet bleiben, um die Steuerung zu versorgen. Alternativ könnte eine Pufferung über eine Batterie erfolgen.

Schließlich sind Messung und Zählung der eingespeisten und bezogenen Energie vorzusehen, siehe [53].

## 8.3 Schutz der Komponenten

Eine wesentliche Anforderung an die PV-Anlage ist neben einer hohen Verfügbarkeit für eine wirtschaftliche Nutzung die kostenintensiven Komponenten, soweit technisch und wirtschaftlich sinnvoll, zu schützen.

Der Strom im PV-String wird von Wechselrichter gesteuert und entsprechend eingestellt. Damit ist auch eine Überwachung bzw. Begrenzung dieses Stromes auf zulässige Werte einfach möglich. Die zulässigen Stromwerte werden bestimmt durch den zulässigen Strom im PV-String und im Wechselrichter. Entsprechende Überstromschutzeinrichtungen schützen im Fehlerfall. Genauso wird der Strom auf der AC-

Seite durch den Wechselrichter eingestellt. Auch hier ist eine Überwachung bzw. Begrenzung auf zulässige Werte ohne großen Zusatzaufwand möglich. Die zulässigen Stromwerte werden bestimmt durch die zulässigen Werte von Wechselrichter und Transformator. Darüber hinaus kann der Strom noch begrenzt werden durch den maximal zulässigen Einspeisestrom oder durch die maximal zulässige Einspeiseleistung. Auch auf der AC-Seite sind entsprechende Überstrom- und Kurzschlusschutzeinrichtungen angeordnet.

Die maximale Modul- und Strangspannung ist abhängig von den Eigenschaften des Moduls bzw. der im Strang verbauten Module und deren Verschaltung und stellt sich in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung in der Modulebene ein. Damit ist die maximale Modul- und Strangspannung technisch begrenzt und kann für die aktuelle Anlage bestimmt werden. Spannungsüberschreitungen können nur bei fälscher Beschriftung (Installationsfehler) auftreten. Eine fehlerindizierte Abschaltung einzelner Modulstränge ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich und nicht üblich. Die maximale Spannung auf der AC-Seite des Wechselrichters ist bestimmt durch den Strom, die Fahrleitungsspannung und die Eigenschaften des Transformators. Bei korrekter Auslegung des Transformators und des Wechselrichters, den üblichen wechselrichterinternen Überwachungen und der Fahrleitungsspannung im Toleranzbereich kann keine Überspannung an der Unterspannungsseite des Transformators auftreten. Eine diesbezügliche Überwachung ist nicht erforderlich.

Der Transformator als wertvolle Komponente ist mit den üblichen Schutzeinrichtungen für Transformatoren auszustatten. Diese können z. B. sein: Buchholzschutz, Differenzialschutz, Temperaturüberwachung. Die Signale der Schutzeinrichtungen sind in einer Steuerung zu erfassen und entsprechend zu verarbeiten. Bei Fehlern wird der Transformator sowohl ober- als auch unterspannungsseitig ausgeschaltet.

Transiente Überspannungen, z. B. aufgrund von atmosphärischen Blitzentladungen, können sowohl auf der Fahrleitung als auch in den PV-Strings entstehen. Entsprechende Schutzeinrichtungen sind in der Anlage zu integrieren. Hinweise zur Auslegung des Überspannungsschutzes sind in den Normen EN 50124-2 [33], EN 62305-3 Beiblatt 5 [54] zu finden. Im Weiteren sind ebenfalls dazu die Festlegungen zum Einsatz von Überspannungsableitern entsprechend der-DB Konzernrichtlinie DB RiL 955.0101 [52] sowie des darin erwähnten Lastenheftes „Blitz- und Überspannungsschutz von Schaltanlagen der DB Energie“ zu berücksichtigen.

## 8.4 Anforderung bzgl. der PV-Strings

Der PV-String erzeugt eine DC-Spannung, die vor allem mit der Sonneneinstrahlung, dem Strom und der Temperatur variiert. Der Wechselrichter wandelt den von dem PV-String bereitgestellten DC-Strom in AC-Strom bei im festgelegten Spannungsbereich um und stellt die entsprechende AC-Leistung zu Verfügung. Um die maximale Leistung abrufen zu können, bestimmt der MPP-Tracker den auf die maximale Leistung hin optimierten Strom. Vorrangig ist selbstverständlich die gegebenenfalls von übergeordneter Seite vorgegebene Maximalleistung zu berücksichtigen. Zusätzlich ist die Überlastung der Module durch zu großen Strom zu verhindern.

Aus energetischer Sicht ist der Betrieb der PV-Anlage solange sinnvoll, wie Leistung in die Fahrleitung eingespeist werden kann. Verschleiß- und Alterungseffekte führen aus wirtschaftlichen Gründen dazu, dass der Betrieb der PV-Anlage nur ab einer gewissen minimal in das Fahrleitungsnetz einspeisbaren Leistung sinnvoll ist. Die Spannung der PV-Strings in ihrem so bestimmten Arbeitsbereich (minimal sinnvolle bis maximal einspeisbare Leistung) und der Arbeitsbereich des Wechselrichters müssen aneinander angepasst sein.

Die von den PV-Strings zur Verfügung gestellte Spannung und die abrufbare Leistung sind, über kurze Zeiträume betrachtet, konstant. Die Fahrleitungsspannung  $U_{FL}$  ist (idealerweise) sinusförmig; der in die Fahrleitung eingespeiste Strom  $I_E$  sollte daher ebenfalls sinusförmig und, um einen optimalen Leistungsfaktor zu erhalten, in Phase zur Spannung sein.

$$U_{FL}(t) = \hat{U}_{FL} \cdot \cos(\omega t) \quad I_E(t) = \hat{I}_E \cdot \cos(\omega t)$$

Damit wird die in die Fahrleitung eingespeiste Leistung  $P_E$ :

$$P_E(t) = U_{FL}(t) \cdot I_E(t) = \hat{U}_{FL} \cdot \hat{I}_E \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega t))$$

Die in die Fahrleitung eingespeiste Leistung schwankt aufgrund der Einphasigkeit der Fahrleitung mit doppelter Speisefrequenz zwischen einem Minimalwert und einem Maximalwert. Bei Einspeisung von reiner Wirkleistung (wie im Rechenbeispiel oben dargestellt) schwankt die Leistung zwischen 0 und dem doppelten Mittelwert. Da der Wechselrichter keine nennenswerten Energiespeicher enthält, werden diese Leistungsschwankungen auch auf die DC-Seite des Wechselrichters übertragen. Für die PV-Strings und die erzeugbare Energie sind diese Leistungsschwankungen ungünstig, da der Strom in ihnen stark schwankte, was eine größere Effektivstrombelastung darstellte und der vom MPP-Tracker vorgegebene Strom nicht eingehalten würde. Daher ist eine entsprechende Filterung, z. B. in Form eines sogenannten Saugkreises, vorzusehen.

Bedingt durch das Taktten des Wechselrichters enthält der Strom auf seiner DC-Seite auch höherfrequente Anteile. Je nach Aufbau des Wechselrichters, seiner Schaltfrequenz und des gegebenenfalls weitläufigen PV-Strings mit nicht vernachlässigbarer Serieninduktivität können Resonanzen entstehen. Um unerwünschte Resonanzen in diesem System zu vermeiden und die höherfrequenten Stromanteile zu dämpfen, ist gegebenenfalls ein entsprechender Filter vorzusehen. Dieses ist entweder im Wechselrichter integriert oder muss als eigenständige Komponente eingeplant werden. Darüber hinaus muss die PV-Anlage die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit erfüllen (EMV) (siehe Kap. 7.16). Daraus können weitere Anforderungen an Filter erfolgen. In der DB-Konzernrichtlinie sind in der DB-RiL-055.0101A02 [52] EMV-Planungsgrundsätze und der Werkstandard der DB Energie GmbH zur DIN-EN-50121-2 [55] festgeschrieben, die eingehalten werden müssen.

## 8.5 Anforderung an die Einspeisung 15-kV-seitig

Der Wechselrichter muss, ähnlich einem dezentralen Umrichterwerk (dUrw) oder einem 4QS auf einem Fahrzeug, Ausgangsspannung und -frequenz sowie Phasenlage so regeln, dass möglichst die momentan vorgegebene Leistung in die Fahrleitung eingespeist wird. Dazu wird der in die Fahrleitung eingeprägte Strom so geregelt, dass er in Phase zur Fahrleitungsspannung liegt, um einen optimalen Leistungsfaktor zu erzielen. Damit ist sichergestellt, dass die Phasenlage der eingespeisten PV-Energie gleich mit der in der Fahrleitungsanlage ist. Gegebenenfalls kann von einer übergeordneten Steuerung zum Zwecke der Stabilisierung des Fahrleitungsnetzes ein Verschiebungsfaktor vorgegeben werden. Für die optimale Ausnutzung der PV-Anlage wäre es wünschenswert, die komplette zur Verfügung stehende Leistung aus den PV-Modulen einzuspeisen.

Die maximal zulässige Fahrleitungsspannung gem. EN 50163 [56] darf dabei nicht überschritten werden. Unterhalb der nach EN 50163 [56] definierten minimalen Spannung ( $U_{min2}$ ) darf kein Strom mehr in die Fahrleitung eingespeist werden. Bei Verletzung der in EN 50163 [29] festgelegten Grenzen muss die Anlage abgeregelt oder abgeschaltet werden [53].

Die Einspeisung in das Fahrleitungsnetz muss von der Zes oder mit der Vor-Ort-Steuerung ein- oder ausgeschaltet werden können. Finden Arbeiten an oder in der Nähe der Fahrleitung im entsprechenden

Abschnitt des Fahrleitungsnetzes statt, ist auch eine elektrisch sichere Trennung, z. B. über den Fahrleitungstrennschalter (Einspeiseschalter), notwendig.

Die konventionelle Versorgung des betreffenden Fahrleitungsabschnittes kann ausfallen oder es kann bei bewusster Abschaltung der konventionellen Versorgung übersehen worden sein, auch die PV-Anlage abzuschalten. In diesem Fall muss sich die PV-Anlage selbständig abschalten und trennen. Solche Funktionalitäten sind für konventionelle PV-Anlagen als NA-Schutz nach VDE-AR-N 4105 [1] bekannt. Speisen mehrere PV-Anlagen in einen Fahrleitungsabschnitt, muss diese Abschaltung ebenfalls erfolgen. Da die von der Fahrleitung getrennte PV-Anlage ohne eine entsprechende Erfassung der Fahrleitungsspannung nicht autark erkennen kann, wenn wieder Fahrleitungsspannung anliegt, sollte und kann der Betrieb erst wiederaufgenommen werden, wenn ein entsprechender Vor-Ort-Befehl oder Befehl der Zes vorliegt. Hierzu ist noch abzustimmen, wie bei einer Schutzabschaltung im Fehlerfall mit Wiedereinschaltung nach ein paar Sekunden bei kurzzeitigen, vorübergehenden Fehlern umgegangen werden soll. Üblich ist im Fahrleitungsnetz, das in Speiseabschnitte unterteilt ist, dass bei Kurzschlägen eine automatische Streckenprüfung von den speisenden Unterwerken (Uw), dUrw, Kuppelstelle (Kst) oder Sp initiiert wird. Bei negativem Prüfergebnis (Fehlerfreiheit) wird der betreffende Fahrleitungsabschnitt nach einigen Sekunden wieder unter Spannung gesetzt. Ist ein selbständiges Einschalten der PV-Anlage bei wieder vorhandener Fahrleitungsspannung wünschenswert, so ist in der PV-Anlage eine Fahrleitungsspannungserfassung fahrleitungsseitig am Fahrleitungstrennschalter vorzusehen.

Ist der entsprechende Fahrleitungsabschnitt aufgrund eines Kurzschlusses oder einer bewussten Handlung ausgeschaltet und bahngeerdet (mit der Rückleitung verbunden), muss dies von der PV-Anlage erkannt werden, sofern sie noch mit der Fahrleitung verbunden ist. Die Leistungsschalter und Trennschalter müssen in diesem Fall ausgeschaltet und geöffnet werden. Der Betrieb der PV-Anlage darf erst wiederaufgenommen werden, wenn ein entsprechender Vor-Ort-Befehl oder Befehl der Zes vorliegt.

Die Spannung am Einspeisepunkt an der Fahrleitung muss bestimmte Qualitätskriterien erfüllen. Die Spannungsverzerrung (THD) darf höchstens 1,5 % betragen, einzelne Oberschwingungen dürfen höchstens 1 % der Grundschwingung betragen [53]. Dazu muss der eingespeiste Strom nahezu sinusförmig sein. In EN 50388 [57] ist die Verträglichkeitsuntersuchung für neue Elemente im Bahnenergieversorgungssystem definiert (siehe auch [53]). Als Referenz für die Einspeisung von PV-Anlagen in die Fahrleitung können die Anforderungen herangezogen werden, die auch für dUrw gelten. Siehe [58], [59], [60]; diese Vorschriften behandeln Störströme zur Verträglichkeitsuntersuchung mit Gleisstromkreisen und sind ebenfalls in [53] gefordert. In Analogiebetrachtung zu Anforderungen an Fahrzeuge kann auch das in den Technischen Netzzugangsbedingungen [61], Kap. B.2.2 genannte Stabilitätskriterium bezüglich Oberschwingungen herangezogen werden. Darin wird gefordert, dass die Eingangssadmittanz des Fahrzeugs oberhalb von 120 Hz einen positiven Realteil haben muss. Dies wird ebenfalls in den Technischen Netzzuschlussbedingungen der DB Energie GmbH [53] gefordert.

In den Technischen Netzzuschlussbedingungen der DB Energie GmbH [53] wird gefordert, dass Leistungsschalter oder der entsprechend ausgelegte Lasttrennschalter bei einem Fehler in der Anlage (z. B. Kurzschluss) abschalten und die Anlage von der Fahrleitung trennen kann. Für Fahrzeuge am Fahrleitungsnetz gelten vereinfachte Anforderungen, siehe [17]. Falls der Leistungsschalter des Fahrzeugs aufgrund seiner Auslegung die maximal aus dem Fahrleitungsnetz gespeisten Kurzschlussströme z. B. bei Fehlern im Transformator nicht unterbrechen kann, muss die Auslösung des Leistungsschalters bei einem Kurzschluss in der Oberspannungsseite verzögert werden. Bei Kurzschlägen in der Unterspannungsseite soll der Leistungsschalter allein auslösen. Grundsätzlich sind auch die Festlegungen entsprechend der DB-Konzernrichtlinie DB RiL 955.0102 [62] „Netzschutztechnik“ zu berücksichtigen. Darin sind u. a. Festlegungen zum Transformatorschutz und zum Fahrleitungsschutz enthalten. Gemäß [32] ist ein Schutz- und Schalterversagerschutzkonzept zu erstellen und mit DB Energie GmbH abzustimmen.

## 8.6 Einfluss von Umrichtern auf die Netzstabilität der 15-kV-Fahrleitungsebene

Der seit mehr als 25 Jahren stattfindende Wechsel des Erzeugerparks für die Energieeinspeisung sowohl in die Ebene 110 kV, 16,7 Hz als auch in die 15-kV-Ebene der Bahnenergieversorgung durch den Einsatz von Umrichtern hat Fragestellungen zur Netzstabilität und der Netzregelung hervorgebracht. Das betrifft die Koexistenz und das Zusammenwirken von rotierenden elektrischen Maschinen (Umformern) mit statischen Umrichtern, die gemeinsam jedoch örtlich getrennt phasensynchron das durchverbundene 15-kV-Fahrleitungsnetz mit Bahnenergie versorgen. Siehe hierzu auch Abbildung 13. Hierzu hat die DB Energie GmbH in 2016/2017 eine Untersuchung in Auftrag gegeben in der in einem ersten Teil [63] eine messtechnische Ermittlung der frequenzabhängigen Netzimpedanzen und der Oberschwingungsverhältnisse im Bereich ausgewählter Umrichter durchgeführt wurde. In einem zweiten Teil [64] wurde eine Berechnung und Bewertung der frequenzabhängigen Netzimpedanzen und der Netzresonanzen vorgenommen. In der Zusammenfassung in Teil 1 sind bezüglich des Einflusses der Umrichter auf die Oberschwingungen keine oder nur geringfügig signifikante Oberschwingungseinträge in das 15 kV-Bahnstromnetz festgestellt worden. Anhand der Ergebnisse in Teil 2 ist in den Empfehlungen als Schlussfolgerung vermerkt, dass es keinen Anlass gibt, die Grenzfrequenz von 120 Hz anzupassen oder die Zulassungsbedingungen der Umrichter im Hinblick auf mögliche Resonanzanregungen bei Frequenzen kleiner 120 Hz anzupassen.

Ebenfalls in 2016 wurde in einer wissenschaftlichen Untersuchung mit Veröffentlichung, siehe [65] und [66] die Netzstabilität und Netzsimulation im Zeitbereich für umrichtergespeiste Hochspannungs- und Mittelspannungs-Netze der DB untersucht. Als Zwischenfazit wurde in [65] festgestellt, dass u. a. noch Forschungsbedarf an den Themen „Netzführung und Netzregelung“ und der „Schwingungsneigung des Bahnstromnetzes in Bereichen oberhalb der Nennfrequenz“ besteht. In [66] wurde die erstellte Simulationsumgebung zur Untersuchung der Netzregelung mit Umrichtern und zum Thema Schutz präsentiert. Weitere Untersuchungen zu diesen Themen sind erforderlich, zumal der Anteil der Bahnenergieversorgung mit Umrichtern weiter zunimmt. Eine Integration von einer großen Zahl von PV-Anlagen in das Fahrleitungsnetz, mit einer entsprechend hohen Summenleistung, in der Fläche verteilt wird weitere Untersuchungen zu den genannten Themen notwendig machen.

## 8.7 Steuerung und Betriebsführung

Die Zes ist die Schaltbefehlsstelle für einen bestimmten Bereich des 15-kV-Fahrleitungsnetzes. Sie steuert und überwacht das 15-kV-Fahrleitungsnetz inkl. Nebenverbraucher und Einspeisungen in diesem Bereich. Die Zes ist damit auch als Befehls- und Meldestelle für zukünftige PV-Anlagen, die direkt in die Fahrleitung einspeisen. Die grundsätzlichen Vorgaben zum Betrieb des Fahrleitungsnetzes sind in der DB-Konzernrichtlinie DB RiL 462.0102 [67] festgelegt. Der Steuer- und Meldeumfang für die verschiedenen Betriebszustände (z. B. Statusmeldungen, wie außer Betrieb, betriebsbereit, in Betrieb, anliegende Fehler und Ausfälle) muss detailliert in einer Planung ausgearbeitet bzw. definiert werden. Dabei sind die in der DB-Konzernrichtlinie DB RiL 955.0103 [68] und 955.0104 [69] festgelegten Anforderungen an die Stationsleittechnik und Kommunikationstechnik zu berücksichtigen. Zumindest maximal zulässige Einspeise-Leistung sollte von der Zes zusätzlich vorgegeben werden können. Gegebenenfalls ist es auch sinnvoll, Blindleistung (kapazitiv oder induktiv) einzuspeisen. Die Vorgaben sollten ebenfalls durch die Zes erfolgen.

Die PV-Anlage muss auch vor Ort außer Betrieb und in Betrieb genommen werden können. Wesentliche Steuerungsvorgaben müssen vor Ort gegeben werden können. Die Außerbetriebnahme beinhaltet die Freischaltung an den verschiedenen Stellen der Anlage.

## 8.8 Regulatorische Anforderungen

Nach dem Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG) [70] ist DB Energie GmbH als Netzbetreiber für den sicheren Betrieb der Energieversorgung über die Fahrleitung zuständig. Zur Sicherstellung des sicheren Betriebes fordert sie daher die Einhaltung der von ihr erstellten Lastenhefte [53], die von DB Energie GmbH bezogen werden können.

Die in und an der Schieneninfrastruktur implementierten Anlagen müssen die im Bahnbereich relevanten und gültigen Normen einhalten. Sie müssen den vorherrschenden Umgebungsbedingen standhalten, sodass sie dauerhaft und zuverlässig ihre spezifizierte Aufgabe erfüllen und kompatibel mit den bestehenden Anlagen innerhalb und außerhalb des Bahnbereichs sein. Die Anforderungen sind generell in Kap. 7 und in diesem Kap. 8 genannt.

Darüber hinaus müssen sie als Erzeugungsanlagen am Fahrleitungsnetz nach Verordnung über die Erteilung von Inbetriebnahmegenehmigungen (EIGV) für das Eisenbahnsystem (Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung – EIGV) [71], eine Inbetriebnahmegenehmigung erhalten, die durch das Eisenbahnministerium nach Prüfung erteilt wird. Eine Untersuchung zur Sicherheit der Anlage nach den in der Durchführungsverordnung (EU) 402/2013 [72] festgelegten Sicherheitsmethode ist notwendig.

DB Energie GmbH fordert des Weiteren eine gemeinsame Abnahme des Regelungssystems der PV-Anlage [53]. Dabei wird die Einhaltung aller Anforderungen geprüft, eine entsprechende Prüfspezifikation ist zu erstellen.

Neben den bahnspezifischen Regularien gelten auch die allgemeinen gesetzlichen Vorschriften des EEG [11] und des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG), [73]).

# 9 Geeignete PV-Systeme sowie mögliche Hersteller und Entwickler

Wie in den vorherigen Punkten dargelegt, sind die Anforderungen an PV-Systeme, je nach Anwendungsfall, sehr unterschiedlich. Typischerweise werden PV-Anlagen nicht als Komplettsysteme angeboten, sondern spezifisch für ein Projekt aus verschiedenen Komponenten zusammengestellt. Daher werden nachfolgend die Hauptgruppen bzw. Hauptkomponenten in Bezug auf die Eignung getrennt betrachtet.

## 9.1 PV-Generator

### 9.1.1 PV-Module

Es gibt eine Vielzahl von Herstellern von bauartgeprüften PV-Modulen. Für den größten Teil der Anwendungen in der Schieneninfrastruktur werden mehrere Modul-Typen von verschiedenen Herstellern zur Verfügung stehen. Insbesondere für die jeweilige Anwendung zu prüfen wäre die mechanische Festigkeit der Module in Verbindung mit der verwendeten Unterkonstruktion. Hier sind gegebenenfalls je nach Anwendungsfall Anpassungen an bestehenden Konstruktionen notwendig.

Beispielhaft seien die folgenden Hersteller genannt:

- Jinko Solar
- Trina Solar
- JA Solar
- Canadian Solar
- Hanwha Q Cells
- GLC System Integration Technology
- Lerri Solar Technology
- Yingli Green Energy
- First Solar
- Shungfeng Photovoltaik International
- Risen Energy
- Telesun
- Longi
- Kyocera
- Bosch Solar Energy
- Aleo Solar

Das Vorgenannte trifft nicht auf den Anwendungsfall Installation am oder im Gleisbett zu. Hier sind spezielle Module zu verwenden. Bekannte Hersteller sind:

- Bankset Energy
- Greenrail

### 9.1.2 Unterkonstruktionen

Für Unterkonstruktionen können bei vielen Anwendungen in der Schieneninfrastruktur die Komponenten verwendet werden, die auch für konventionelle PV-Anlagen zum Einsatz kommen. Auch hier ist für

die jeweilige Anwendung die mechanische Festigkeit in Verbindung mit den verwendeten Modulen zu prüfen. Konstruktive Anpassungen sind vergleichsweise einfach möglich.

Anbieter für Unterkonstruktionen für Freifeldanlagen, Fassaden und Dachanlagen sind beispielsweise:

- Schletter
- K2 Systems
- IBC Solar
- TRITEC
- Novotegra

Anbieter für Unterkonstruktionen zur Befestigung an LSW:

- Kohlhauer Lärmschutzsystem

### 9.1.3 DC-Leitungen

Konventionelle Leitungen können auch für PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur verwendet werden. Wichtig ist die Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen, Verlegeart, Isolation und Strombelastung.

Mögliche Hersteller sind neben vielen anderen beispielsweise:

- Huber & Suhner
- Leoni
- Nexans
- Lapp

## 9.2 Umwandlungs- und Transformierungselement

### 9.2.1 Wechselrichter

In Bezug auf den Wechselrichter sind kaum geeignete Systeme für das DB-Netz mit der Frequenz 16,7 Hz am Markt verfügbar. Wechselrichter größerer Leistungsklassen sind fast ausschließlich als zum Drehstromnetz parallele Systeme konzipiert.

Im Folgenden sind einige Hersteller von PV-Wechselrichtern für die Einspeisung in das 50-Hz-Drehstrom- oder -Wechselstromnetz genannt:

- SMA
- Huawei
- Sungrow
- Bofinglioli
- Ingeteam
- Kostal
- SolarEdge
- AEG Power Solutions
- KACO new energy
- Enphase
- Growatt
- SoltarMax
- Sofar Solar
- Solax Power

- Schneider Electric

Für die Einspeisung in die Fahrleitung der Bahn sind die Umrichter dieser Hersteller nicht direkt geeignet. Entsprechende Anpassentwicklungen müssten hier erfolgen.

Für die Direkteinspeisung in die Fahrleitung ist lediglich die Firma Fronius bekannt mit einer Anwendung in der Schweiz [20] und zwei weiteren Pilotprojekten. Der modifizierte Gerätetyp von Fronius, ist nach Auskunft des Herstellers nicht mehr verfügbar. Nähere Informationen zu den genauen technischen Details und der Modifikation konnten nicht erlangt werden.

Anbieter von bahnspezifischen Umrichtern mit Einspeisung in die Fahrleitung sind vor allem:

- ABB
- Siemens (siehe z. B. [48])
- GE

Die Umrichter dieser Hersteller müssten für die Anwendung als PV-Wechselrichter angepasst werden.

## 9.2.2 Transformator

Für die Anwendung zur Einspeisung ins Landesnetz (drei Phasen, 50 Hz) seien beispielhaft die folgenden Hersteller genannt.

- Siemens
- ABB
- EMZ
- Schneider Electric
- Arteche
- Tesar

Für Bahnanwendungen (eine Phase, 16,7 Hz) sind vor allem die folgenden Anbieter im deutschen Raum bekannt.

- ABB
- Ritz
- Siemens
- Smith (Hersteller aus Großbritannien (GB))

## 9.2.3 Kabel- und Leitungssysteme AC

Die in konventionellen PV-Anlagen eingesetzten AC Kabel- und Leitungssysteme sind weitestgehend mit anderen elektrischen Installationen am öffentlichen Netz vergleichbar. Dies gilt für den Niederspannungs- als auch den Mittel-/Hochspannungsbereich. Somit stehen Standardsysteme bereit, die bei den PV-Installationen eingesetzt werden können.

Grundsätzlich unterschieden werden muss hier zwischen den beiden Netzformen, dem öffentlichen Stromnetz (dreiphasig, 50 Hz) und dem Bahnstromnetz (einphasig, 16,7 Hz). Bei der Direktanbindung an die Fahrleitung müssen geeignete Kabel- und Leitungssysteme für das Bahnstromnetz eingesetzt werden. Dies sind ebenfalls Standardanwendungen und es stehen geeignete Systeme zur Verfügung.

Kabelhersteller sind z. B.:

- Nexans
- Leoni

- Huber&Suhner

Anbieter von Unterverteilungen, Kompaktstationen, Schalteinheiten, sowohl für Anwendungen drei Phasen, 50 Hz als auch 1 Phase, 16,7 Hz sind z. B.

- Siemens
- ABB
- Schneider Electric

### 9.2.4 Schaltgeräte

Die für die Direkteinspeisung verwendeten Schaltgeräte müssen den besonderen Anforderungen der Bahnanwendungen gerecht werden.

Geeignete und in Deutschland übliche Leistungsschalter an der Fahrleitung sind z. B.

- Schneider Electric, [74]. Geeignete Typen z. B.: VXA 5016/17, VXA 6316/17, VXA 6320/17.
- ABB, geeigneter Typ z. B. GSH 5960.1 [75].
- Siemens, [76]. Geeignete Typen z. B.: 3AH4 754-4 bis 3AH4 757-6.

Fahrleitungs-Trennschalter sind beispielsweise bei folgenden Herstellern zu beziehen:

- Driescher, z. B. 1-pol. Freiluft-Lasttrennschalter vom FLa 15/97-1B; Un 15 kV
- Siemens, z. B. Trennschalter bis 25 kV AC Sicat 8WL6144
- RPS, z. B. Masttrennschalter ohne EK vom Typ: 3EGF021021 oder 3EGF013306
- Rauscher & Stöcklin, z. B. Bauformen FHF B2 15/5 oder FHF B3 15/5

### 9.2.5 Weitere Komponenten

Weitere Komponenten zum Anschluss an die Fahrleitung, wie z. B. Überspannungsableiter, Kabelendverschluss, Verbindungsklemme an die Fahrleitung, Verbindungsklemme an die Schiene sind Standard-Komponenten und am Markt verfügbar.

## 9.3 Steuerungs- und Überwachungssysteme

Die DC-seitige Steuerung zum Hochfahren der Systeme bzw. Abschalten der Systeme, in Abhängigkeit der Einstrahlungsenergie, übernehmen die Wechselrichter. Sie stellen auch den optimalen Arbeitspunkt bei unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen ein (MPP-Tracking). Üblicherweise sind die Wechselrichter auch mit einem Monitoringsystem zur Parameterüberwachung ausgestattet. Diese standardmäßigen Systeme bzw. Funktionalitäten können auch bei der Verwendung in der Bahninfrastruktur verwendet werden.

Anders sieht es bei den Systemen zur Netzüberwachung als auch Systemen zur Einstellung der erforderlichen Netzparameter aus. Auch diese Systeme sind, zumindest zu einem gewissen Teil, üblicherweise in den Wechselrichtereinheiten integriert. Darüber hinaus kommen auch Steuer- und Überwachungssysteme zum Einsatz, die in weiteren Einheiten z. B. in den Unter- oder Hauptverteilungen integriert sein können. Zu diesen Systemen können Netzüberwachung, Na-Schutz, Isolationsüberwachung und Fernsteuereinheiten gehören. All diese Systeme sind für die Anwendung parallel in öffentlichen Netzen ausgelegt und nach den relevanten Bestimmungen konzipiert. Hierzu zählen BDWE und VDE-RiL. Erzeugungsanlagen mit einer Leistung  $\geq 135$  kW am öffentlichen Netz müssen ein Anlagenzertifikat, welches auf einem Einheitenzertifikat und eine Konformitätserklärung basiert, vorweisen. Zertifikate (Einheiten-,

Komponenten- und Anlagenzertifikate sind auf Basis der neuen VDE-RiL zu erstellen (VDE-AR-N 4105 [1], VDE-AR-N 4110 [77] und VDE-AR-N 4120 [78]). Mit Hilfe der Anlagenzertifizierung weisen Planer beziehungsweise Betreiber von Erzeugungsanlagen nach, dass die Elektroplanung netzkonform und entsprechend der bestehenden gesetzlichen Forderungen ist. Analog dazu ist es erforderlich, dass Erzeugeranlagen die in das 15-kV-Fahrleitungsnetz einspeisen, die technischen Vorgaben und Anforderungen des Energielieferanten der DB AG, der DB Energie GmbH erfüllen. Hierzu existieren neben den technischen Netzzugangsbedingungen und den Konzernrichtlinien DB RiL 954, 955 und 997 verschiedene Lastenhefte für die unterschiedlichen Ausrüstungsbestandteile wie z. B. Primärtechnik, Schutz- und Steuerungstechnik, Eigenbedarf, Kommunikationsanlagen/-einrichtungen usw.

Somit müssen an den zuvor genannten Ausrüstungen umfangreiche Anpassungen vorgenommen bzw. andere oder weitere Komponenten eingesetzt werden. Die Komponenten zur Direkteinspeisung werden im Kapitel 9 genauer betrachtet.

## 9.4 Übersicht geeigneter PV-Systeme in Abhängigkeit der Anwendungsfälle innerhalb der Schieneninfrastruktur

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der Verfügbarkeit der geeigneten PV-System-Komponenten für die verschiedenen Anwendungsklassen. Diese Bewertung erfolgte aufgrund der Rechercheergebnisse und der Einschätzung der Experten.

TABELLE 7: VERFÜGBARKEIT GEEIGNETER HAUPTKOMPONENTEN IN ABHÄNGIGKEIT DER VERSCHIEDENEN ANWENDUNGSFÄLLE

Hauptkomponente	Gleisbett	LSW	Lärm-schutzwall	Baulichen Einrichtungen	Neben Schienen-weg	Sonstige Installati-onsorte
PV-Module	-	+	++	++	++	0
Unterkonstruktion und Befestigungssysteme	-	0	++	+	+	0
Umwandlungs- und Transformierungs-Elemente	0	0	0	0	0	0
Kabel und Leitungen	+	++	++	++	++	+

Hauptkomponente	Gleisbett	LSW	Lärm- schutzwall	Baulichen Einrichtun- gen	Neben Schienen- weg	Sonstige Installati- onsorte
Steuerungs- und Überwachungssysteme	O	O	O	O	O	O

Bewertungsskala:

- „++“ generell verfügbar, Standardsysteme
- „+“ verfügbar, wenige Anbieter
- „O“ eingeschränkt verfügbar z. B. mit Modifikation, Spezialsysteme
- „-“ nicht verfügbar, Anpassung in Entwicklung bzw. erwartet
- „- -“ gar nicht verfügbar

# 10 Beispielhafte Erarbeitung und Auslegung möglicher PV-Systeme

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Kapiteln 5 – 10 wird eine mögliche Systemauslegung für jede identifizierte PV-Anwendungsklasse spezifiziert.

Diese exemplarisch zusammengestellten PV-Systeme dienen als Basis für die nachfolgenden Untersuchungen und Hochrechnungen zu Arbeitspunkt 2. Sie stellen für jede PV-Anwendungsklasse einen Grundbaustein im Sinne eines angestrebten modularen Konzepts mit dem Ziel der Skalierbarkeit für größere PV-Systeme bzw. mehrere PV-Systeme dar. Für die beispielhafte Auslegung der PV-Systeme wird die Verschaltung des Wechselrichters mit zweimal 15 PV-Modulen (zu 400 W) gewählt, sodass der Wechselrichter optimal genutzt ist.

Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, werden folgende Komponenten und Verschaltungen einheitlich zu allen Anwendungsklassen definiert.

TABELLE 8: EINHEITLICHE SYSTEMPARAMETER ZU ALLEN ANWENDUNGSKLASSEN

## SYSTEM PARAMETER

<b>PV MODULE:</b>	400 Wp, bzw. 100 Wp für im Gleisbett verlegte Module (für die Auslegung berücksichtigte Fläche des Moduls mit 400 Wp: ca. 1 m x 2 m)
<b>WECHSELRICHTER</b>	10 kVA
<b>MODULE PRO STRANG</b>	15 in Reihenschaltung
<b>STRÄNGE PRO WECHSELRICHTER</b>	2 in Parallelschaltung
<b>LEISTUNGSVERHÄLTNIS DC/AC</b>	1,2 (30 Module zu je 400 Wp pro Wechselrichter)

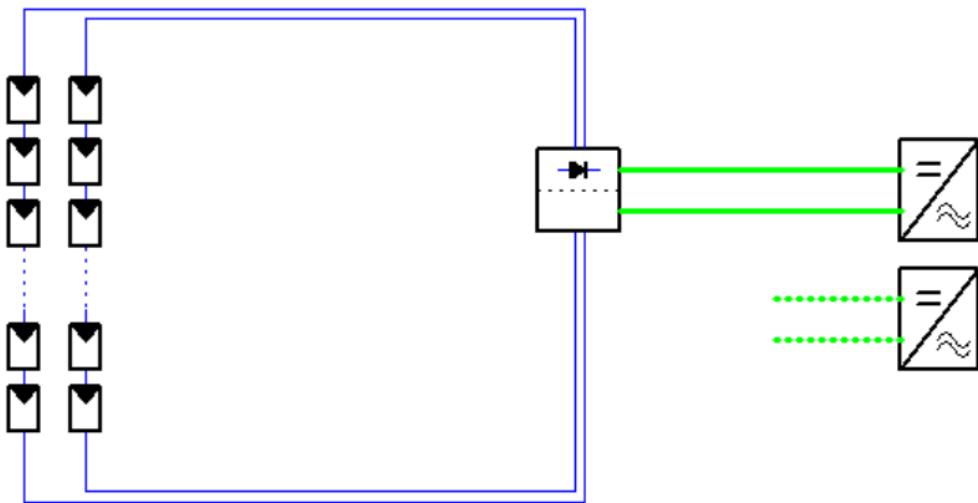


Abbildung 16: Schematische Darstellung der einheitlichen Modulverschaltung. Quelle: TÜV Rheinland

Leistungsmindernde Faktoren, wie z. B. Eigenverschattung, Verschmutzung, Temperatureinfluss oder ausrichtungsbedingte Faktoren werden hingegen spezifisch zu jeder Anwendungsklasse bestimmt. So sind z. B. bei horizontal im Gleisbett integrierten PV-Modulen höhere Verluste aufgrund einer ungünstigen Belüftungssituation und geringerem Selbstreinigungseffekt zu erwarten als bei frei im Feld aufgeständerten PV-Modulen mit optimaler Ausrichtung.

Neben der Analyse der systembedingten Unterschiede erfolgt eine Betrachtung hinsichtlich der möglichen Nutzung der verfügbaren Strecken (Längen) und Flächen. Daher beziehen sich aufgrund des modularen Konzepts die nachfolgenden Berechnungen jeweils auf einen Streckenabschnitt von ca. 100 m Länge – je nach Konfiguration liegen die gewählten Längen zwischen 100 m und 110 m – um eine optimale Skalierbarkeit und Vergleichbarkeit zu erreichen. Zudem fließen zunächst nur die meteorologischen Einflussfaktoren Sonneneinstrahlung, Umgebungstemperaturen und Windgeschwindigkeiten an einem für Deutschland exemplarischem Standort – in diesem Fall die Stadt Bonn – in die Berechnungen mit ein. Eine räumliche Unterscheidung der zu erwartenden Energieerträge je installierten Anwendungsklasse wird in Kap. 17 berücksichtigt.

## 10.1 Installation am oder im Gleisbett

Die Installation von PV-Modulen auf den Schwellen des Gleisbetts erfolgt mit reduzierten Modulleistungsklassen zu je 100 Wp. Die Modulmaße betragen 1,35 m x 0,375 m und der Abstand von Vorderkante zu Vorderkante beläuft sich bedingt durch den Schwellenabstand auf 0,6 m. Unter Annahme eines zweigleisigen Streckenabschnitts lassen sich folglich 360 Module auf 108 m Bahnstrecke installieren, die eine Gesamtleistung von 36 kWp ergeben und jährlich ca. 32 MWh Energie bei durchschnittlicher Sonneneinstrahlung in Deutschland liefern.

TABELLE 9: SPEZIFISCHE AUSLEGUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 1

**SYSTEM PARAMETER**

<b>AUSRICHTUNG</b>	Horizontale Installation ( $0^\circ$ Neigung)
<b>ANZAHL PV MODULE JE 100 W</b>	360
<b>ANZAHL WECHSELRICHTER</b>	3
<b>INSTALLIERTE MODULLEISTUNG</b>	36 kWp

TABELLE 10: SPEZIFISCHE BERECHNUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 1

**ERRECHNETE ENERGIEERTRÄGE**

<b>PRODUZIERTER JAHRESERTRAG</b>	31883 kWh
<b>SPEZIFISCHER JAHRESERTRAG</b>	886 kWh/kWp

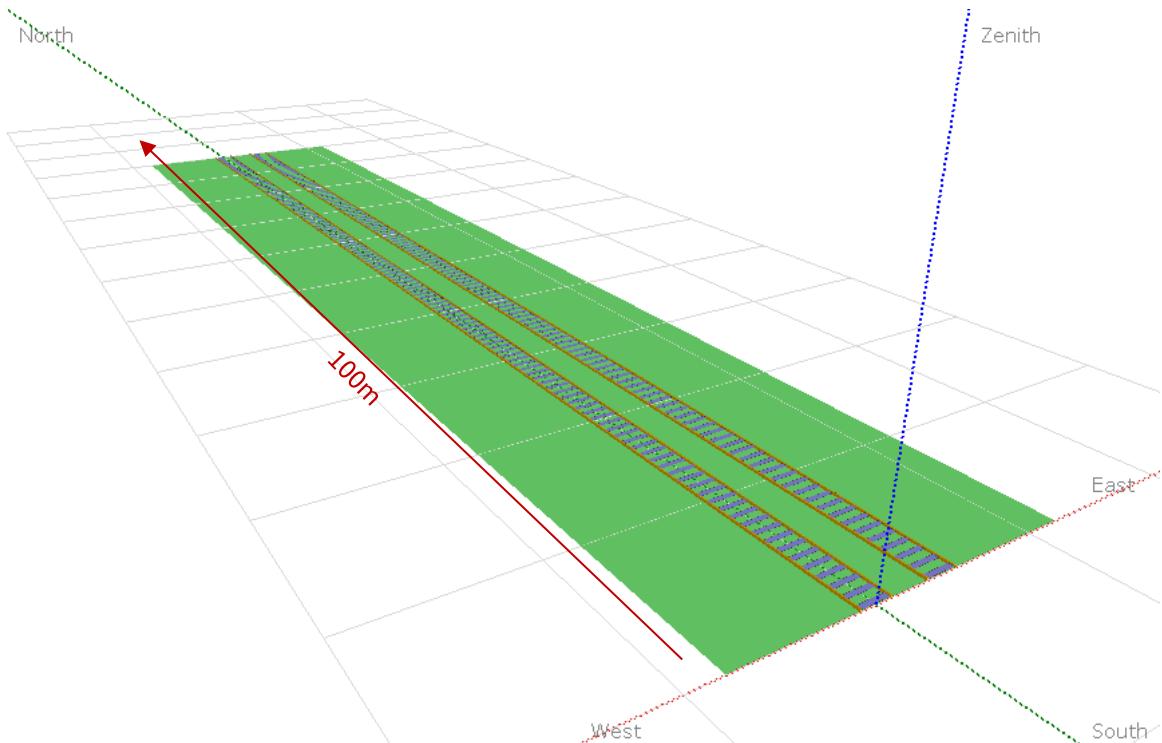


Abbildung 17: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 1. Quelle: TÜV Rheinland

## 10.2 Installation an oder in einer LSW

In der auf beiden Seiten der Bahnstrecke errichteten Lärmschutzwände werden bifaziale Module vertikal im Querformat integriert. Die Gesamthöhe der LSW beträgt 5 m, wovon die Wand im oberen Bereich zu 2 m aus integrierten Modulen besteht. Durch die Nord-Süd Ausrichtung des Streckenabschnitts orientieren sich die Module in Ost-West-Richtung. Es lassen sich folglich 210 Module auf 105 m Bahnstrecke installieren, die eine Gesamtleistung von 84 kWp ergeben und jährlich ca. 89 MWh Energie liefern.

TABELLE 11: SPEZIFISCHE AUSLEGUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 2

### SYSTEM PARAMETER

<b>AUSRICHTUNG</b>	Senkrechte Installation (90° Neigung), Ost-West
<b>ANZAHL PV MODULE JE 400 W</b>	210
<b>ANZAHL WECHSELRICHTER</b>	7
<b>INSTALLIERTE MODULLEISTUNG</b>	84 kWp

TABELLE 12: SPEZIFISCHE BERECHNUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 2

### ERRECHNETE ENERGIEERTRÄGE

<b>PRODUZIERTER JAHRESERTRAG</b>	89420 kWh
<b>SPEZIFISCHER JAHRESERTRAG</b>	1065 kWh/kWp

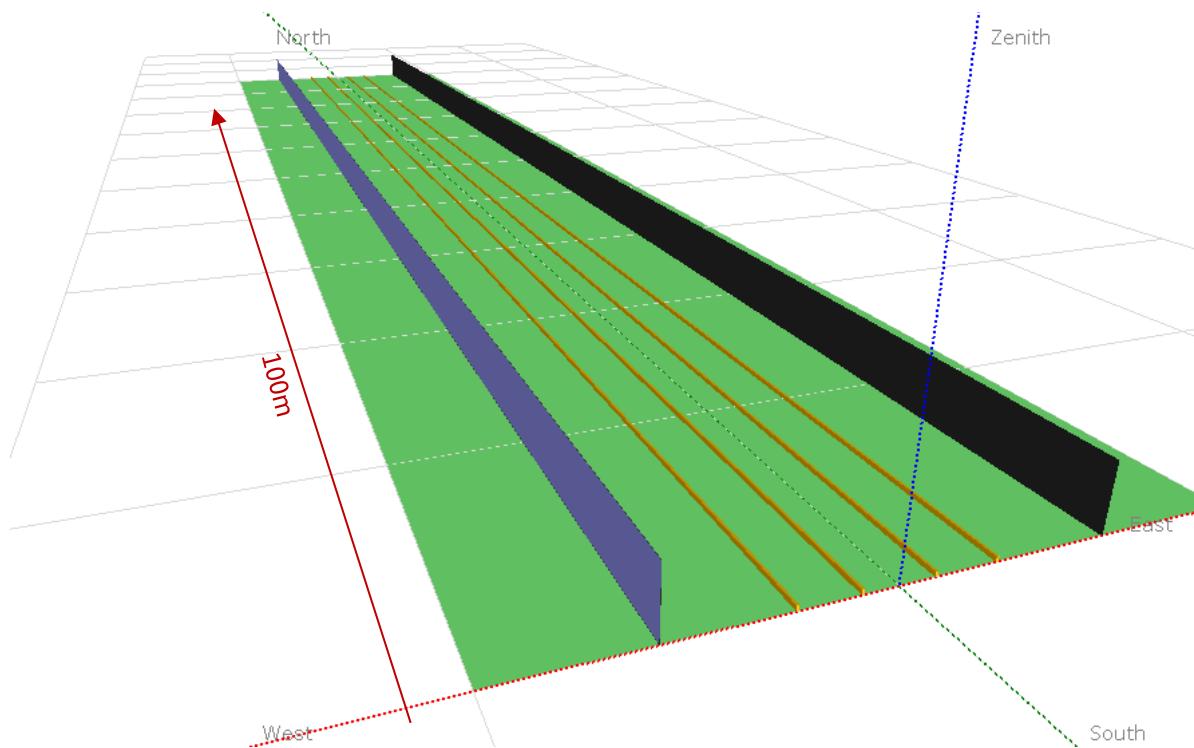


Abbildung 18: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 2. Quelle: TÜV Rheinland

## 10.3 Installation an oder auf einem Lärmschutzwall

Die Module werden in sechs Lagen übereinander an den zwei parallel zur Bahnstrecke verlaufenden Lärmschutzwällen installiert. In dieser Berechnung wurde die Belegung der nach außen gerichteten Böschungen mit PV-Modulen berücksichtigt. Die Höhe der Wälle beträgt 4 m mit einer Neigung von 35° bei einer Querschnittsbreite von 15 m. Die Bahnstrecke verläuft in Nord-Süd-Richtung mit einer resultierenden Ost-West-Orientierung des PV-Systems. Es lassen sich folglich 600 Module auf 100 m Bahnstrecke installieren, die eine Gesamtleistung von 240 kWp ergeben und jährlich ca. 207 MWh Energie liefern.

TABELLE 13: SPEZIFISCHE AUSLEGUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 3

### SYSTEM PARAMETER

<b>AUSRICHTUNG</b>	35° Neigung, Ost-West
<b>ANZAHL PV MODULE JE 400 W</b>	600
<b>ANZAHL WECHSELRICHTER</b>	20
<b>INSTALLIERTE MODULLEISTUNG</b>	240 kWp

TABELLE 14: SPEZIFISCHE BERECHNUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 3

## ERRECHNETE ENERGIEERTRÄGE

PRODUZIERTER JAHRESERTRAG	207302 kWh
SPEZIFISCHER JAHRESERTRAG	864 kWh/kWp

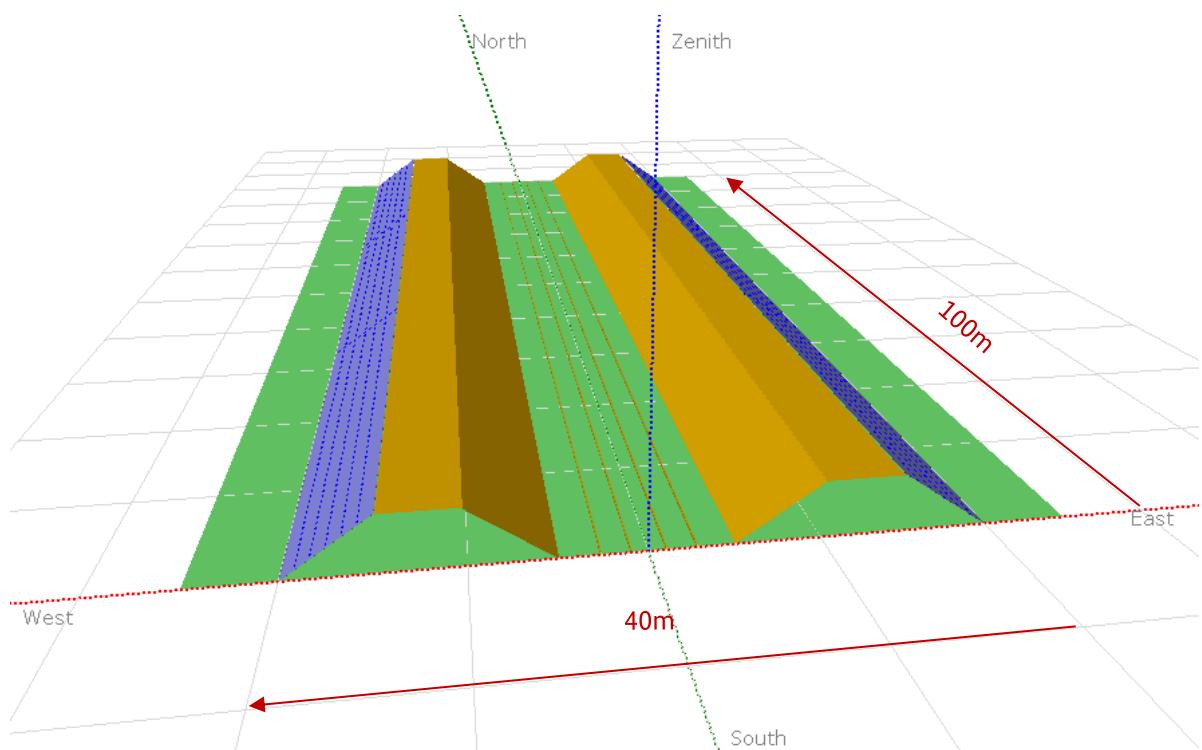


Abbildung 19: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 3. Quelle: TÜV Rheinland

## 10.4 Installation an oder in baulichen ahneinrichtungen

Die Installation der Aufdachanlage erfolgt auf zwei parallel errichteten Hallen mit Satteldach und 15° Dachneigung. Das Grundstück zu den Hallen hat eine Länge von 100 m und eine Breite von 40 m. Die Module sind dachparallel nach Ost-West orientiert montiert und die empfohlenen Randabstände zu Traufe, First und Ortgang berücksichtigt. Es lassen sich folglich 1200 Module auf ca. 0,4 ha Grundstück installieren, die eine Gesamtleistung von 480 kWp ergeben und jährlich ca. 433 MWh Energie liefern.

TABELLE 15: SPEZIFISCHE AUSLEGUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 4

**SYSTEM PARAMETER**

<b>AUSRICHTUNG</b>	15° Neigung, Ost-West
<b>ANZAHL PV MODULE JE 400 W</b>	1200
<b>ANZAHL WECHSELRICHTER</b>	40
<b>INSTALLIERTE MODULLEISTUNG</b>	480 kWp

TABELLE 16: SPEZIFISCHE BERECHNUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 4

**ERRECHNETE ENERGIEERTRÄGE**

<b>PRODUZIERTER JAHRESERTRAG</b>	433185 kWh
<b>SPEZIFISCHER JAHRESERTRAG</b>	902 kWh/kWp

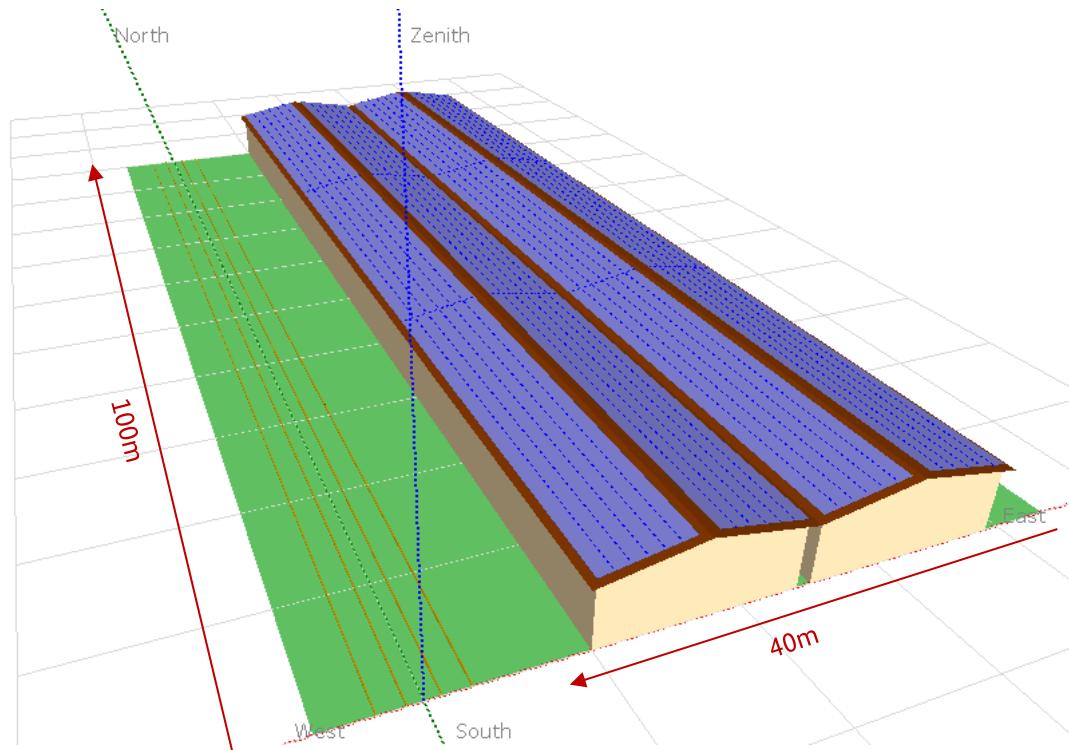


Abbildung 20: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 4. Quelle: TÜV Rheinland

## 10.5 Installation neben dem Schienenweg

Die Freifeldanlage orientiert sich an einer optimierten Auslegung mit 20° Neigung, Südausrichtung und 8,6 m Reihenabstand. Das Grundstück zur Anlage hat eine Länge und Breite von je 100 m. Es lassen sich folglich 1980 Module auf ca. 1 ha Grundstück installieren, die eine Gesamtleistung von 792 kWp ergeben und jährlich ca. 833 MWh Energie liefern.

TABELLE 17: SPEZIFISCHE AUSLEGUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 5

### SYSTEM PARAMETER

<b>AUSRICHTUNG</b>	20° Neigung, Süd
<b>ANZAHL PV MODULE JE 400 W</b>	1980
<b>ANZAHL WECHSELRICHTER</b>	66
<b>INSTALLIERTE MODULLEISTUNG</b>	792 kWp

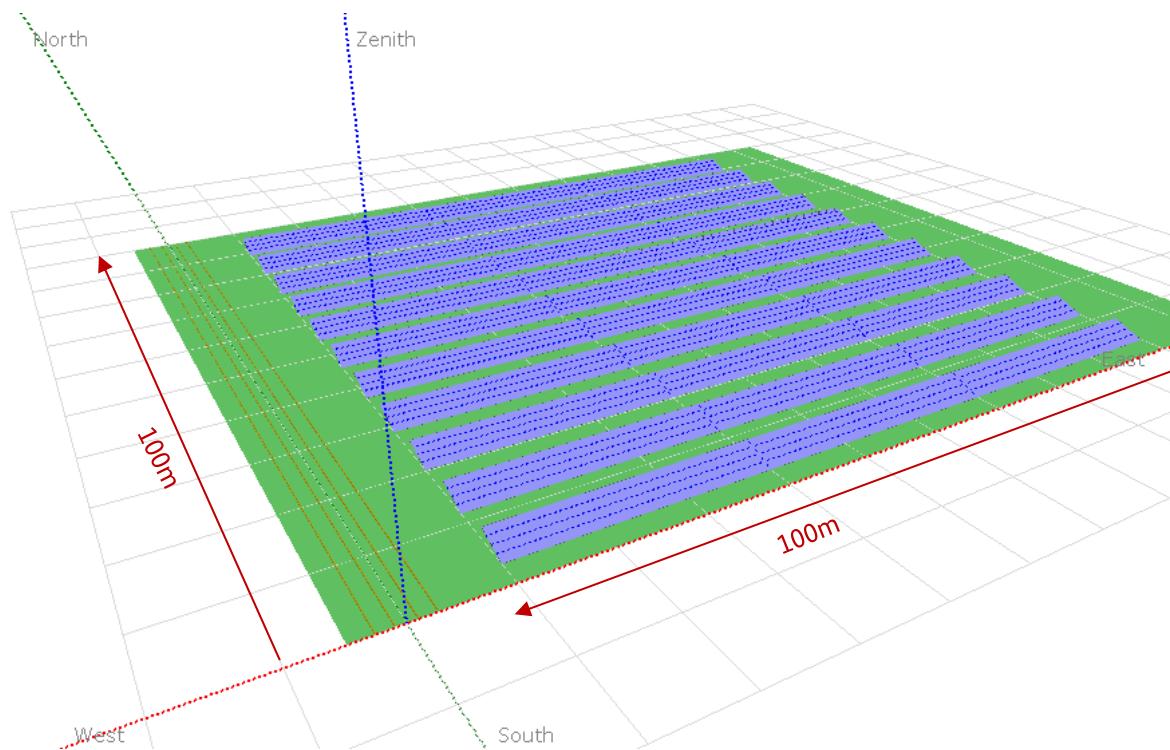


Abbildung 21: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 5. Quelle: TÜV Rheinland

TABELLE 18: SPEZIFISCHE BERECHNUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 5

**ERRECHNETE ENERGIEERTRÄGE**

<b>PRODUZIERTER JAHRESERTRAG</b>	833016 kWh
<b>SPEZIFISCHER JAHRESERTRAG</b>	1052 kWh/kWp

## 10.6 Installation auf dem Fahrzeugdach

Die Module werden zweireihig auf dem Fahrzeugdach mit einer geringen Neigung von 5° installiert. Die Referenzstrecke von 100 m entspricht in etwa der halben Länge eines durchschnittlichen Fernverkehrs-zugs. Auf diesem lassen sich folglich mit 180 die doppelte Menge der Module installieren, die eine Ge-samtleistung von 72 kWp ergeben und jährlich ca. 65 MWh Energie liefern.

TABELLE 19: SPEZIFISCHE BERECHNUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 6

**ERRECHNETE ENERGIEERTRÄGE**

<b>PRODUZIERTER JAHRESERTRAG</b>	32693 kWh (halbe Zuglänge)
<b>SPEZIFISCHER JAHRESERTRAG</b>	908 kWh/kWp

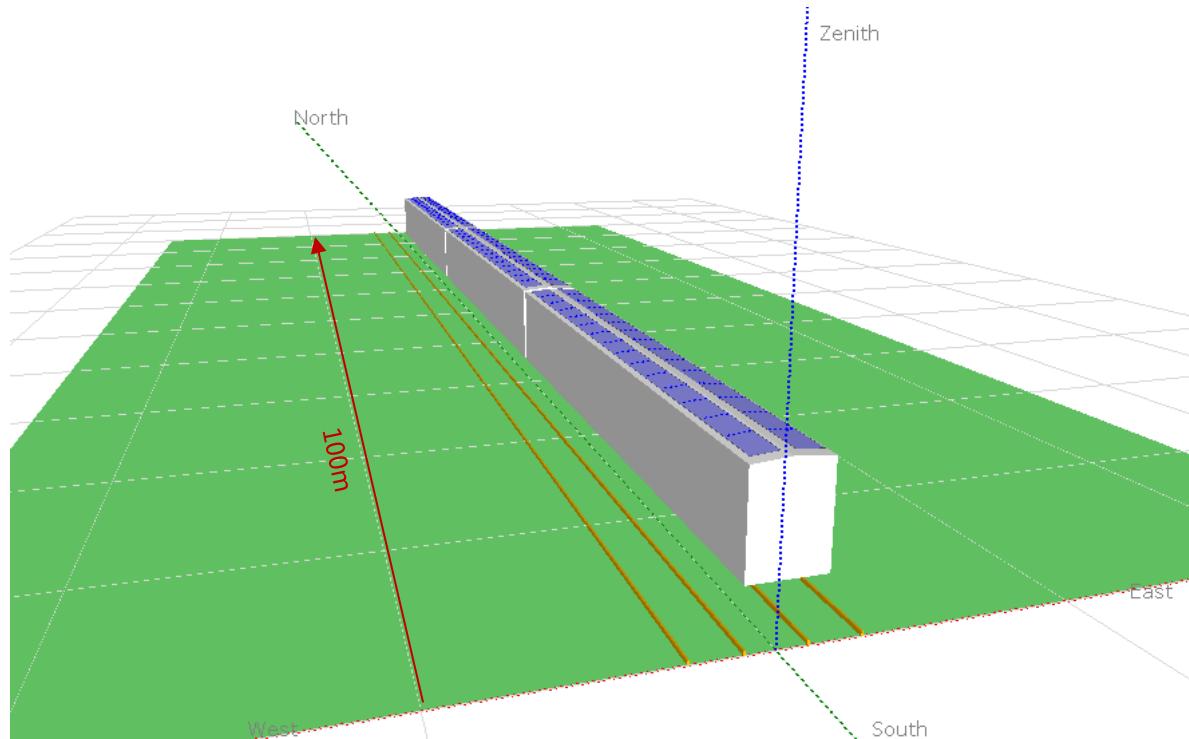


Abbildung 22: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 6. Quelle: TÜV Rheinland

TABELLE 20: SPEZIFISCHE AUSLEGUNG ZU ANWENDUNGSKLASSE 6

**SYSTEM PARAMETER**

<b>AUSRICHTUNG</b>	5° Neigung, Ost-West
<b>ANZAHL PV MODULE JE 400 W</b>	90 (halbe Zuglänge)
<b>ANZAHL WECHSELRICHTER</b>	3 (halbe Zuglänge)
<b>INSTALLIERTE MODULLEISTUNG</b>	36 kWp (halbe Zuglänge)

## 10.7 Vergleich der Anwendungsklassen

Die sechs vorgestellten Anwendungsklassen werden nun neben den absoluten Erträgen über die folgenden drei spezifischen Kenngrößen bezogen auf ein Produktionsjahr verglichen und bewertet:

- a) leistungsspezifischer Energieertrag in kWh/kWp
- b) längenspezifischer Energieertrag in kWh/km
- c) und flächenspezifischer Energieertrag in MWh/ha

TABELLE 21: VERGLEICH DER ANWENDUNGSKLASSEN, AK6: \*KOMPLETTER FERNVERKEHRSZUG MIT 200 M LÄNGE

AK	ANWENDUNGS-KLASSE	JAHRES-ERTRAG [MWH]	LEISTUNGS-ERTRAG [KWH/KWP]	LÄNGEN-ERTRAG [KWH/KM]	FLÄCHEN-ERTRAG [MWH/HA]
1	Gleisintegriert	32	886	32	-
2	LSW	89	1065	89	-
3	Lärmschutzwall	207	864	207	-
4	Gebäude	433	902	-	1083
5	Freifeld	833	1052	-	833
6	Fahrzeugdach*	65	908	-	-

Während sich bei den ersten drei Anwendungsklassen die Streckenlänge als modulare Einheit definiert lässt, stellen für Gebäude und Freifelder die verfügbare Grundfläche die maßgebende Einheit dar. Folglich sind längen- und flächenspezifische Erträge nicht bei allen Anwendungsklassen vergleichbar. Des

Weiteren wurde die Ergebnisse des Fahrzeugsdachs auf eine komplette Länge eines Fernverkehrszuges übertragen, um eine bessere Skalierbarkeit zu erreichen.

Es zeigt sich, dass der absolute Gesamtjahresertrag von Anwendungsklasse 1 – 5 stetig ansteigt, was sich bei den Beispielen mit gleichzeitig ansteigenden Installationsflächen erklären lässt. Betrachtet man die auf die installierte Leistung bezogenen Erträge, befinden sich die LSW, bedingt durch die beidseitige Nutzung der Module (bifazial) und das Freifeld, aufgrund der optimierten Ausrichtung an vorderer Stelle. Der spezifische Ertrag pro Streckenabschnitt wird dominiert durch den Lärmschutzwand mit der LSW auf Platz 2, die weniger als die Hälfte des Walls liefert. Abgeschlagen auf dem 3. Platz, sind bei der gleisintegrierten Anwendungsklasse im Vergleich zum Wall nur in etwa 15 % Ertrag zu erwarten. Der flächenbezogene Energieertrag fällt für Aufdachanlagen ca. 23 % besser aus als für Freifeldanlagen, jedoch müssen die höheren Installationsmengen und die damit verbundenen Kosten für eine abschließende Bewertung berücksichtigt werden.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Ergebnisse relativ zueinander mit jeweils dem besten Ergebnis pro Kategorie als Referenz.

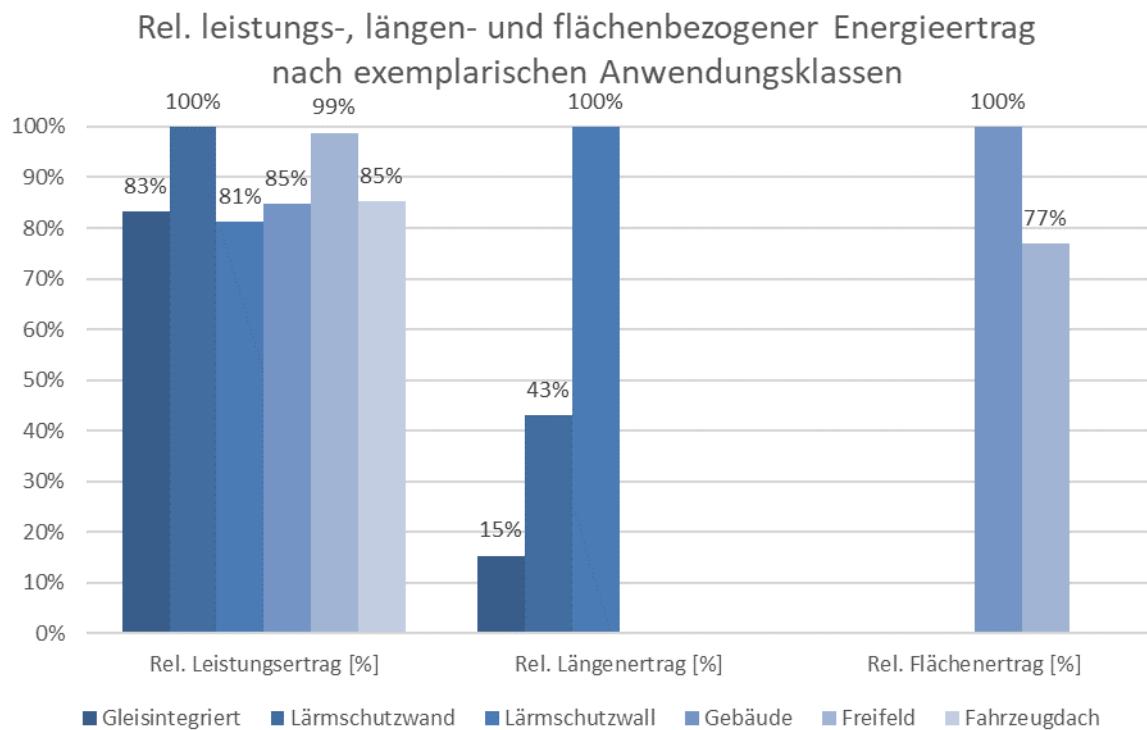


Abbildung 23: Relativer leistungs-, längen- und flächenbezogener Energieertrag nach exemplarischen Anwendungsklassen; höchstes Ergebnis pro Kategorie ergibt 100 %. Quelle: TÜV Rheinland.

# 11 Abschätzung der Kosten für die Basis-Systeme

Im Folgenden wird eine Abschätzung der LCOE bei der Errichtung von PV-Anlagen an und in der Schienennetzinfrastruktur vorgenommen.

Es wird erwartet, dass die Installation der PV-Anlage im unmittelbaren Bahnbereich im Allgemeinen aufwändiger ist als in anderen Bereichen, da z. B. besondere Sicherheitsanforderungen bestehen und die Arbeiten teilweise im laufenden Betrieb durchgeführt werden müssen. Auch für die Systeme selbst ist überwiegend von höheren Kosten gegenüber sonstigen Anlagen auszugehen. Diese Unterschiede sind jedoch stark anwendungsfallbezogen und zusätzlich von der konkreten Situation am Installationsort abhängig.

Für eine Kostenschätzung sind bestimmte limitierende Annahmen für die Basissysteme notwendig, die einerseits eine möglichst häufig vorkommende Installationssituation widerspiegeln und andererseits eine Vergleichbarkeit zwischen den sehr verschiedenen Systemen ermöglichen sollen. In der Realität sind demgegenüber gewisse Bandbreiten aufgrund unterschiedlicher Geometrie und spezifischer Vor-Ort-Bedingungen zu erwarten.

Für die kostenintensiven Komponenten Transformator und Wechselrichter wird in der realen Anwendung nur eine größere Nenn-Einspeiseleistung (maximale Einspeiseleistung) wirtschaftlich sinnvoll sein. Es wird daher vorrangig von einer Größe 300 kW – 500 kW ausgegangen. Für die durchgeföhrt Potenzialstudie, siehe Kap. 16 und 17, sind auch kleinere Flächen und daher auch kleinere Leistungen berücksichtigt worden, um das gesamte Potenzial zu ermitteln.

Die folgenden Anwendungsklassen sollen vergleichend betrachtet werden:

1. Installation am oder im Gleisbett
2. Installation an oder in einer LSW
3. Installation an oder auf einem Lärmschutzwall
4. Installation an oder in baulichen Bahneinrichtungen
5. Installation neben dem Schienenweg
6. Sonstige Installationsorte

Basis der Kostenschätzung sind die aktuellen Kosten vergleichbarer marktüblicher Systeme in Deutschland. Als beste verfügbare Quelle wurde eine Marktstudie des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) von Juni 2021 zu den LCOE Erneuerbare Energien recherchiert [79].

Die besonderen Anforderungen im Bahnbereich werden jeweils aufgeführt und entsprechende Zuschläge zur Erfüllung dieser Anforderungen geschätzt.

## 11.1 Annahmen für Basissysteme

- LSW
  - optimale Ausrichtung Süd (einseitig)
  - Höhe der LSW beträgt 5 m, die oberen 2 m sind für PV-Module nutzbar
  - die PV-Module sind senkrecht als Vorinstallation parallel zur LSW angebracht

Für eine Peakleistung des Systems von 500 kWp werden 1250 Module je 400 Wp benötigt.  
Die Gesamtfläche beträgt 2500 m<sup>2</sup>.

Die benötigte Streckenlänge wäre 1.300 m.

Die Einspeisung erfolgt vorzugsweise mittig.

- Lärmschutzwand

- optimale Ausrichtung des LSW Süd (einseitig)
- Höhe des LSW beträgt 7 m, die oberen 4 m sind für PV-Module nutzbar
- die PV-Module sind parallel zur Neigung in 30° angebracht

Für eine Peakleistung des Systems von 500 kWp werden 1250 Module je 400 Wp benötigt.

Die Gesamtfläche beträgt 2500 m<sup>2</sup>.

Die benötigte Streckenlänge wäre 650 m.

Die Einspeisung erfolgt vorzugsweise mittig.

- Gebäudedach

- Gebäude mit Satteldach in Nord-Süd-Ausrichtung (PV in Ost-West)
- 15° Neigung

Für eine Peakleistung des Systems von 500 kWp werden 1250 Module je 400 Wp benötigt.

Die Gesamtfläche beträgt 2500 m<sup>2</sup>.

Bei angenommener Dachbreite von 20 m entspräche dies einer notwendigen Gebäudelänge von 125 m.

- Freifläche

- Es wird eine aufgeständerte, nach Süden ausgerichtete Fläche angenommen.
- Der Flächenfaktor wird mit 0,5 angenommen.

Für eine Peakleistung des Systems von 500 kWp werden 1250 Module je 400 Wp benötigt.

Die Gesamtfläche beträgt 2500 m<sup>2</sup>, was einem benötigten Areal von ca. 5.000 m<sup>2</sup> entspräche.

- Sonstige - Zugdach

- Es wird ein auf dem Wagendach befestigtes Modulsystem mit flexiblen Modulen (rahmenlose Dünnschichtmodule) angenommen.
- Da die Modulleistung je Fläche bei Dünnschichtmodulen (z. B. Avancis PowerMax 160 Wp) nur ca. halb so groß ist wie bei kristallinen Modulen wird ca. die doppelte Modulfläche benötigt. Eine Systemgröße von 50 kWp wäre bei dieser Anwendung innerhalb der Anwendungsklasse angemessen. Dafür würde eine Modulfläche von ca. 500 m<sup>2</sup> benötigt.

Die Zuglänge im Fernreiseverkehr der DB liegt zwischen 200 und 300 m (ICE1-3). Der neue Typ ICE 4 kommt auf ca. 350 m Länge. Ein typischer Reisezugwagen der DB hat ca. 26 m Länge und 2,86 m Breite<sup>2</sup>. Ein Fernzug hat damit bis zu dreizehn Personenwa-

---

<sup>2</sup> Intercity 1 (bahn.de)

gen jeweils mit einer Gesamtdachfläche von ca. 78 m<sup>2</sup>. Bei einer angenommenen Flächennutzung von max. 0,7 wären damit ca. 50 m<sup>2</sup> Dachfläche mit PV belegbar, d. h. bei dreizehn Wagen sind dies in Summe ungefähr 700 m<sup>2</sup>.

Bei dieser Anwendung wird die erzeugte Leistung möglichst direkt innerhalb des Zuges selbst genutzt. Am einfachsten wäre dies mit dem Gleichstrombordnetz (Hilfsbetrieb DC 110 V) oder aber mit dem 3 AC 400 V 50 Hz System zu realisieren.

## 11.2 Kosten für Basissysteme

Die nachfolgende Kostenübersicht zeigt die Stromgestehungskosten (LCOE). Diese werden in Euro je erzeugter Megawattstunde (MWh) angegeben und ergeben sich aus den Investitionskosten (Kapitalkosten inklusive der Finanzierungskosten von Fremdkapital), den fixen und den variablen Betriebskosten, sowie der angestrebten Kapitalverzinsung über den Betriebszeitraum. Nicht inbegriffen ist die Verteilung und bedarfsgerechte Pufferung der erzeugten elektrischen Energie.

Als Standardsystem wird ein vergleichbar aufgebautes PV-System inklusive Einspeisung in das 50-Hz-Netz zugrunde gelegt. Für die Abschätzung des Zuschlags für die Bahnintegration wird von einer Einspeisung in das Bahnnetz ausgegangen, wo dies sinnvoll möglich ist. Weiterhin wurde die Aufsplitzung der Gesamtinstallationskosten, die in Tabelle 23 dargestellt ist, berücksichtigt. Einmalkosten, z. B. für Entwicklung, Anpassentwicklung und Zulassung, sind nicht berücksichtigt, da sich diese innerhalb dieser Studie nur sehr ungenau abschätzen lassen und bei entsprechender Stückzahl nicht mehr so stark ins Gewicht fallen.

TABELLE 22: AKTUELLE LCOE AUS PV UND ABGELEITETE SCHÄTZUNG DER KOSTEN FÜR PV IN BAHNINFRASTRUKTUR IN DEUTSCHLAND

AK	ANWENDUNGS-KLASSEN	KOSTEN STANDARDSYSTEM [CENT/KWH]	ZUSCHLAG FÜR BAHNINTEGRA- TION	GESAMT (GERUNDET) [CENT/KWH]
1	Gleisintegriert	Kosten für diese Anwendungsklasse können nicht angegeben werden, da zum einen ein vergleichbares konventionelles System fehlt und zum anderen die vorhandenen Technologien noch nicht vorhanden sind.		
2	LSW (vorgehängte PV)	11,2 – 14,0 <sup>3</sup> (Fassaden-PV)	20 % – 80 % (Rück-/ Gleisseite)	12 – 25
3	Wall	3,7 – 8,0 <sup>4</sup>	10 % – 20 %	4 – 10
4	Gebäude >30 kWp <30 kWp)	<b>4,63 – 9,78*</b> <b>5,81 – 11,01*</b>	5 % – 10 % 5 % – 10 %	5 – 11 6 – 12
5	Freifläche	3,12 – 5,70*	5 % – 10 %	3 – 6
6	Fahrzeugdach	4,63 – 9,78 (analog AK 4)	80 % – 120 %	8 – 21

\* Quelle: Studie Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien Juni 2021 [79]

Die grafische Darstellung veranschaulicht die geschätzten Spannen zwischen Minimalen und maximalen LCOE für die PV-Systeme in der Bahninfrastruktur. Die größten Unsicherheiten liegen bei PV-Installationen an LSW sowie bei der speziellen Anwendung in der Klasse „Sonstiges“ für PV-Dünnenschicht-Systeme direkt auf dem Wagendach.

<sup>3</sup> Basis bildet die Annahme von 400 – 500 €/m<sup>2</sup> für ein vergleichbares Fassaden-PV-System aus 2020 (z. B. Photovoltaik-Fassade: Konstruktion und Praxisbeispiele (energie-experten.org), <https://wohnglueck.de/artikel/wann-sich-eine-pv-fassade-lohnt-58696>, 200 Wp/m<sup>2</sup> Modulfläche, 700 kWh/kWp\*a,

<sup>4</sup> Schätzung 20 % geringere Kosten gegenüber Dachanlagen von 30 kWp bei PV-Anlagen > 100 kWp

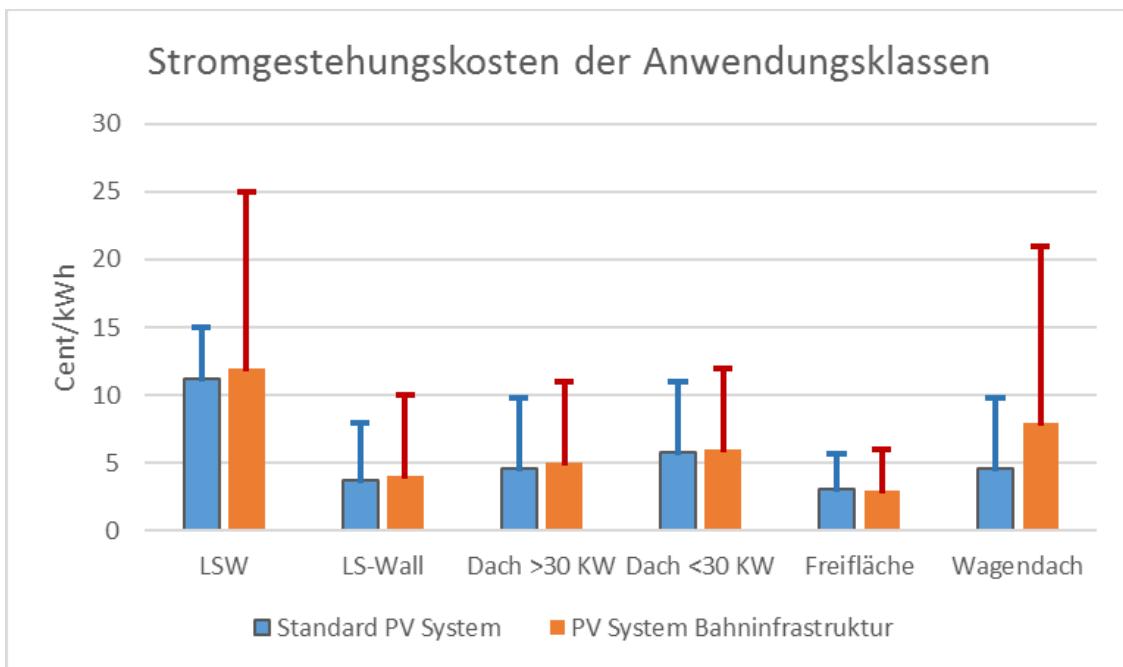
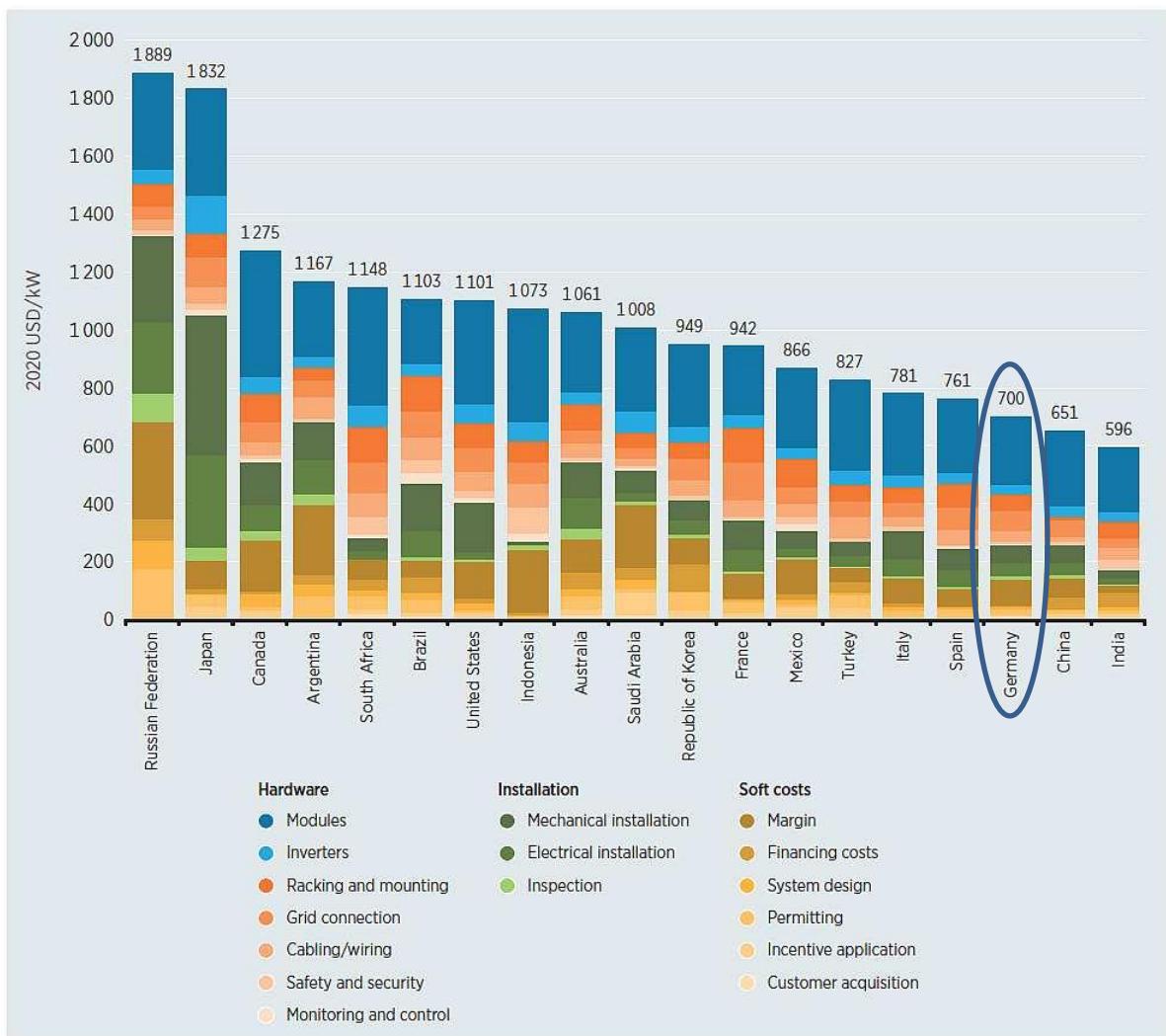


Abbildung 24: Gegenüberstellung LCOE von netzgekoppelten Standard PV-Systemen und abgeleiteten LCOE für PV-Systeme in der Bahninfrastruktur mit Direkteinspeisung in das Bahnnetz. Die breiten Säulen stellen den Mittelwert dar, die dünneren Striche die Varianz nach oben. Quelle: TÜV Rheinland.

Basierend auf einer veröffentlichten Zusammensetzung der Gesamtkosten für große PV-Freifeldsysteme für verschiedene Länder in 2020 innerhalb einer Studie der International Renewable Energy Agency (IRENA) [80] wurden die zu berücksichtigenden Kostenanteile einzelner Kategorien ermittelt, da die Mehraufwände für die spezielle Anwendung in der Bahninfrastruktur sich nicht gleichmäßig auf alle Positionen verteilen werden.



Source: IRENA Renewable Cost Database

Abbildung 25: Aufschlüsselung der Gesamtinstallationskosten für große Freiland-PV-Systeme in verschiedenen Ländern, 2020. Quelle: IRENA (2021), Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [80].

Die aufgeführten Spannen ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsklassen und der Berücksichtigung von Unsicherheiten der Schätzung.

TABELLE 23: AUFSPLITTUNG DER KOSTEN FÜR PV-SYSTEME FÜR DEUTSCHLAND BASIEREND AUF ABBILDUNG 25

NR.	BENENNUNG	ANTEILIGE KOSTEN	ZUSCHLAG FÜR BAHNINTEGRATION
1	PV-Generator Investitionskosten	40 – 50 %	20 – 30 %
2	Umwandlungs- und Transformierungs- elemente + Netzanschluss	15 – 20 %	10 – 40 %
5	Installation O&M/Security Sonstige Kosten (Planung, Design, Finanzierung, Genehmigungen, Safety, ...)	10 – 20 % 5 – 10 % 10 – 15 %	30 – 50 % 20 – 50 % 10 – 20 %

## 11.3 Sonderfallbetrachtung LSW mit integrierter PV

Eine kostenmäßig nicht vergleichbare Anwendung innerhalb der Anwendungsklasse PV an LSW stellen die Lärmschutzwände mit integrierter PV dar, da es kein Standardsystem als Vorlage gibt.

Als Beispiel dient eine 2016 installierte Lärmschutzwand in Neuötting, die aktuell weiterhin als Pilotprojekt in Betrieb ist.

Die LSW umfasst eine dreigeteilte Konstruktion (Hersteller Kohlhauer), wobei im oberen Teil der 5 m hohen Wand PV-Elemente integriert wurden. Die Abmessungen sind 234 x 5 m. 65 kWp PV-Leistung sind integriert, die ca. 51500 kWh/a Energie erzeugen.

Bei dargestellten Investitionskosten von 75 T€<sup>5</sup> ergeben sich 64 €/m<sup>2</sup> für diese LSW.

<sup>5</sup> <https://www.kohlhauer.com/blog/photovoltaik-laermenschutzwand-hat-sich-bewahrt>, Zugriff am 2023-10-16.

# 12 Recherche der heranzuziehenden Datenquellen

Die ermittelten relevanten und herangezogenen Datenquellen zur Ermittlung des energetischen Potenzials sind nachfolgend in Tabelle 24 zusammengestellt.

TABELLE 24: ÜBERSICHT DER HERANGEZOGENEN DATENQUELLEN

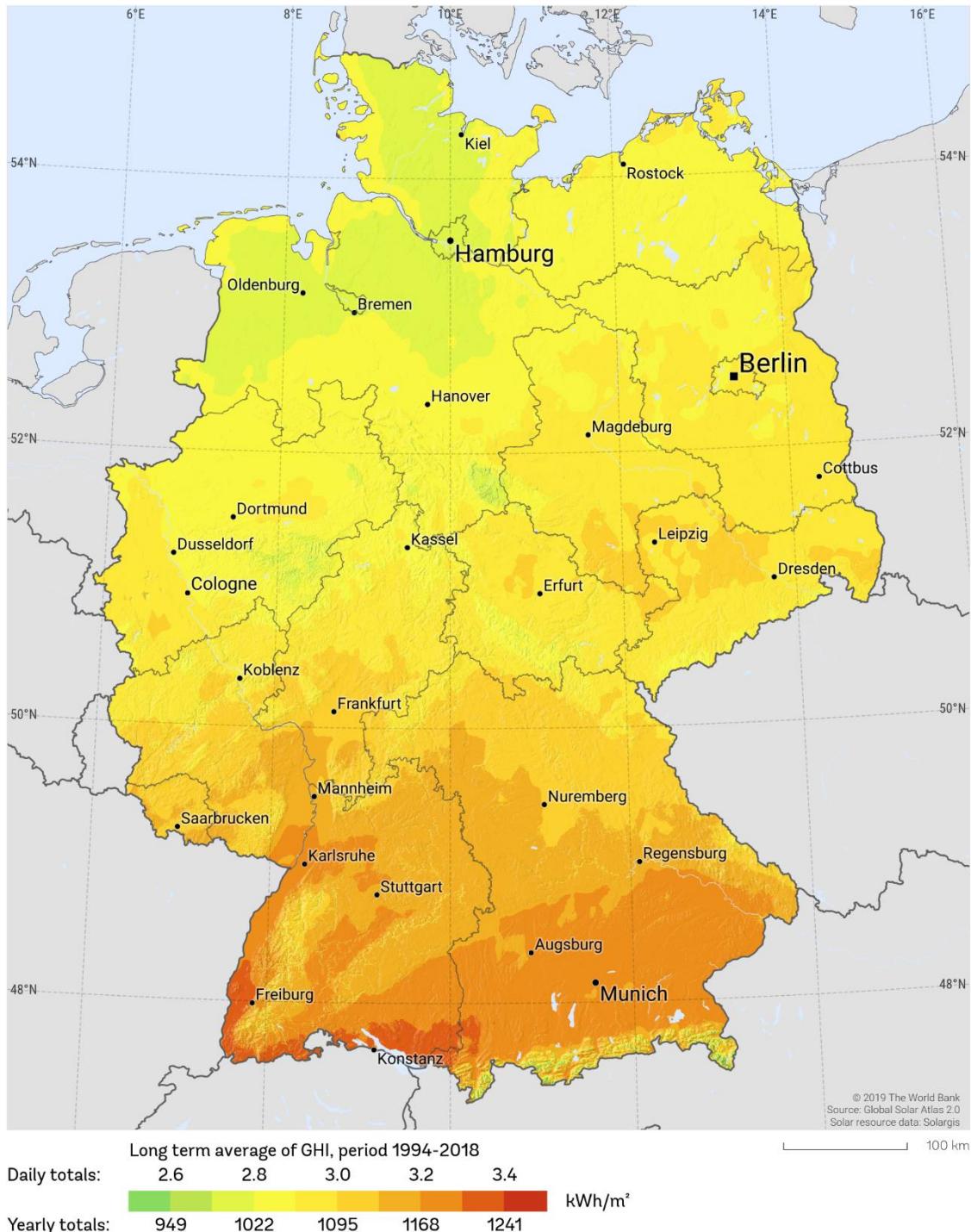
Index	Datenquellen	Datensatz	Format
<b>DB-Flächen</b>	DB AG	Bewirtschaftungseinheiten (Abruf der Daten am 2022-02-02.)	Vektorielle Geodaten
<b>DOM1</b>	Landesvermessungseinrichtungen	Digitales Oberflächenmodell Gitterweite 1 m	TIFF (georeferenziert)
<b>LSW</b>	Eisenbahn-Bundesamt	Darstellung von Schallschutzbauwerken	Vektorielle Geodaten
<b>GEB</b>	OSM	Gebäudegrundflächen	Vektorielle Geodaten
<b>LAND</b>	OSM	Landflächen inkl. Nutzung	Vektorielle Geodaten
<b>P-GRID</b>	OSM	Bahnstromnetz mit Unterwerken und HV-Leitungen	Vektorielle Geodaten
<b>R-GRID</b>	DB Netz AG/Strukturregister	Strecken (Elektrifizierung, Fahrgeschwindigkeiten), Bahnübergänge, Tunnel, Brücken, Betriebsorte	Vektorielle Geodaten
<b>SolarGIS</b>	SolarGIS	Klimadaten (Einstrahlung, Temperatur, Wind)	TIFF (georeferenziert)

Die für eine Energieertragsprognose erforderlichen meteorologischen Daten wurden mittels verfügbarer historischer Datensätze zur Solarstrahlung und Meteorologie von der allgemein anerkannten Datenbank SolarGIS bezogen. Diese Datenbank stellt unter Verwendung wissenschaftlich validierter Modelle boden- und satellitengestützte langjährige Zeitreihen mit einer räumlichen Auflösung bis zu 3 km und einer zeitlichen Auflösung bis zu 15 min zur Verfügung. Anhand der historischen Zeitreihen von 1994 – 2018 lässt sich für alle Standorte ein typisches meteorologisches Jahr ableiten, das als Grundlage zukünftiger solarer und meteorologischer Prognosen dient. Abbildung 26 zeigt die globale horizontale Einstrahlung (direkte und diffuse Einstrahlung bezogen auf eine horizontale Fläche) für Deutschland.

## SOLAR RESOURCE MAP

GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION  
GERMANY

SOLARGIS



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

Abbildung 26: Karte zur Solaren Einstrahlung; im Jahresmittel ca. 1100 kWh/m<sup>2</sup>. Quelle: Global Solar Atlas, Global Horizontal Irradiation – Germany [Online], [Zugriff am: 2023-10-16]. Verfügbar unter: <https://globalsolaratlas.info/download/germany>.

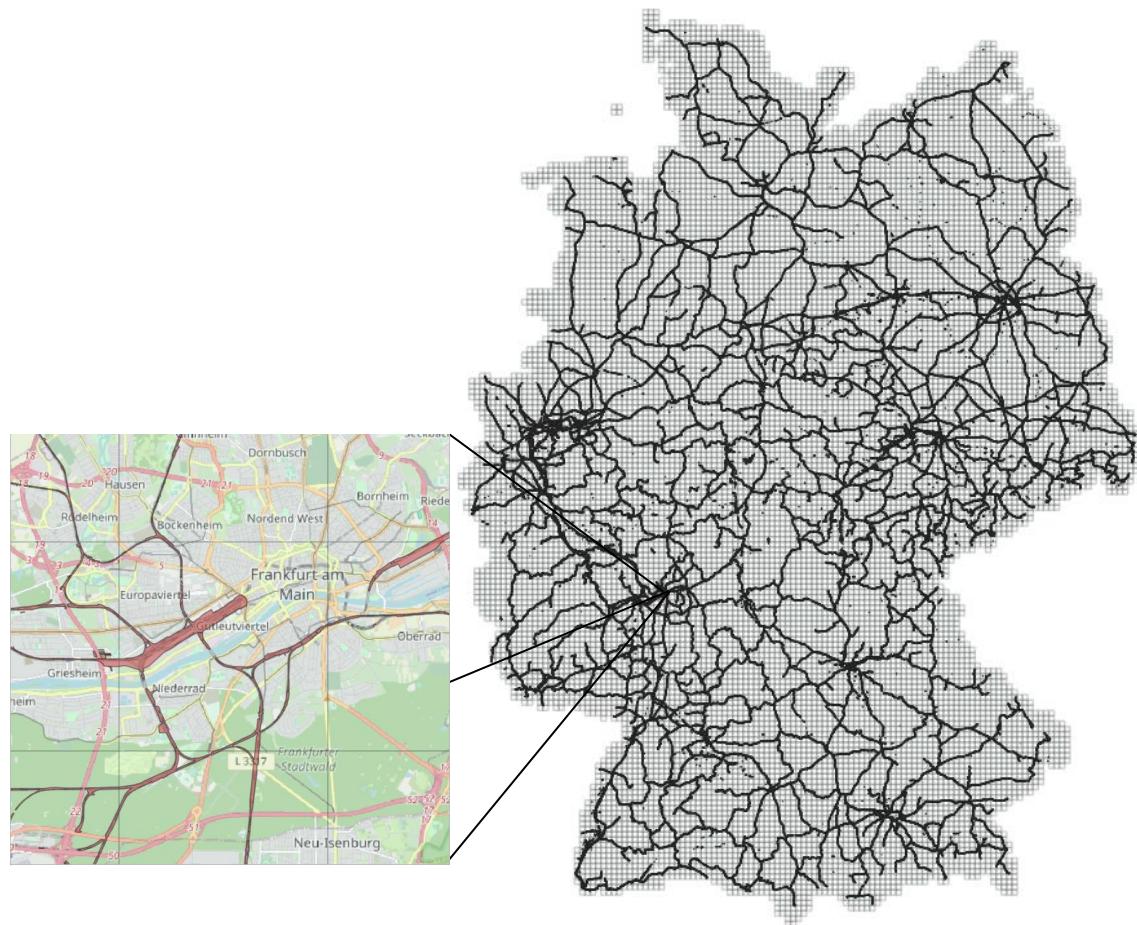


Abbildung 27: Bewirtschaftungseinheiten (als Umring) der DB Netz AG, DB Regio AG, DB Cargo, DB Station & Service, DB Energie, DB Fernverkehr AG und DB Immobilien. Quelle: TÜV Rheinland

Die Basis zur Ermittlung der theoretisch verfügbaren Flächen bildeten die Geo-Daten zu den DB AG-Bewirtschaftungseinheiten der DB Netz AG, DB Regio AG, DB Cargo, DB Station & Service, DB Energie, DB Fernverkehr AG und DB Immobilien (DB-Flächen/Umring Daten).

Das Infrastrukturregister mit dem Schienenverkehrsnetz der DB Netz AG, DB Station & Service AG und DB Energie GmbH stellt vielfältige Informationen zu den Bahnstrecken bereit, z. B. betreffs Elektrifizierung, der erlaubten Fahrgeschwindigkeiten und diversen Einrichtungen wie Bahnübergänge, Tunnel, Brücken oder Betriebsorte, die in die Selektion von nutzbaren Flächen einbezogen wurden. Flächen an Schallschutzbauwerken entlang von Haupteisenbahnstrecken wurden mittels zur Verfügung gestellter spezifischer Geo-Daten des EBA ermittelt.

Eine weitere wichtige Datenbasis bildeten die hochauflösten georeferenzierten Oberflächendaten DOM1 der Landesvermessungseinrichtungen, bereitgestellt durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, die das gesamte Bundesgebiet mit Höhenangaben abdecken. Dieses High-Level GIS-Tool ermöglicht die Bestimmung der Neigung bzw. Orientierung des Untergrunds und der Abschattung einer Fläche durch umliegende Objekte.

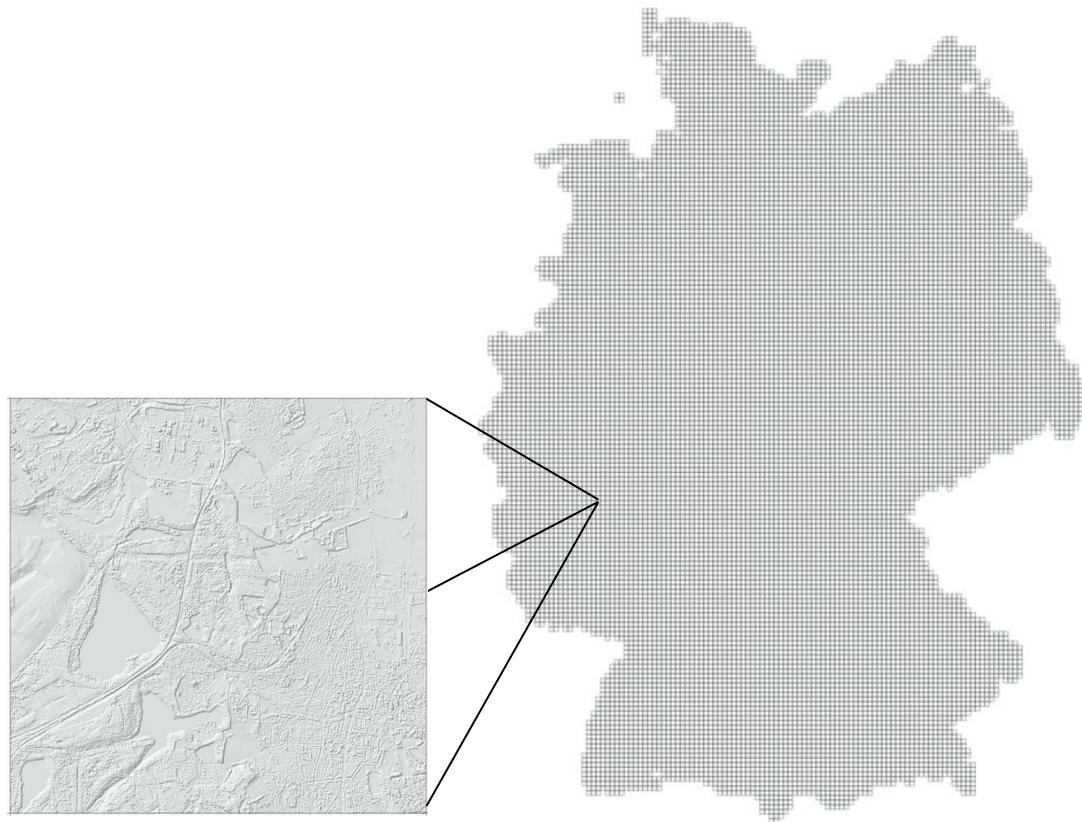


Abbildung 28: Digitales Oberflächenmodell DOM1 mit einer Auflösung von 1 m; ca. 15000 Kacheln zu je 5x5 km decken ganz Deutschland ab. Quelle: TÜV Rheinland

Darüber hinaus wurden auch vektorielle Geo-Daten aus Open Source Quellen (Open Street Map (OSM)) verwendet, um beispielweise Informationen zu Gebäudegrundflächen (Index GEB gemäß Tabelle 24) für die Anwendungsklasse 4<sup>6</sup> und Landflächen-Nutzungsarten (Index LAND gemäß Tabelle 24) für die Anwendungsklasse 5 in die Auswertung zu integrieren.

Ein weiterer Datensatz (P-GRID) wurde zur Identifizierung von Unterwerken zwecks Evaluierung von Einspeisemöglichkeiten in das Bahnnetz eingesetzt.

Auf die Datenqualität der einzelnen Quellen wird im nachfolgenden Abschnitt eingegangen.

---

<sup>6</sup> Definition der Anwendungsklassen siehe Kap. 4.2.

# 13 Verifikation der Daten

Für die Verifikation der Daten war ursprünglich eine exemplarische Vorort-Sichtprüfung vorgesehen. Diese wäre wegen des Zeitaufwands nur für einige wenige Positionen möglich gewesen, sodass im Vergleich zur Gesamtfläche keine annähernd repräsentative Stichprobe erreicht werden könnte. Bei der Sichtprüfung ist weiterhin die eigentliche DB-Fläche nicht immer ersichtlich, da sie nicht zwingend gekennzeichnet ist, z. B. durch eine Umzäunung oder Beschilderung. Unter diesen Gesichtspunkten erscheint eine Vor-Ort-Verifikation wenig hilfreich.

Das Projektteam bevorzugte deshalb eine qualitative Bewertung der genutzten Datenquellen mit folgenden Kriterien:

- Seriosität und Anerkennung des Herausgebers der Quelle
- Aktualität der Daten
- Informationsgehalt hinsichtlich der Fragestellung für das Projekt
- Erkennbarkeit von Inkonsistenzen oder Lücken bei Nutzung der Datenquelle(n)

TABELLE 25: VERIFIKATION DER GENUTZTEN DATENQUELLEN

LEGENDE: + = HOCH, O = DURCHSCHNITTLICH, - = GERING

Index	Datenquellen	Datensatz	Herausgeber	Aktualität	Information	Inkonsistenzen
DB-FL.	DB AG	Bewirtschaftungseinheiten	+	+	+	o*
DOM1	Landesvermessungseinrichtungen	Digitales Oberflächenmodell Gitterweite 1 m	+	+	+	+
LSW	EBA	Darstellung von Schallschutzbauwerken	+	+	+	+
GEB	OSM	Gebäudegrundflächen	o**	-	+	o** ca. 10 m Genauigkeit
LAND	OSM	Landflächen inkl. Nutzung	o**	o	o	o
P-GRID	OSM	Bahnstromnetz mit Unterwerken und HV-Leitungen	o**	o	o	o
R-GRID	DB Netz AG/Strukturregister	Strecken (Elektrifizierung, Geschwindigkeit), Bahnübergänge, Tunnel, Brücken, Betriebsorte	+	+	+	+
Solar-GIS	SolarGIS	Klimadaten (Einstrahlung, Temperatur, Wind)	+	+	+	+

\* Es wurden in einem Bereich einzelne stark zergliederte DB-Flächen festgestellt, deren Aufsplittung nicht sinnvoll erscheint. Diese Flächen einzeln betrachtet sind zu klein für eine Nutzung, in Summe könnten sie jedoch ausreichend sein.

\*\* Open Street Map, aufgrund der Heterogenität ist die Qualität bei OSM-Daten unterschiedlich je Ort.

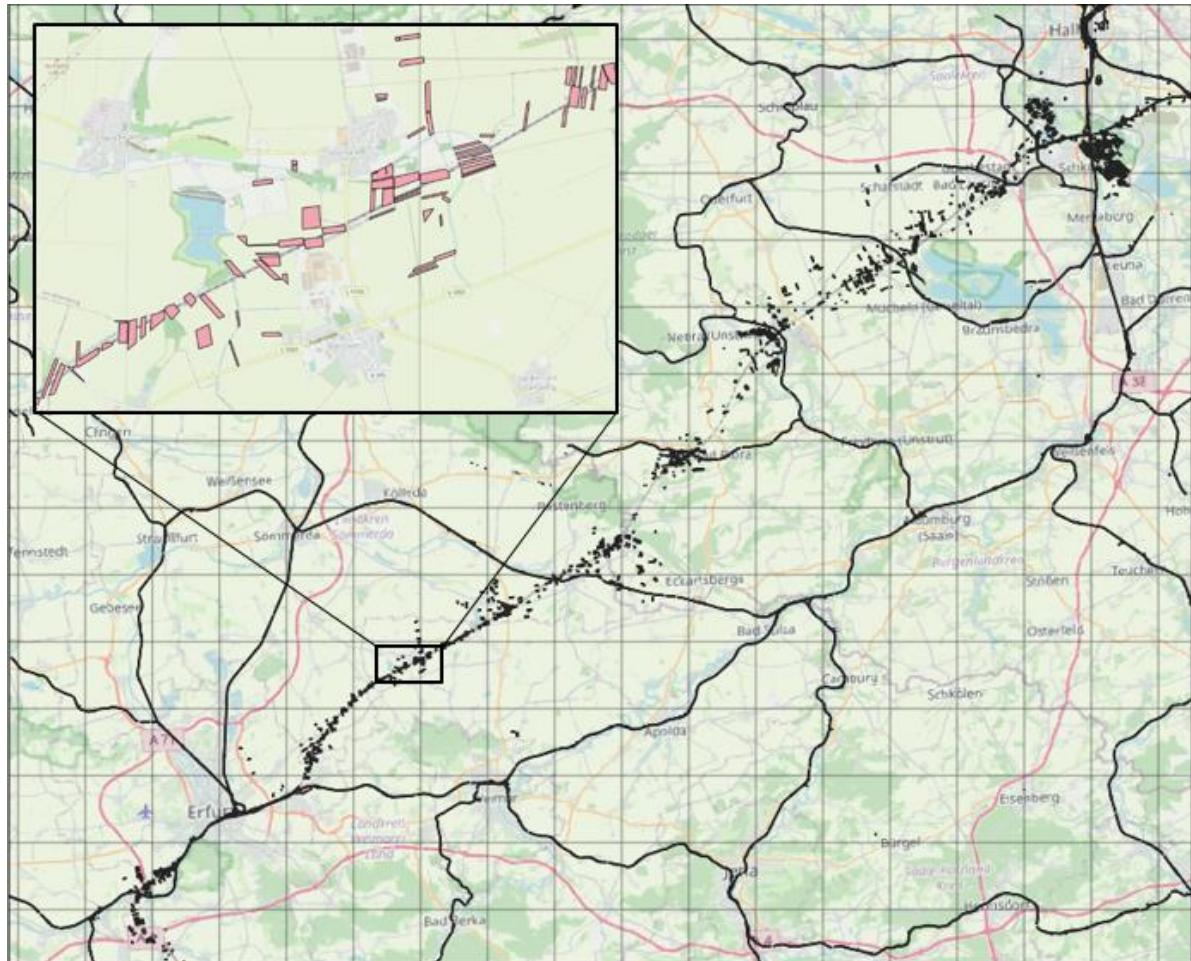


Abbildung 29: Neubaustrecken Nürnberg - Erfurt u. Erfurt – Leipzig Halle (zw. Bamberg u. Leipzig): nicht im Bahn-Umring enthalten. Quelle: TÜV Rheinland

#### Qualität der DB-Flächendaten

Die Qualität der DB-Flächendaten ist durchweg sehr gut. In einem Bereich jedoch, am Streckenabschnitt zwischen Erfurt und Halle, werden etliche stark zersplittete kleine DB-Flächen aufgeführt, die Neubaustrecke selbst ist jedoch nicht als DB-Fläche markiert (Siehe Abbildung 29). Dies ist die einzige scheinbare oder offensichtliche Inkonsistenz, die in den Daten der DB-Bewirtschaftungseinheiten identifiziert wurde.

#### Qualität der Open Street Map-Daten

Das OSM-Projekt wurde 2004 in Großbritannien gegründet und hat das Ziel, auf Basis des Crowd-Sourcing weltweite Kartendaten zu erheben und diese zur freien Nutzung zur Verfügung zu stellen. Das Hauptaugenmerk gilt dabei der Verkehrsinfrastruktur (Straßen und Wege, Bahnlinien, Flüsse), aber auch eine Vielzahl von "Points of Interest", Gebäuden und Flächennutzungsdaten werden erfasst, ebenso wie Küsten und Ländergrenzen. Aufgrund des Crowd-Sourcing gibt es keine organisierte und streng prozessgesteuerte, flächendeckende Qualitätssicherung. Die Erfahrung zeigt, dass die Qualität der OSM-Daten unterschiedlich ist. Einige Städte in Deutschland sind bereits mit so vielen Details erfasst, dass

OSM sich mit jedem kommerziellen Anbieter messen kann (zumeist sind die OSM-Daten auch die ersten, die ein Neubaugebiet oder eine neue Autobahnabfahrt enthalten); in anderen Gegenden gibt es dafür nichts außer der einen oder anderen Schnellstraße [116].

Die Vollständigkeit und die Qualität der Daten ist abhängig von

- Bevölkerungsdichte (Stadt/Land)
- Objektart (z. B. Straßennetz, Gebäude/Adressen, spezifische Objekte)
- Darstellung der Objekte in der Karte
- Gelände (Stadt/Flachland/Hochgebirge)
- Anzahl der Bearbeitungen eines Objektes korreliert mit dessen Genauigkeit (Haklay et al. 2010)
- Genauigkeit: ~ 10 m im Vergleich zu Referenzdaten (amtlich/kommerziellen Daten) [117]

### Ergebnis

Zusammenfassend kann von einem insgesamt qualitativ guten Datenbestand ausgegangen werden, der eine solide Grundlage zur Flächenanalyse bietet.

Ungenauigkeiten bzw. noch ausstehende Aktualisierungen können nicht ausgeschlossen werden.

Ableitend aus den durchgeführten Analysen kann dieser Unsicherheitsfaktor zu einer geringfügigen Unterschätzung des tatsächlichen Brutto-Flächenpotenzials führen.

# 14 Designanforderungen für geeignete PV-Systeme

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Kapiteln 4 bis 10 in Bezug auf Anforderungsprofile und grobe Systemauslegungen werden die Designanforderungen für geeignete PV-Systeme spezifiziert.

Es wurden diverse Kriterien definiert, welche den Ausschluss offensichtlich nicht wirtschaftlich sinnvoll für PV nutzbarer Flächen von der ermittelten Brutto-Fläche ermöglicht. Dabei wurden die baulichen Gegebenheiten und besonderen Anforderungen im Bahnbereich bei den Selektionskriterien berücksichtigt.

Diese Kriterien und/oder deren Grenzwerte sind überwiegend abhängig vom Installationsort. Daher werden nachfolgend allgemein zu definierende Ausschlusskriterien für die sechs unterschiedlichen Anwendungsklassen (AK), deren Besonderheiten in Kap. 4.2 beschrieben wurden, dargestellt.

Nicht alle aus PV-Anwendungssicht typischen Ausschlusskriterien sind jedoch allgemein je Anwendungsklasse mittels Grenzwert anwendbar. Dabei bestünde das Risiko, dass pauschal zu viele Flächen herausgefiltert würden. Für diese „weichen“ Kriterien erfolgt daher eine Beschreibung, deren Relevanz bei der Projektierung für eine vorgesehene konkrete Fläche geprüft werden sollte.

Die mit den allgemein anzuwendenden Kriterien bereinigten Flächensummen fließen in die weitere Potenzialanalyse ein:

Für jede AK kann unter Annahme eines üblichen Systemdesigns, das in den Kapiteln 4 bis 10 definiert wurde, eine installierbare Leistung für PV-Systeme ermittelt werden. Aus diesen installierbaren Leistungen kann im nächsten Schritt die durchschnittlich produzierbare elektrische Energie für jede Anwendungsklasse berechnet werden.



Abbildung 30: Anwendungsklassen. Quelle: TÜV Rheinland

TABELLE 26: GENERELL ANWENDBARE KRITERIEN FÜR UNGEEIGNETE FLÄCHEN JE AK

Kriterium	Beschreibung, Beispiele	AK: Grenzwert für Ausschluss	Ansatz
Gelände-neigung	Zu große Gelände- bzw. Untergrundneigung, steile Böschungen, außerdem Schluchten	1: kein Grenzwert 2: kein Grenzwert 3: kein Grenzwert 4: kein Grenzwert 5: $> 30^\circ$ 6: kein Grenzwert	Höhenprofil-Geodaten
Ausrichtung	Geneigte Flächen der Ausrichtung N LSW: Ausrichtung O-W – nur die südliche LSW nutzbar = 50 % der Leistung (Außenseite), Mindesthöhe 2 m	1: kein Grenzwert 2: Azimut $90^\circ - 270^\circ$ 3: Azimut $90^\circ - 270^\circ$ 4: kein Grenzwert 5: kein Grenzwert 6: kein Grenzwert	DB Flächendaten
Verschattung	Zu starke Verschattungen (im Jahr)	(Erläuterung siehe unten) 1-5: Ausschluss 6: kein Grenzwert	Höhenprofil-Geodaten
Tunnel	Untertunnelte Streckenbereiche werden ausgeschlossen	1: Ausschluss 2 – 6: nicht relevant	Infrastrukturregister der DB
Bahnübergänge	Bereiche mit Bahnübergängen werden ausgenommen	1: Ausschluss 2 – 6: nicht relevant	Infrastrukturregister der DB
Eisenbahn-Brückenbauwerke	Bereiche mit Brückenbauwerken	1: Ausschluss 2 – 6: nicht relevant	Infrastrukturregister der DB
Flächengröße	Mindestgröße der zusammenhängenden Fläche/ Länge/Höhe (in Anlehnung an [19])	1: - / 500 m 2: - / 100 m / 2 m 3: - / 100 m 4: 20 m <sup>2</sup> / - 5: 200 m <sup>2</sup> / - 6: 100 m / -	
Blendungsrisiko	Blendungsrisiko kann für den Fahrbetrieb der Bahn, für Anwohner oder in der Nähe vorbeiführende Verkehrswege bestehen. Risiko ist abhängig von Ausrichtung der PV und der Umgebungs-spezifika	Evaluierung erforderlich: 1: Bahnbetrieb 2: Bahnbetrieb, Umgebung 3: Bahnbetrieb, Umgebung 4: Umgebung 5: Bahnbetrieb, Umgebung 6: nicht erforderlich <sup>7</sup>	

<sup>7</sup> Die PV-Module sind auf dem relativ flachen Fahrzeugdächern montiert. Es besteht ein Risiko, dass z.B. aufgrund einer hohen Anzahl abgestellter Fahrzeuge eine unerwünschte Blendung erzeugt wird. Generell ist hierzu eine Einzelfallbe- trachtung notwendig, die projektspezifisch erfolgen muss.

Zur Verschattung:

Flächen, die am 21.03., während die Sonne im Azimut zwischen 150° und 210° steht (entspricht ca. zwischen 10:00 und 14:30 Uhr), nicht verschattet werden, werden als verschattungsfrei interpretiert. Sie sind bei der Auswahl der Installationen zu bevorzugen. Daher werden auch für die vorliegende Studie Flächen, die in einem Teil dieses Zeitraumes verschattet werden, von der Betrachtung ausgeschlossen.

Wie in der PV-Branche üblich ist das Kriterium der Verschattungsfreiheit am 21.12. (verschattungsfrei am 21.12. während die Sonne im Azimut zwischen 150° und 210° steht). Für diese Studie wurde das weniger restriktive Kriterium angewendet, um ein höheres Potenzial, dann verbunden mit höheren LCOE, auszuschöpfen.

Für die Anwendungsklasse 6, Installation auf dem Fahrzeugdach, wird dieses Kriterium nicht angewendet, da der Standort der Fahrzeuge variabel ist und sich laufend ändert.

### Risikobetrachtung

Neben den o. g. Kriterien für eine grundsätzliche Annahme der Wirtschaftlichkeit einer PV-Anwendung für die einzelnen Anwendungsklassen sind auftretende Risiken zu berücksichtigen, die im Hinblick auf die Gewährleistung und auch einem sicheren und langfristigen Betrieb differenziert eingeschätzt werden. Folgende drei identifizierte und nachfolgend kurz erläuterte Risikotypen werden betrachtet:

- elektrische Risiken
- Risiken durch den Bahnbetrieb
- Wetterrisiken

Eine PV-Anlage ist eine elektrische Anlage, die im Normalfall bei Verwendung von Qualitätskomponenten und Einhaltung der Planungs- und Installationsregeln sowie regelmäßiger Wartung einen sicheren Betrieb erlaubt. Die elektrischen Kenngrößen einer PV-Anlage der Leistungsklasse > 100 kWp, wie sie für den Einsatz in der Schieneninfrastruktur vorgesehen sind, können im Fehlerfall Risiken für die Gesundheit und das Leben von Personen bedeuten, können aber ebenso z. B. durch die Zündung von Lichtbögen oder allgemein durch Überhitzungen innerhalb der Anlage Risiken für die Umgebung einschließlich sich hier aufhaltender Personen darstellen.

Andererseits bedingt der Bahnbetrieb regelmäßig mechanische Belastungen, die mit einem Schadensrisiko für in der Nähe installierte technische Systeme verbunden sind. Darüber hinaus erzeugt der Bahnbetrieb verschiedenartige Emissionen, wie Abrieb, Schmutz und auch Schall, die die Umgebung beeinträchtigen können.

Weiterhin entstehen durch äußere Einflüsse, wie z. B. Wetterereignisse oder Überflutungen, Einwirkungen auf die Bahninfrastruktur inklusive der PV-Installationen, die im schlimmsten Fall zu Schäden und in der Folge auch zu Personenschäden führen können.

In der nachfolgenden Tabelle sind diese drei genannten übergeordneten Risiken durch einzelne Risiken unterstellt und hinsichtlich einer möglichen Beeinträchtigung des Bahnbetriebs oder des PV-Anlagenbetriebs aber auch einer potenziellen Gefährdung von Personen analysiert worden (Tabelle 27).

Für die sechs Anwendungsklassen für PV-Systeme mit ihren definierten Positionen innerhalb der Schieneninfrastruktur und ihren jeweiligen Spezifika wurde das Auftreten der einzelnen Risiken eingeschätzt und in drei Stufen bewertet: kein bis geringes Risiko (-) / mittleres Risiko (0) / erhöhtes Risiko (+).

Die Bewertung erfolgt anhand allgemeiner typischer Spezifika, wie Zugänglichkeit bzw. Zutrittsschutz, Distanz zum Bahnverkehr und zum Boden, Ausrichtung und Neigung der Module.

Diese Auflistung soll die Sensibilität für die verschiedenartigen möglichen Risiken schaffen, erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit und entbindet nicht von der detaillierten Prüfung und ggf. nötigen Minderungsmaßnahmen für jedes einzelne PV-Projekt.

TABELLE 27: BEWERTUNG VON RISIKEN DURCH INNERE/ÄUßERE EINWIRKUNGSFAKTOREN

RISIKO WIRKUNG		BAHNBE-TRIEB	PV-SYSTEM	PERSONAL	PERSONEN	AK1	AK2	AK3	AK4	AK5	AK6
ELEKTRISCHE RISIKEN	Elektrischer Schlag			x	x	o	o	o	-	-	-
	Überhitzung/ Brand	x	x	x	x	-	o	-	+	-	+
	Überspannung		x			-	-	-	-	-	-
RISIKEN DURCH DEN BAHNBE-TRIEB	Bahnverkehr/ Erschütterungen	x	x	x		+	o	-	-	-	+
	Bahnverkehr/Sog/Druck	x	x	x	x	+	-/+	+	-	-	+
	Wartungsarbeiten an Gleisanlagen			x		+	-/+ <sup>1</sup>	o	-	-	-
	Verschmutzung		x			+	-/+ <sup>1</sup>	+	-	o	o
	Schall			x	x	o	-/+ <sup>1</sup>	+	-	o	-
WETTER-RISIKEN	Direkter Blitzschlag		x			-	o	o	+	-	o
	Sturm, Hagel	x	x		x	+	+	+	+	+	+
	Überflutung	x	x	x	x	+	-	-	-	o	-
	Erdbeben/ Hangabrutsch	x	x	x	x	-	-	o	o	o	-
LEGENDE	Bewertung - kein oder geringes Risiko o mittleres Risiko + erhöhtes Risiko (+ erhöhtes Risiko für Personenschäden)					<sup>1</sup> Außenseite der LSW/Innenseite oder integriert					

Die Einwirkungen, die mit einem Risiko für Personen, d. h. Bahnmitarbeiterinnen und -mitarbeiter, Bahnkundinnen und -kunden, Wartungstechnikerinnen und -techniker der PVA oder Nachbarschaft verbunden sind, sollten besondere Beachtung bei der konkreten Ausgestaltung der PV-Systeme finden. Diese Risiken sind in der Tabelle gelb hervorgehoben.

Aus Tabelle 27 ist ersichtlich, dass für die sechs Anwendungsklassen die Anzahl der Einwirkungen, die mit einem erhöhten Risiko einhergehen, variiert.

Bei Freiflächenanlagen (AK5) und Anlagen auf Gebäuden (AK4) sind vergleichsweise die wenigsten Einwirkungen mit einem erhöhten Risiko für Personen, aber auch die wenigsten Risiken für Schäden am PV-System selbst und für den Bahnbetrieb verbunden.

Neben den Ergebnissen zur Wirtschaftlichkeit, insbesondere den LCOE, dem evaluierten Flächen- und Ertragspotenzial und den Verfügbarkeiten, gehen die Ergebnisse der Risikobetrachtungen in die Empfehlungen für eine Priorisierung zur Realisierung der PV-Projekte ein.

Im Kontext der Bahn wird immer wieder z. B. auch die Entgleisung und deren Folgen im Zusammenhang mit PV-Anlagen diskutiert. Je nach Schweregrad der Entgleisung und je nach installierter PV-Anlage in

der Schieneninfrastruktur, ergeben sich durch die vorhandenen PV-Anlagen zusätzliche Gefährdungen. Dieser spezielle Fall wurde in der oben aufgeführten Risikobetrachtung nicht mit einbezogen, da die Entgleisung glücklicherweise extrem selten auftritt. Dies entbindet jedoch nicht den Errichter der PV-Anlage, eine gründliche Gefährdungsanalyse durchzuführen, in der die oben genannten Gefährdungen, die Entgleisung und weitere hier nicht aufgeführte Gefährdungen einzubeziehen sind.

## 15 Methode

Auf Grundlage der vorhandenen Informationen und der definierten Kriterien erfolgt die rechnergestützte Ermittlung und Auswertung der theoretischen und technisch sinnvoll nutzbaren PV-Potenziale der Schieneninfrastruktur. Als Ergebnis wird das Einspeisepotenzial der geeigneten PV-Systeme an und in der Schieneninfrastruktur sowohl im räumlichen als auch im zeitlichen Kontext dargestellt.

Im Wesentlichen existieren drei Methoden zur Ermittlung der potenziell geeigneten Bahnanlagen. Unter Low-Level-Raumanalyseverfahren versteht man Verfahren, die aggregierte statistische Daten nutzen. Solche Methoden gehen von einer Homogenität der Daten im gesamten analysierten Gebiet bzw. innerhalb mehrerer definierter Teilgebiete aus, was zu Schätzungen von begrenzter Zuverlässigkeit führt.

Die zweite Methode umfasst Ansätze, die aggregierte statistische Daten mit räumlichen Informationen aus geografischen Informationssystemen (GIS) und Light Detection and Ranging (LiDAR) kombinieren.

Die dritte Methode umfasst High-Level-Analysen, die hochentwickelte Systeme zur Digitalisierung der Schieneninfrastruktur bzw. detaillierte räumliche Informationen und Analysemöglichkeiten der solaren Bestrahlungsstärke nutzen. Diese Methode greift auf detailliertere Datensätze zurück, als es rein statistische Verfahren erlauben und liefert zur großflächigen Bestimmung der potenziell nutzbaren Flächen die präzisesten Ergebnisse, ist jedoch durch einen deutlich höheren Aufwand und Datenvolumen gekennzeichnet.

Zur Ermittlung der Flächen und der installierbaren PV-Leistung der Anwendungsklassen 1 – 5 wurden detaillierte räumliche Analysen der dritten Methode angewendet. Dies trifft auch für die anschließend durchgeführte Bestimmung der Energieerzeugungspotenziale und der Anbindung an das Bahnenergieversorgungssystem zu. Es lässt sich im Rahmen dieser Studie für die Anwendungsklasse 6 (Fahrzeugdach) nicht vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt sich welche Fahrzeuge an welchem Ort befinden. Daher wird für diese Anwendungsklasse auf aggregierte statistische Daten zurückgegriffen.

Die Methode der Auswertung ist in Abbildung 31 dargestellt.

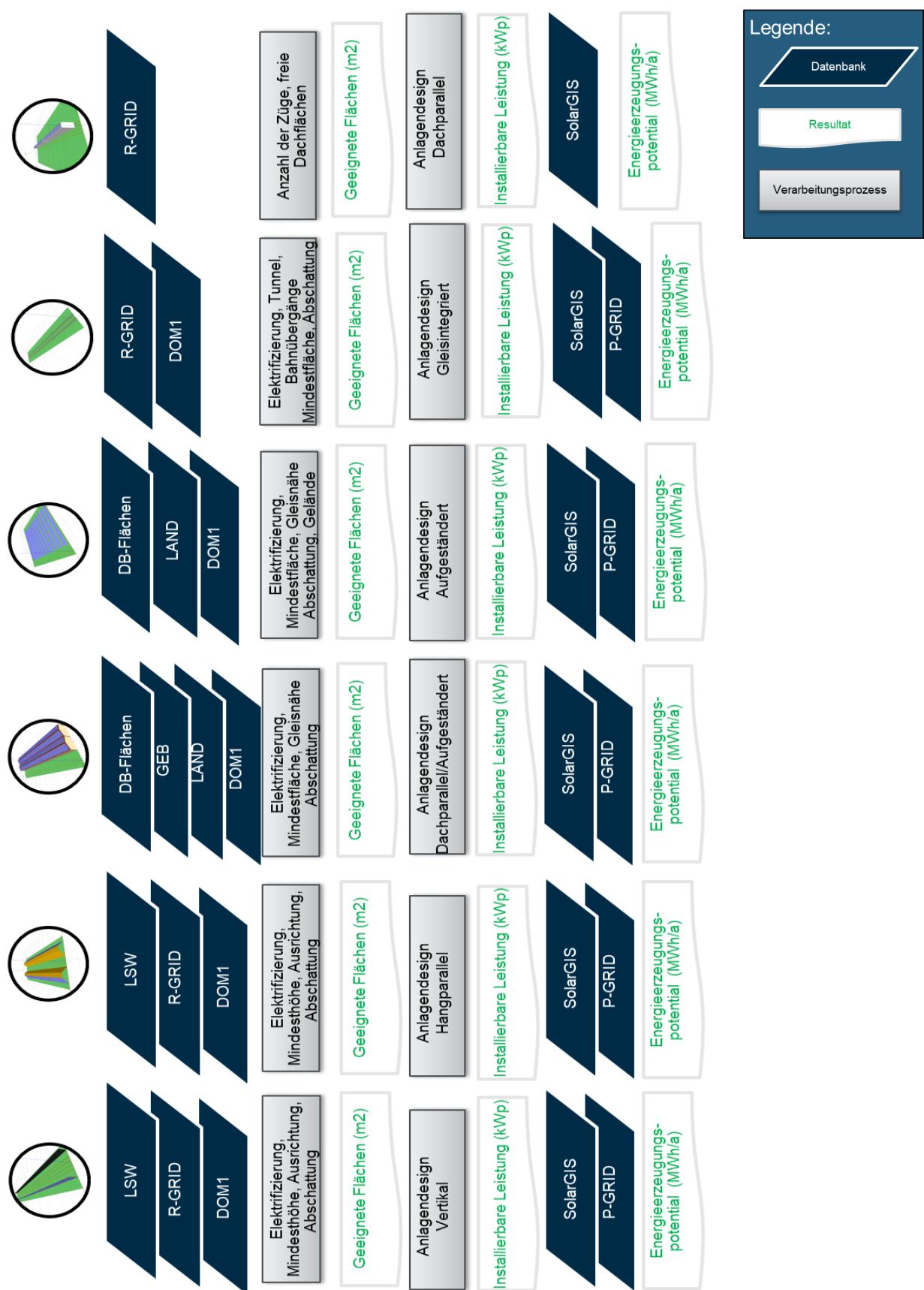


Abbildung 31: Analysemodelle unterteilt nach sechs Anwendungsklassen. Quelle: TÜV Rheinland

# 16 Ermittlung der geeigneten Flächen

Um die theoretisch und technisch-wirtschaftlich geeigneten Flächen für PV-Anwendungen zu bestimmen, werden alle Flächen selektiert, die die unter Abschnitt 14 in Tabelle 26 definierten Kriterien z. B. zur Ausrichtung, Neigung, Verschattung und der Mindestgröße an zusammenhängender Fläche erfüllen.

Je nach Anwendungsklasse basieren die in Kap. 11 dargestellten Bereiche der LCOE auf minimal und maximal erreichbaren spezifischen Jahresenergieerträgen. Z. B. werden abgeschattete Flächen, die zur Unterschreitung des definierten Grenzwertes führen, als ungeeignet eingestuft, während verschattungsfreie Bereiche die höchste Attraktivität hinsichtlich ihrer technisch-wirtschaftlichen Eignung erzielen.

Mögliche den Zug- oder Straßenverkehr störende Reflexionen des Sonnenlichtes an den Moduloberflächen sind zu berücksichtigen. Ebenso sind mögliche Blendungen für angrenzende Grundstücke, insbesondere Wohngrundstücke, zu berücksichtigen. Die Blendungsrisiken können erst bei der konkreten Projektplanung geprüft werden. Bei einem pauschalen Ausschluss, z. B. nach Ausrichtung, wären deutlich zu viele Flächen auszuschließen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass ein Teil der grundsätzlich nach Kapitel 14 als geeignet eingeschätzten Flächen noch reduziert wird, weniger günstig gestaltet werden kann oder auch ganz herausfällt.

Im Folgenden werden zu jeder Anwendungsklasse die ermittelten Flächen beschrieben und anschließend die Gesamtflächen betrachtet.

## 16.1 Anwendungsklasse 1: Im Gleisbett

Zur Bestimmung der theoretisch geeigneten Flächen zu Anwendungsklasse 1 – PV-Module auf den Schwellen des Gleisbetts – wurden die verfügbaren Informationen zu den Schienenwegen des deutschen Eisenbahnnetzes auf Basis des Infrastrukturregisters der DB herangezogen und nach den definierten Kriterien aus Kapitel 6 verarbeitet.

Die Streckenlänge der DB betrug 2021 33401 km, davon waren 20540 km elektrifiziert, siehe [108]. Da die Strecken zum Teil mehrgleisig ausgebaut sind, ist die Länge der Schienenwege deutlich höher: ca. 54000 km Gesamtlänge. Es wurden die Schienenwege ohne Elektrifizierung, in Tunnels und an Bahnübergängen ausgeschlossen. Von den in Deutschland rund 53639 km vorhandenen Schienenwege sind 38257 km elektrifiziert. Aufgrund der o. g. Kriterien reduziert sich die Länge des Schienenweges auf 37301 km.

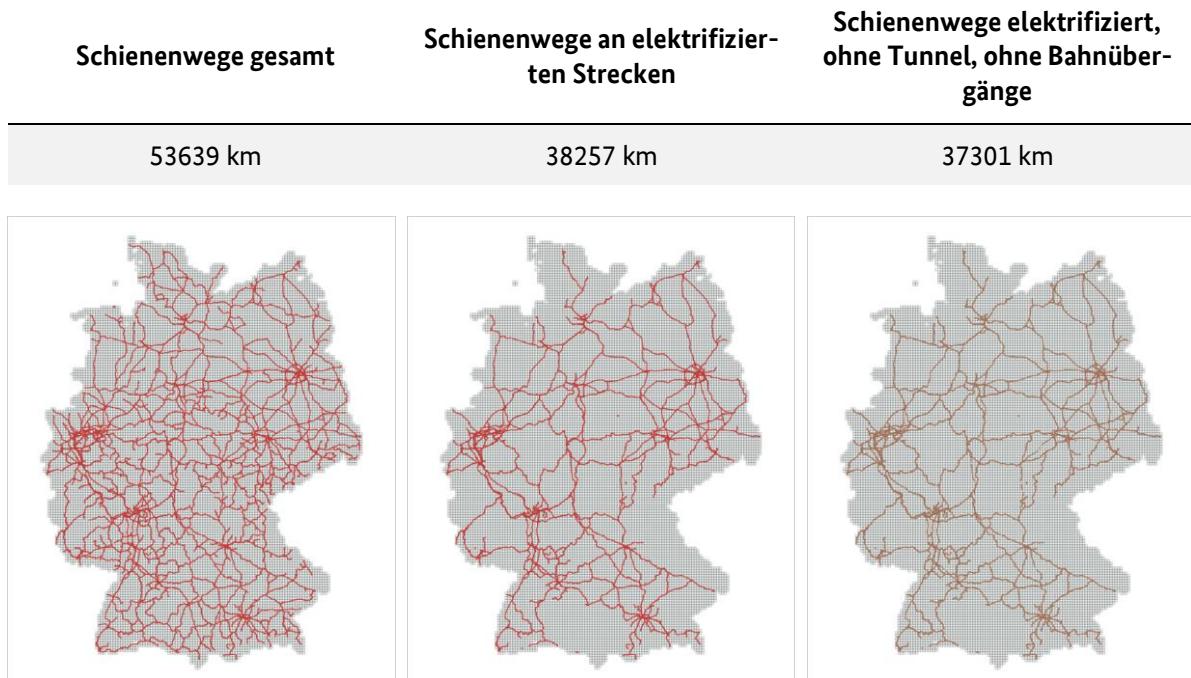


Abbildung 32: Geeignete Strecken zu Anwendungsklasse 1. Quelle: TÜV Rheinland

## 16.2 Anwendungsklassen 2 und 3: LS und Lärmschutzwall

Die Informationen zu den LSW und Lärmschutzwällen stammen aus Runde 4 der EU-Umgebungslärm-kartierung für Schienenwege von Eisenbahnen des Bundes und wurden vom EBA zur Verfügung gestellt. Als Selektionskriterien gelten die Nähe zu elektrifizierten Strecken, eine Mindesthöhe der Wände, sowie als wirtschaftlich-technische Kriterien eine Ausrichtung der Fläche von Osten über Süden nach Westen, eine Mindestanlagengröße und die Verschattungsfreiheit zur Wintersonnwende. Aufgrund erhöhter Blendrisiken, Belastungen durch Druck und Sog sowie Verschmutzung bei dem Gleis zugewandten PV-Modulen wurden nur dem Gleis abgewandten Seiten der Wände und Wälle betrachtet.

Von den insgesamt rund 2400 km LSW und –wällen liegen 2265 km in der Nähe zu elektrifizierten Strecken und 1005 km erfüllen die Kriterien an Mindesthöhe und Ausrichtung. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Wandhöhen der Mindestgröße, der Grenzwinkel 90° bis 270° Azimutausrichtung der Mordflächen und der Verschattungsfreiheit ergeben sich entlang von 1005 km LSW 2,3 km<sup>2</sup> technisch-wirtschaftlich nutzbare Fläche zu den Anwendungsklassen 2 und 3.

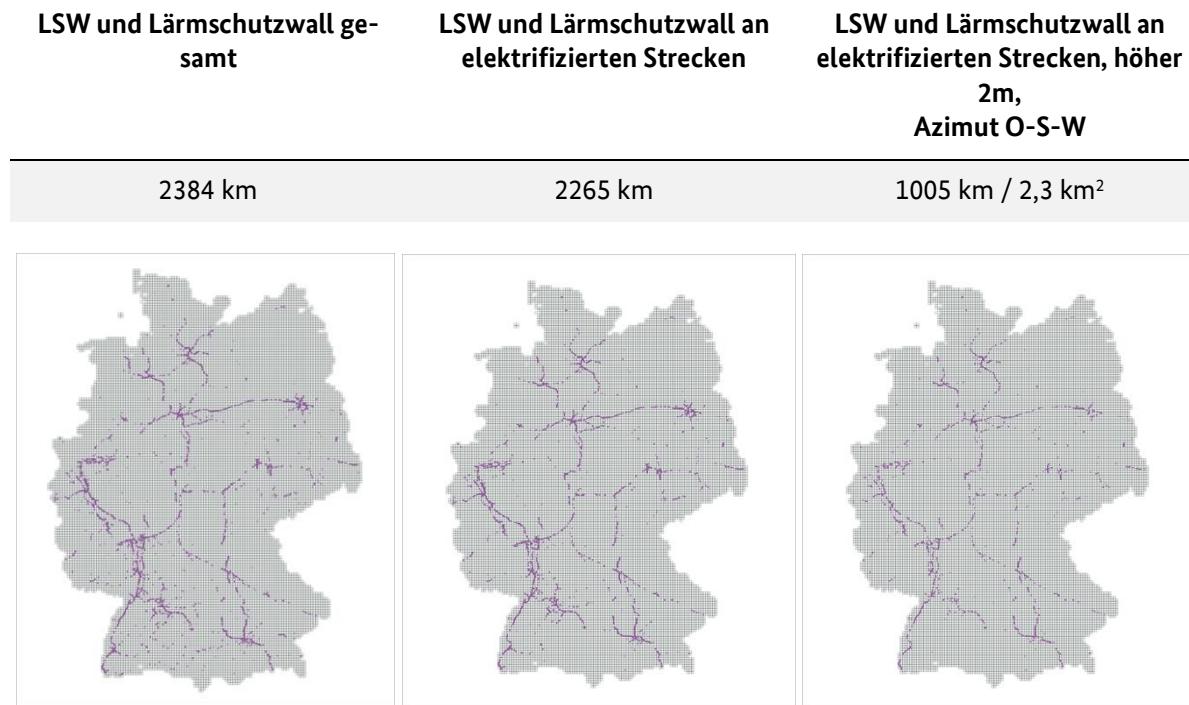


Abbildung 33: Geeignete Flächen zu Anwendungsklassen 2 und 3 (Zahlenwerte gerundet). Quelle: TÜV Rheinland

## 16.3 Anwendungsklasse 4: Bauliche Einrichtungen

Die Berechnung der geeigneten Grundflächen der baulichen Einrichtungen erfolgte basierend auf öffentlich verfügbaren Informationen zu deutschlandweit flächendeckenden Gebäudeumrisse, deren Nutzung und Informationen zu den bewirtschafteten Liegenschaften der DB. Des Weiteren wurden zur technisch-wirtschaftlichen Selektion Mindestgrößen definiert und ein verschattungsfreier Betrieb vorausgesetzt.

Insgesamt wurden ca. 21.000 bauliche Einrichtungen mit einer Gesamtfläche von 5,6 km<sup>2</sup> identifiziert. 25 % der Gebäude besitzen eine Grundfläche von unter 20 m<sup>2</sup>, 34 % liegen zwischen 20 m<sup>2</sup> und 100 m<sup>2</sup>, 30 % zwischen 100 m<sup>2</sup> und 500 m<sup>2</sup> und bei 11 % der Gebäude betragen die Grundflächen mehr als 500 m<sup>2</sup>. Nach Ausschluss von Objekten mit zu geringen Grundflächen verbleiben 5,5 km<sup>2</sup> an theoretisch geeigneten Flächen.

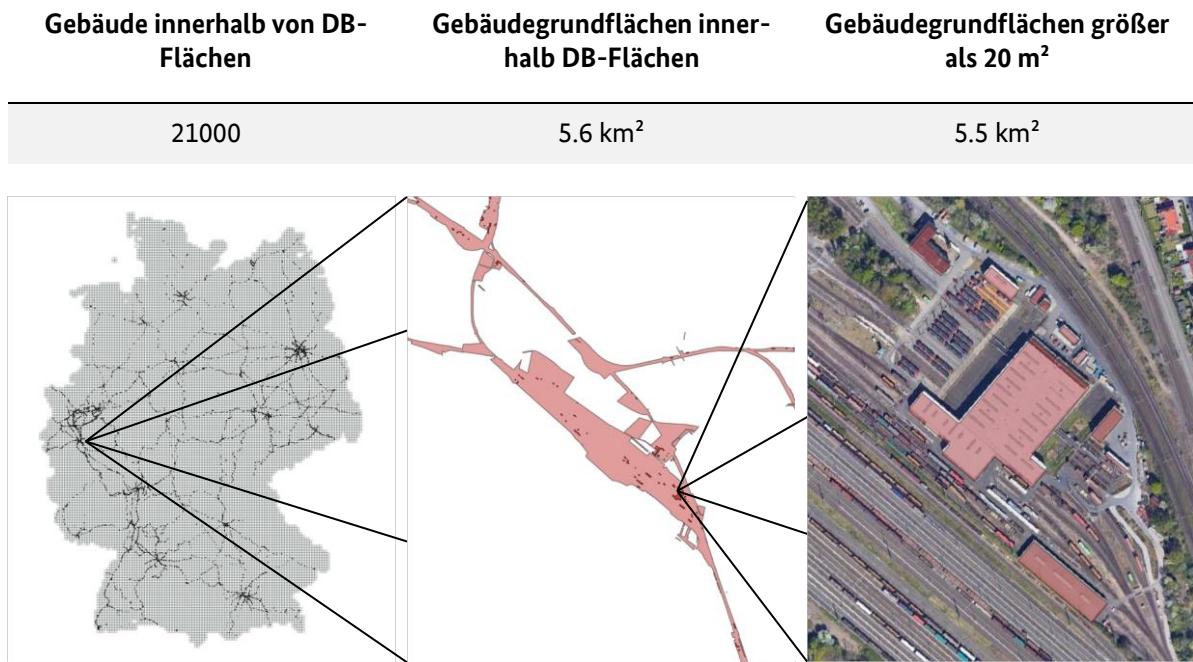


Abbildung 34: Geeignete Beispelflächen zu Anwendungsklasse 4 (Zahlenwerte gerundet). Quelle: TÜV Rheinland

## 16.4 Anwendungsklasse 5: Neben dem Schienenweg

Basierend auf den Kriterien aus Kap. 14, den bewirtschafteten Liegenschaften der DB und öffentlich verfügbarer Informationen zur Landnutzung wurden geeignete Freiflächen neben dem Schienenweg ermittelt.

Es steht insgesamt eine Freifläche von 5,8 km<sup>2</sup> innerhalb der bewirtschafteten Liegenschaften der DB zur Verfügung. Nach Ausschluss zu kleiner Flächen verbleibt eine Gesamtfläche von 5,7 km<sup>2</sup>. Diese Fläche entspricht in etwa der der nutzbaren baulichen Einrichtungen.

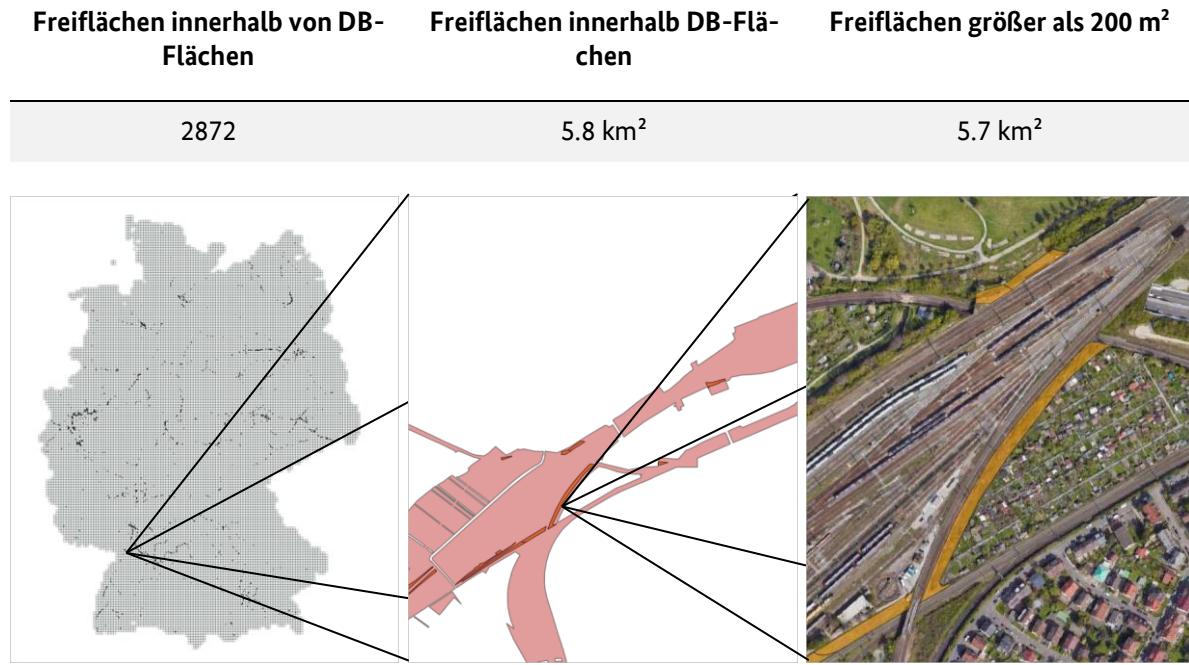


Abbildung 35: Geeignete Beispieldächer zu Anwendungsklasse 5 (Zahlenwerte gerundet). Quelle: TÜV Rheinland

## 16.5 Anwendungsklasse 6: Sonstige Installationsorte, Fahrzeugdach

Der schienengebundene Personenverkehr wird in Deutschland von einer hohen Anzahl Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie kann eine Berücksichtigung aller aktiven EVU nicht erfolgen. Es wird daher stellvertretend eine Analyse der Fahrzeugflotte der DB Fernverkehr vorgenommen, da für dieses Unternehmen die Recherche der eingesetzten Fahrzeugtypen sowie die Anzahl der Fahrzeuge aufgrund der frei zugänglichen Daten in den öffentlichen Internetportalen möglich ist und es sich um die größte EVU-Flotte Deutschlands handelt. Auf Basis der ermittelten Ergebnisse für die DB Fernverkehr wird eine vereinfachte Hochrechnung für die DB Regio vorgenommen. Des Weiteren wurde auf die Analyse des Schienengüterverkehrs verzichtet, da der öffentlich freie Zugang zu entsprechenden Fahrzeugdatenbanken nicht gegeben ist. Zudem ist bei Güterwagen die Selbstnutzung erzeugter Leistung bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Kühlwagen) aufgrund nicht vorhandener Verbraucher nicht gegeben. Es ist weiterhin festzustellen, dass die Anzahl der Kühlwagen, verglichen zur Gesamtzahl aller Güterwagen, sehr gering ist. (Zur Information: Mit Stand 2021 waren bei der DB AG 80.517 Güterwagen im Bestand, [110].).

Die Fahrzeugflotte der DB Fernverkehr umfasst mit Stand vom 31. Dezember 2020 insgesamt 315 ICE [111] und 176 IC [111]. Die ICE-Flotte der DB soll bis Ende des Jahrzehnts auf insgesamt rund 450 Züge anwachsen. Seitens DB Fernverkehr wird die Vergrößerung der Fahrzeugflotte langfristig um rund 25 % auf bis zu 600 Züge [111] angestrebt. Diese Steigerung soll durch die Beschaffung von über 300 neuen ICE 4-, IC 2- und ECx-Fahrzeugen sowie eine Erweiterung der 300 km/h-schnellen Hochgeschwindigkeitsflotte erreicht werden [111]. Die Anzahl der Sitzplätze der ICE-Flotte soll von 152.000 in 2020 auf 220.000 bis 2026 erhöht werden [111].

Nachfolgende Tabelle enthält eine Übersicht der Fahrzeugflotte der DB Fernverkehr.

TABELLE 28: FAHRZEUGFLOTTE DB FERNVERKEHR ([111], [112], [113], [114])

Fahrzeugtyp	Betriebsaufnahme	Anzahl
ICE 1	1991	40 [114]
ICE 1 modernisiert	ab 2020	18 [114]
ICE 2	1996	44 [114]
ICE 3	ab 2000	62 [114]
ICE T	ab 1999	70 [114]
ICE 3 neo	90 sukzessive ab 2022	13 (Stand: Okt. 2023) [114]
ICE 4	2017	112 [114]
ICE L	ab 2024	23 (bestellt) [113]
Intercity 1	1971	113 Züge (Stand Dez. 2020) [111]
Intercity 2 (6-teilig)	2015	63 (Stand Dez. 2020) [111]
ECx	ab 2023	23 (bestellt) (Stand Dez. 2020) [112]

Die Fahrzeugflotte der DB Fernverkehr besteht aus Fahrzeugen verschiedener Hersteller und unterschiedlichen Fahrzeugkonstellationen (Anzahl der Fahrzeuge und Zuglänge).

TABELLE 29: FAHRZEUGTYPEN DER DB FERNVERKEHR ([110], [111], [112], [113], [114])

Fahrzeugtyp	Hersteller	Anzahl Wagen	Länge	Anmerkung
ICE 1	AEG, ABB, Henschel, Krauss-Maffei, Krupp, Siemens u. a.	zwölf Mittelwagen, zwei Triebköpfe	358 m	Längenangabe für Zug
ICE 1 modernisiert	AEG, ABB, Henschel, Krauss-Maffei, Krupp, Siemens u. a.	neun Mittelwagen, zwei Triebköpfe	279 m	Längenangabe für Zug
ICE 2	Siemens/Adtranz u. a.	44 Züge (sechs Mittelwagen, ein Steuerwagen)	205 m	Längenangabe für Zug
ICE 3	Siemens/Bombardier	acht Wagen	200 m	Längenangabe für Zug
ICE T	Siemens, Bombardier, Alstom	fünf Wagen pro Halbzug	133 m	Längenangabe für Halbzug
ICE T	Siemens, Bombardier, Alstom	sieben Wagen pro Halbzug	185 m	Längenangabe für Halbzug

Fahrzeugtyp	Hersteller	Anzahl Wagen	Länge	Anmerkung
ICE 3 neo	Siemens	zwei Endwagen und sechs Mittelwagen	201 m	Längenangabe für Zug
ICE 4	Siemens	50 zwölfteilige Züge	346 m	Längenangabe für Zug
ICE 4	Siemens	43 dreizehnteilige Züge	374 m	Längenangabe für Zug
ICE 4	Siemens	19 siebenteilige Züge	202 m	Längenangabe für Zug
ICE L	Talgo	eine Lokomotive und 17 Wagen	256 m	Ersatz für IC 1
Intercity 1		variabel (6 – 11 Wagen pro Zug)	26,4 m	Längenangabe für Wagen
Intercity 2 (6-teilig)	Stadler	fünf Wagen und eine Lok	135 m	Längenangabe für Zug ohne Lok
ECx	Talgo	eine Lokomotive und 17 Wagen	255 m	Längenangabe für Zug

Neben der Fahrzeulgänge der verschiedenen Züge ist insbesondere für eine Aus- und Nachrüstung mit PV-Modulen die Fahrzeugbreite und die indirekt daraus ableitbare nutzbare Dachfläche von Bedeutung. Die Fahrzeugbreite ist je nach Zugtyp (Baureihe) unterschiedlich und sie beträgt beispielsweise 2950 mm bei dem ICE 3. Im Vergleich dazu beträgt die Fahrzeugbreite beim ICE 1 ca. 3020 mm und beim Intercity 2 ca. 2.784 mm. Die Fahrzeugdachflächen sind jedoch nur eingeschränkt für eine Aus- und Nachrüstung mit PV-Paneele geeignet, da im Dachbereich in vielen Fällen technische Komponenten (z. B. Klimaanlagen, Stromabnehmer, Umrichter etc.) verbaut sind. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Dachflächen moderner Passagierschienenfahrzeuge, wenn überhaupt, nur in kleinen Bereichen als flache bzw. ebene Oberflächen ausgelegt sind. In der Regel ist der größte Teil der Dachfläche gewölbt. Insofern ist eine Aus- und Nachrüstung auch nur mit speziell für einen spezifischen Wagentyp entwickelten und ausgeformten passgenauen PV-Modulen, oder mit flexiblen Systemen (z. B. Dünnschichtmodule Avancis), möglich.

Für die hier beschriebene Ermittlung des Potenzials von PV-Modulen auf Fahrzeudächern kann zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussage zu den Kosten für speziell für einen spezifischen Wagentyp zu entwickelnde PV-Module getroffen werden. Es ist auch gesondert zu untersuchen, ob der Aufwand für die Entwicklung und Herstellung nutzbarer Fahrzeudach-PV-Module bei der verhältnismäßig doch geringen Anzahl der Fahrzeuge aus wirtschaftlichen Aspekten sinnvoll bzw. vertretbar ist.

Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten wird auf eine fahrzeugtypenspezifische und präzise Ermittlung der nutzbaren Dachfläche an dieser Stelle verzichtet. Es wird stattdessen eine vereinfachte Vorgehensweise zur Abschätzung der nutzbaren Dachflächen unter Berücksichtigung der Zuglängen und -breiten unter folgenden Annahmen vorgenommen und in nachfolgender Tabelle dargestellt:

- Fahrzeugbreite pauschal 3.000 mm;
- angenommene Flächennutzung von 70 %

TABELLE 30: FAHRZEUGTYPEN UND NUTZBARE DACHFLÄCHEN

Fahrzeug	Anzahl	Länge	Anmerkung	Nutzbare Dachfläche [m <sup>2</sup> ]
ICE 1	40	358 m	Längenangabe für Zug	30072
ICE 1 modernisiert	18	279 m	Längenangabe für Zug	10546
ICE 2	44	205 m	Längenangabe für Zug	18942
ICE 3	62	200 m	Längenangabe für Zug	26040
ICE T	11	133 m	Längenangabe für Halbzug	3072
ICE T	59	185 m	Längenangabe für Halbzug	22922
ICE 3 neo	90	201 m	Längenangabe für Zug	37989
ICE 4	50	346 m	Längenangabe für Zug	36330
ICE 4	43	374 m	Längenangabe für Zug	33722
ICE 4	19	202 m	Längenangabe für Zug	8060
ICE L	23	256 m	Ersatz für IC 1	12365
Intercity 1	825	26,4 m	Längenangabe für Wagen	45738
Intercity 2 (6-teilig)	40	135 m	Längenangabe für Zug ohne Lok	11340
ECx	23	255 m	Längenangabe für Zug	12317

Für die betrachtete Flotte der DB Fernverkehr mit den ermittelten 1347 Fahrzeugen ergibt sich somit eine für die Aus- und Nachrüstung der Fahrzeuge verfügbare Dachfläche von ca. 309.000 m<sup>2</sup>.

## 16.7 Gesamtflächen

Die ermittelten Flächen aus den einzelnen Anwendungsklassen sind in Tabelle 31 zusammengefasst.

TABELLE 31: ERMITTELTE FLÄCHEN

Anwendungsklasse	Theoretisch geeignete Flächen/Stecken
AK1	37301 km (ca. 15,6 km <sup>2</sup> Modulfläche)
AK2&AK3	2,3 km <sup>2</sup>
AK4	5,6 km <sup>2</sup>
AK5	5,7 km <sup>2</sup>
AK6	0,3 km <sup>2</sup>

Diese Aufstellung zeigt, dass insgesamt grob eine 30 km<sup>2</sup> große Fläche für PV-Installationen in der Schieneninfrastruktur der DB zur Verfügung steht. Dies entspricht einer Fläche von ca. 4300 Fußballfeldern.

Eine erste grobe, überschlägige Ertragsabschätzung ergibt mit einem angenommenen Flächennutzungsgrad von 0,5 (der nach den Erfahrungen der Fachexperten in etwa dem Durchschnittswert entspricht) eine installierbare PV-Leistung von ca. 3 Gigawatt Peak (GWp). Bei durchschnittlichen 1000 kWh/kWp pro Jahr in Deutschland ergibt dies eine erzeugbare Energie von 3000 GWh jährlich. Im Vergleich dazu erzeugten laut Fraunhofer ISE deutschlandweit PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 66 GWp rund 57600 GWh Solarenergie im Jahr 2022.

# 17 Ermittlung des Einspeisepotenzials

Nachdem die theoretisch geeigneten und die technisch-wirtschaftlich zu bevorzugende Flächen und Strecken bestimmt wurden, erfolgt die Ermittlung des Einspeisepotenzials. Die Berechnung orientiert sich an validierten Modellen, die bei der Energieertragsberechnung von PV-Systemen zur Anwendung kommen. Dazu zählt die Transposition der Sonneneinstrahlung auf die ausgerichtete Fläche, die Reduktion durch ertragsmindernde Umweltfaktoren, wie z. B. Verschmutzung und Verschattung, und auch technologische Minderungsfaktoren, wie z. B. temperaturbedingte und alterungsbedingte Leistungsreduktionen der PV-Module und Wechselrichter.

Die einfachste mathematische Form, um die Energieerzeugung abzuschätzen, nimmt die Modul-Wirkungsgrad  $\eta$  als Konstante an:

$$E = \eta * A * H$$

$H$  ist die jährliche Einstrahlung je Flächeneinheit (von der Sonne auf das PV-Modul übertragene Gesamtenergie);  $A$  die Modulfläche. Wenn die Einstrahlung nicht in der Modulebene verfügbar ist, wird die gegebene Einstrahlung auf die horizontale Ebene mit Hilfe von Transpositionsmodellen in die Modulebene umgerechnet.

Neben dem Wirkungsgrad des PV-Moduls führen weitere Effekte während des Betriebs der PV-Anlage zu Einbußen beim Energieertrag. Einige der Verlustfaktoren sind klimaabhängig, andere wiederum sind von technischen und betrieblichen Aspekten abhängig und müssen für die Studie berücksichtigt werden. Die Energieverluste, die während des Betriebs der PV-Anlage auftreten können, werden wie folgt zusammengesetzt.

Die Berechnung der effektiven Einstrahlung in der Modulebene basiert auf einem Transpositionsmodell. Ausgehend von diesem Standort und den geneigten Modulen ist die Einstrahlung in der Modulebene höher (südlich orientierte Module) bzw. niedriger (nördlich orientierte Module) im Vergleich zur globalen horizontalen Einstrahlung.

Die optimale Ausrichtung für den Standort Bonn liegt bei  $35^\circ$  Neigung und Südausrichtung bei einem Energiegewinn von 17 % gegenüber der horizontalen Ebene. In Abbildung 36 ist der Transpositionsfaktor (FT) für verschiedene Ausrichtungen und Neigungen für diesen Standort nach eigenen Berechnungen dargestellt.

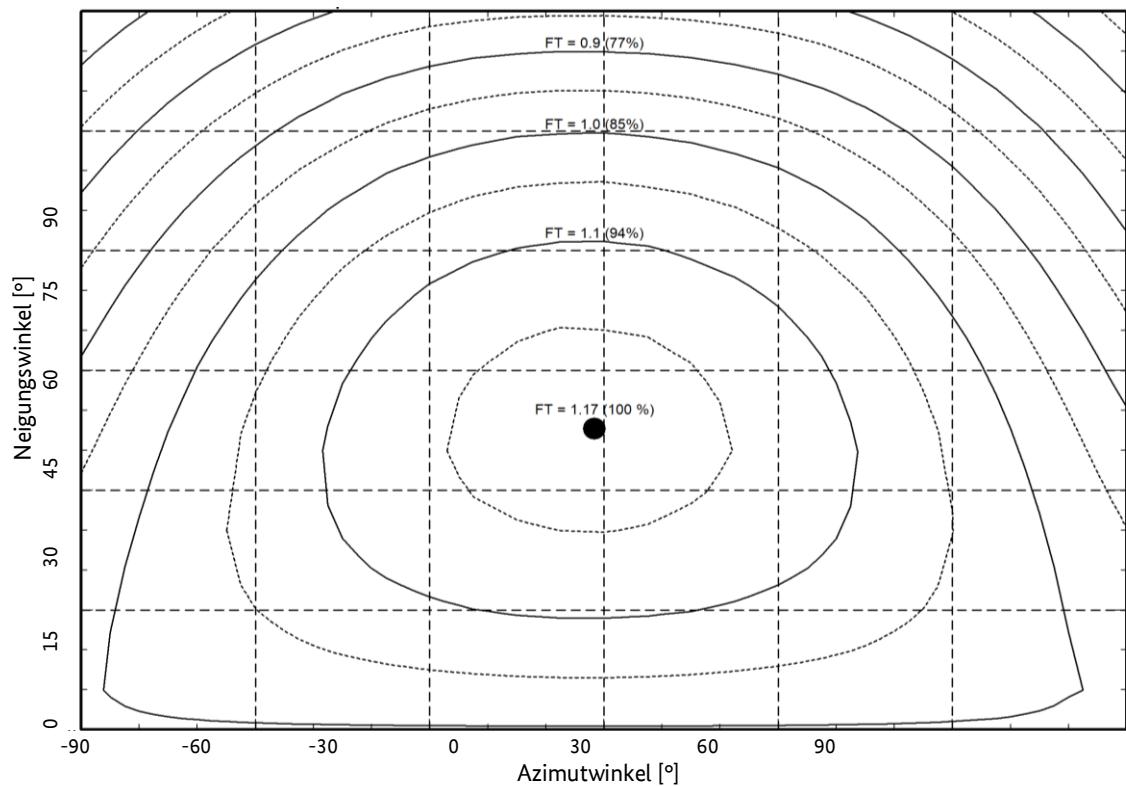


Abbildung 36: Verschiedene Ausrichtungen und Neigungen mit Transpositionsgewinnen am Standort Bonn. (Anm.: Ein Azimut von  $0^\circ$  entspricht in dieser Abbildung der Ausrichtung nach Süden.)

Quelle: TÜV Rheinland

#### Zu berücksichtigende Verlustfaktoren

Das Licht, das auf die Ebene des Feldes (auf die Oberseite des Moduls) fällt, steht allerdings nicht vollumfänglich für die Umwandlung in Energie durch das PV-System zur Verfügung.

Optische Verluste durch Reflexion an der Vorderseite des PV-Moduls und, in geringerem Maße, durch spektrale Schwankungen verringern die Bestrahlungsstärke, die effektiv in Gleichstrom umgewandelt wird.

Verschmutzungsverluste werden durch die Anhäufung von Partikeln verursacht, beispielsweise durch Vogelkot, aufgrund landwirtschaftlicher Aktivitäten, aufgrund von Laubfall, Staub, Pollen, Schnee und andere. Der genaue Verlustfaktor hängt von den klimatischen und umwelttechnischen Bedingungen ab.

Unter Berücksichtigung der geringen Luftverschmutzung und unter Berücksichtigung von ganzjährigen Regenfällen wird ein jährlicher Verschmutzungsverlust von durchschnittlich 1 – 5 % angenommen. Bei vertikal installierten Modulen ist aufgrund des Selbstreinigungseffekts mit Verlusten von unter 1 % zu rechnen, während an horizontal installierten Modulen ohne gesonderte Reinigung 5 % mehr an jährlichen Verlusten zu erwarten ist. [118]

Die Betriebstemperatur von PV-Modulen und den Zellen in den Modulen wirkt sich auf die Leistung des PV-Systems aus. Typische PV-Zellen verlieren mit steigender Temperatur an Effizienz. Die Datenblätter der PV-Module weisen die zutreffenden Wärmekoeffizienten für die elektrischen Kenngrößen auf.

Zur Berechnung der zu erwartenden Modultemperatur  $T_c$  aus der Umgebungstemperatur wird ein häufig angewendetes Modell, basierend auf Faiman, verwendet:

$$T_c = T_a + \frac{\alpha E_e (1 - \eta_m)}{U_0 + U_1 WS}$$

$T_a$  ist die Lufttemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$\alpha$  ist der Absorptionsgrad des Moduls (typischer Wert ist 0,9),

$E_e$  ist die Einstrahlung auf das Modul,

$\eta_m$  ist der Wirkungsgrad des Moduls (Bereich zwischen 0,08 – 0,2),

WS ist die Windgeschwindigkeit (m/s),

$U_0$  ist der konstante Wärmeübergangskoeffizient,

$U_1$  ist der konvektive Wärmedurchgangskoeffizient,

Typische Werte für  $U_0$  und  $U_1$  liegen zwischen 23,5 und 26,5 bzw. 6,25 und 7,68.

Die auf dem Typenschild eines PV-Moduls angegebene Leistung weicht oft von der gemessenen Leistung ab. Die meisten Hersteller geben heute eine Toleranz von 0 W bis +5 W an. Darüber hinaus liegen die Messunsicherheiten, die von den Herstellern angegeben werden, in der Regel zwischen 3 % und 5 %. Diese Unsicherheit kann durch unabhängige Prüfeinrichtungen erheblich verringert werden, die in der Regel eine Garantie für die Messwerte auf ca.  $\pm 1,6$  % bis  $\pm 2$  % bedeuten. Außerdem kann das unterschiedliche Degradationsverhalten der PV-Module innerhalb des Arrays (d. h. erhöhte Standardabweichung von Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung) weitere Mismatch-Verluste verursachen, die sich im Laufe der Zeit ändern können.

Lichtinduzierte Degradation (LID) ist ein Leistungsverlust, der bei kristallinen Modulen bereits in den ersten Stunden der Sonneneinstrahlung auftritt. Er kann sich auf die tatsächliche Leistung auswirken, und zwar in Bezug auf die von den Modulherstellern gelieferten endgültigen Leistungsdaten. Der LID-Effekt tritt nur bei herkömmlichen p-Typ Bor-dotierten Wafern auf. Unkonventionelle Technologien, die n-dotierte Wafer verwenden, sind nicht so stark betroffen. In dieser Studie wird ein LID-Verlust von 1,0 % angenommen.

Der serielle Anschluss von Modulen an Strings und die Parallelschaltung mehrerer Strings verursachen Leistungsverluste im Vergleich zur Summe der Leistung jedes einzelnen Moduls bei STC. Außerdem ist die Länge der DC-Stringkabel unterschiedlich und verursacht unterschiedliche Spannungsverluste pro String, was zusätzlich zu sogenannten Mismatch-Verlusten führt. Die Höhe der Verluste hängt vor allem von den Anschlussbedingungen der Strings und von den Modulparametern ab. Die Mismatch-Verluste können bei STC mit 1,0 % – 2,0 % angenommen werden.

Wechselrichterverluste während des Betriebs sind Verluste aufgrund der Umwandlung von Gleichstrom (DC) in Wechselstrom (AC), MPP-Tracking-Fehler und Eigenverbrauch des Wechselrichters. Modelle für die Wechselrichterleistung zielen darauf ab, dieses komplexe Verhalten mathematisch darzustellen. Die Modelle beruhen auf Messungen von Prüflaboren, die den Wirkungsgrad bei bestimmten Gleichstrom- und Spannungswerten messen.

Die Auswirkung der Degradation der PV-Module im Laufe der Zeit wird in der derzeitigen Praxis häufig mit einer jährlichen Rate von etwa -0,3 % bis -0,7 % pro Jahr für kristalline Silizium-PV-Module und etwa -0,8 % bis -1,0 % pro Jahr für Dünnschichttechnologien angenommen. Die Berücksichtigung einer Degradationsrate und ihr Verhalten im Laufe der Zeit hat direkte Auswirkungen auf den erwarteten Ertrag.

Das bekannteste Maß für die Leistung von PV-Anlagen ist die Performance Ratio (PR). Die PR ist ein Maß für die Effizienz der gesamten Anlage bei der Umwandlung von Sonneneinstrahlung in Wechselstrom und kann als ein Maß für den Energieertrag  $E$  betrachtet werden, das sowohl für die Größe der Anlage  $P_n$  (Nennleistung) als auch für die verfügbare Sonnenenergie  $H$  normiert ist. Die PR erfasst daher

die kombinierte Wirkung aller Verluste, die innerhalb der Anlage auftreten, einschließlich der Module, Wechselrichter, Transformatoren, elektrischen Verkabelung und System- oder Netzausfallzeiten.

$$PR = \frac{E}{P_n} \frac{1000}{H}$$

Je näher der für eine PV-Anlage ermittelte PR- Wert an 100 % liegt, desto effektiver arbeitet diese PV-Anlage. Ein Wert von 100 % ist jedoch real nicht zu erreichen, da beim Betrieb der PV-Anlage die beschriebenen Verluste auftreten. Leistungsfähige PV-Anlagen erreichen eine Performance Ratio zwischen 80 % – 90 % [115].

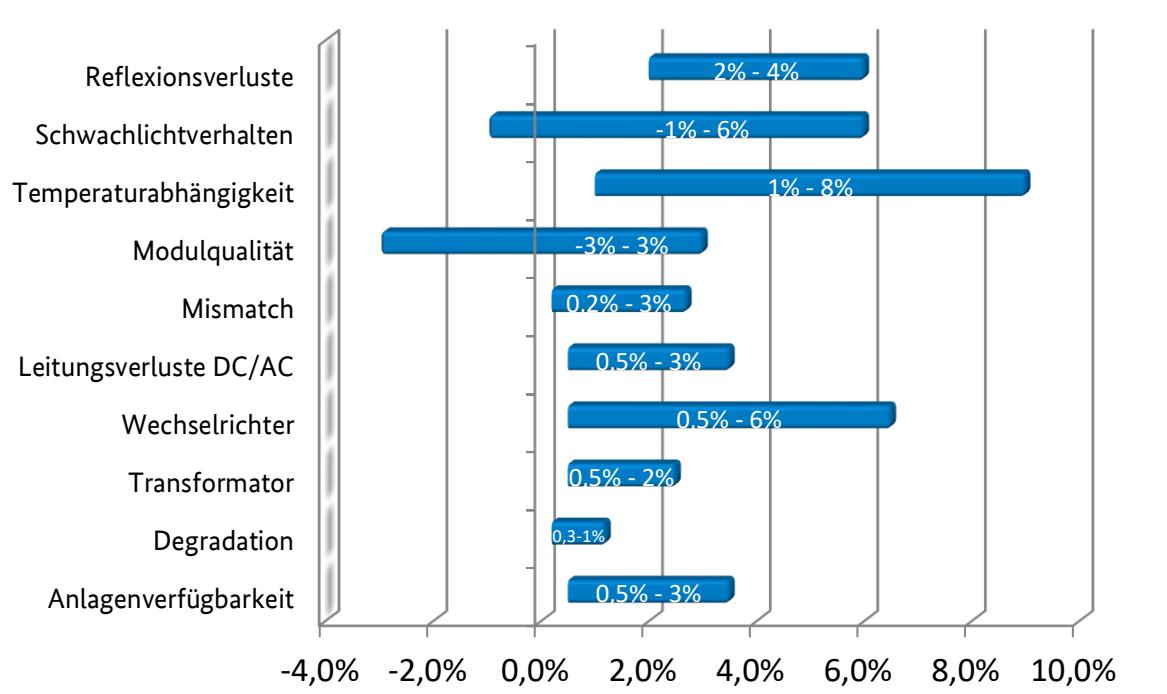


Abbildung 37: Übersicht der Größe von Verlustfaktoren. Quelle: TÜV Rheinland

Die Anlagenverfügbarkeit gibt den Anteil der Zeit an, in der die PV-Anlage Strom produziert. Sie wird ausgedrückt als das Verhältnis zwischen der Dauer der Produktion und dem gesamten Aufzeichnungszeitraum. Unter guten Betriebsbedingungen werden Verfügbarkeiten von 99 % und mehr erreicht, so dass die entsprechenden Verluste aufgrund der Verfügbarkeit 1 % oder weniger betragen. Geringere Verfügbarkeiten können als Indikator für Störungen oder mangelndes Betriebsmanagement aufgefasst werden.

In Abbildung 37 werden anznehmende Verlustfaktoren bei der solaren Energiegewinnung dargestellt. Zudem werden in Tabelle 32 die einzelnen Verlustfaktoren je nach Anwendungsklasse vorgestellt. Während die Faktoren Modulqualität, Mismatch und Wechselrichter sich in den Anwendungsklassen nicht unterscheiden, steigen die Verluste aufgrund von Verschmutzung mit flacheren Aufstellwinkeln. Eine beschleunigte Leistungsdegradation ist unter erhöhter Belastung im Gleisbett oder auf fahrenden Fahrzeugdächern zu erwarten.

TABELLE 32: VERLUSTFAKTOREN JE ANWENDUNGSKLASSE

	AK1	AK2	AK3	AK4	AK5	AK6
<b>Verschmutzung</b>	-3,0 %	-0,5 %	-1,0 %	-2,0 %	-1,0 %	-2,0 %
<b>Modulqualität</b>	+0,4 %	+0,4 %	+0,4 %	+0,4 %	+0,4 %	+0,4 %
<b>Mismatch</b>	-2,0 %	-2,0 %	-2,0 %	-2,0 %	-2,0 %	-2,0 %
<b>Wechselrichter</b>	-2,0 %	-2,0 %	-2,0 %	-2,0 %	-2,0 %	-2,0 %
<b>Leitungsverluste</b>	-0,6 %	-0,5 %	-0,7 %	-0,7 %	-0,8 %	-0,7 %
<b>Transformator</b>	-1,0 %	-1,0 %	-1,0 %	-	-1,0 %	-
<b>Degradation</b>	-0,7 %/a	-0,5 %/a	-0,3 %/a	-0,3 %/a	-0,3 %/a	-0,7 %/a

Neben den genannten Faktoren haben Verschattungen der PV-Anlage einen signifikanten Einfluss auf den erzielbaren Ertrag. So können Geländeerhebungen in der Umgebung die verfügbaren Sonnenstunden pro Tag reduzieren, oder naheliegende Objekte, wie z. B. hoher Bewuchs und Gebäude, zu temporären Verschattungen der Moduloberfläche und folglich Ertragseinbußen führen. Die Quantität dieses Effektes hängt maßgeblich vom individuellen Standort ab, und wurde im Rahmen der Studie basierend auf detaillierten Oberflächenmodellen näher untersucht.

Aufgrund von Verschattungen können sich die geeigneten Flächen und folglich die PV-Potenziale erheblich reduzieren, wie in Abbildung 38 an einem Beispiel zu sehen ist. Im linken Bild sind alle Flächen mit potenzieller Verschattung zur Wintersonnwenden schwarz hinterlegt. Die betroffenen Flächen innerhalb der relevanten Bewirtschaftungsbereiche sind im mittleren Bild markiert. Ganz rechts sind die schließlich selektierten verschattungsfreien Flächen zu erkennen.

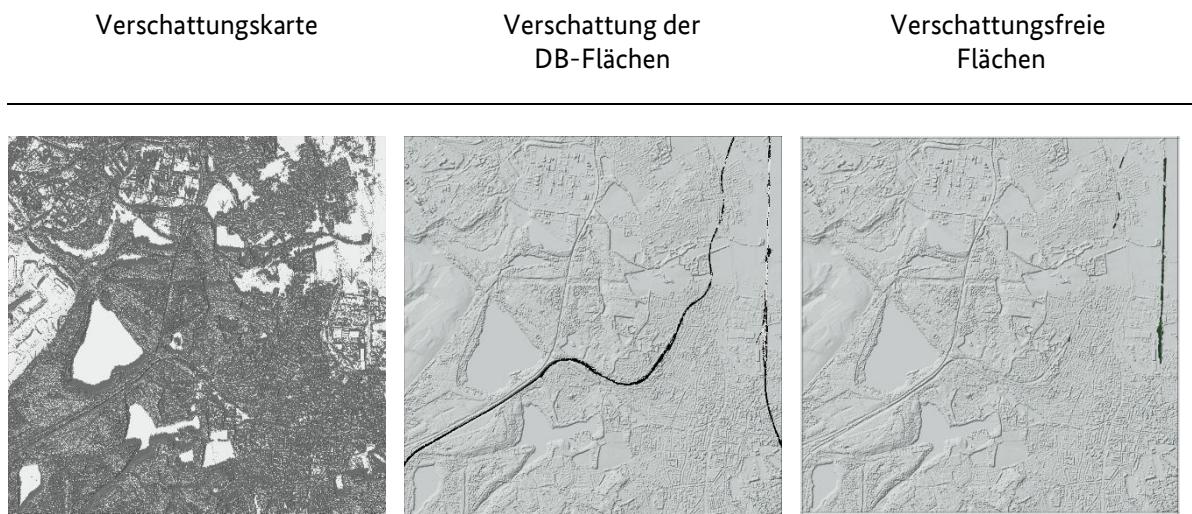


Abbildung 38: Beispiel zur Ermittlung der verschattungsfreien Flächen. Quelle: TÜV Rheinland

Basierend auf den beschriebenen Berechnungsmethoden werden nachfolgend die ermittelten installierbaren PV-Leistungen unterteilt nach Anwendungsfall dargestellt. Die daraus berechneten potenziell erzeugbaren Jahresenergieerträge werden abschließend in drei Szenarien diskutiert.

## 17.1 Anwendungsklasse 1: Im Gleisbett

Von den 37301 km theoretisch geeigneten Schienenwegen wurden unter Anwendung der oben beschriebenen Kriterien 24,6 % als technisch sinnvoll identifiziert, um diese Anwendungsklasse umzusetzen.

Insgesamt lassen sich damit ca. 1600 MWp PV-Leistung gleichmäßig verteilt auf das deutsche Schienennetz installieren. Die Mindestanlagengröße liegt bei 100 kWp (ca. 500 m). Die jährlich zu erwartenden Anlagenerträge liegen zwischen 850 kWh/kWp und 1050 kWh/kWp und führen zu einem Gesamterzeugungspotenzial von 1500 GWh pro Jahr.

Gleichzeitig ist zu erwähnen, dass eine kurzfristige Umsetzung der PV-Installation im Gleisbett selbst als unwahrscheinlich gilt, da aktuell noch keine Marktreife für die Komponenten (wie z. B. Module, Verkabelung, Befestigung) vorliegt (siehe Kap. 9) und auch nicht absehbar ist, dass sie unmittelbar bevorsteht.

AK1: Im Gleisbett installierbare PV-Leistung

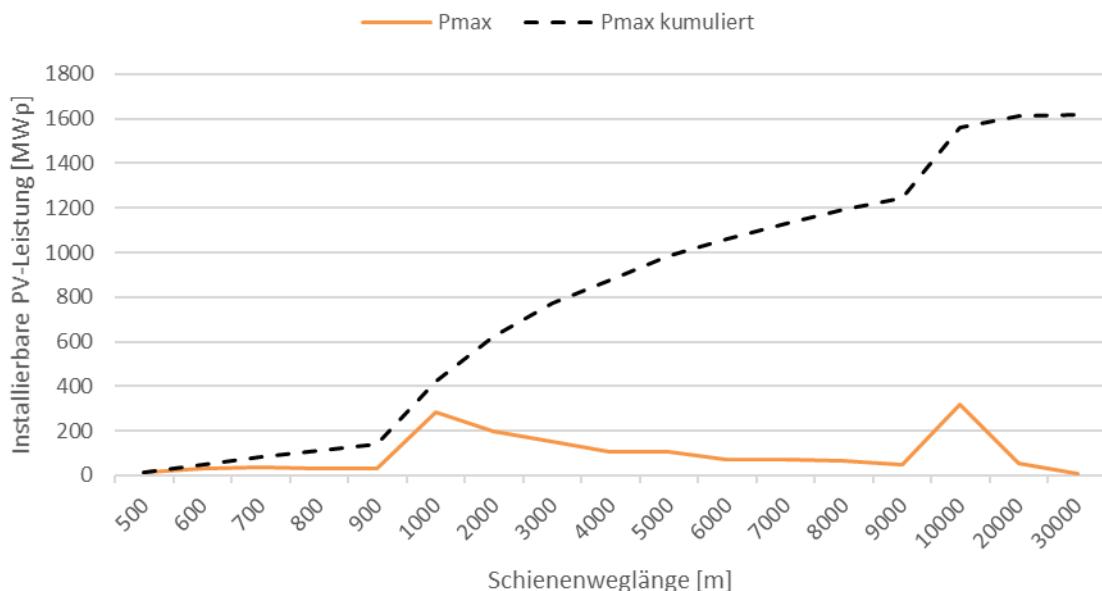


Abbildung 39: Im Gleisbett installierbare PV-Leistung. Quelle: TÜV Rheinland

## 17.2 Anwendungsklassen 2 und 3: LSW und Lärmschutzwällen

Von den 2400 km errichteten LSW und Lärmschutzwällen erfüllen 1000 km die erforderlichen Kriterien einer technischen Machbarkeit. Ausgenommen ist die Überprüfung der Standsicherheit in Bezug auf Aufnahmefähigkeit zusätzlicher Lasten durch die PV-Anlage. An diesen Strecken können insgesamt 470 MWp PV-Leistung installiert werden, deren Jahresertrag 350 GWh beträgt. Auf eine Mindestwandfläche von 100 m<sup>2</sup> können Anlagen von 20 kWp errichtet werden. Die längsten Anlagenpotenziale erstrecken sich über 2 km LSW mit einer PV-Leistung von 1 MWp.

Unter technisch-wirtschaftlichen Aspekten sind davon 70 MWp kurzfristig zu LCOE von 12 ct/kWh – 18 ct/kWh realisierbar.

### AK2: An LSW installierbare PV-Leistung

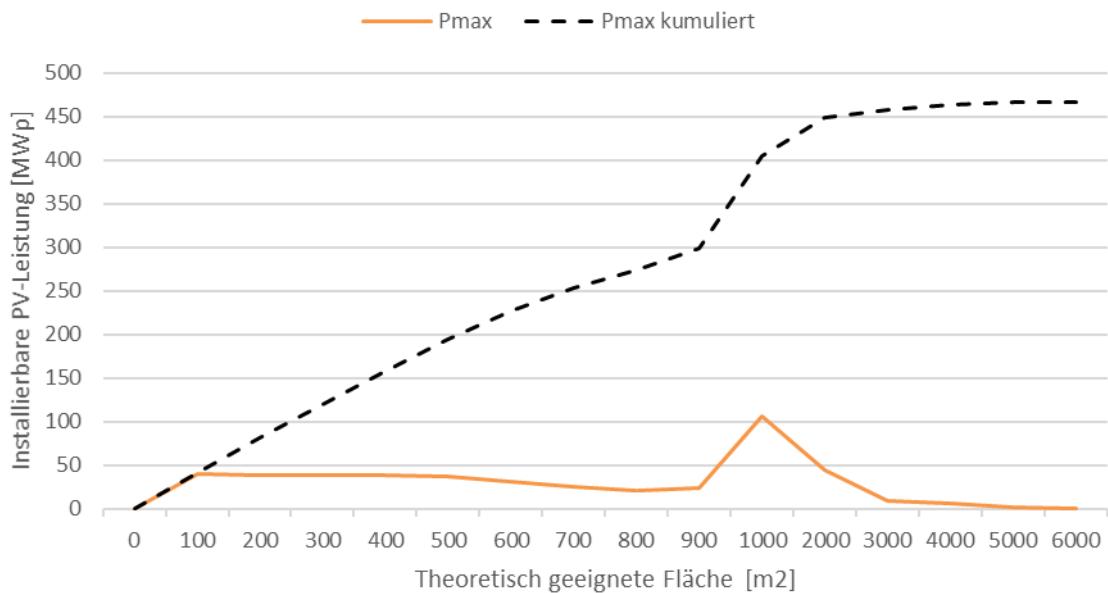


Abbildung 40: An LSW und -wällen installierbare PV-Leistung. Quelle: TÜV Rheinland

## 17.3 Anwendungsklasse 4: Bauliche Einrichtungen

Mehr als 15000 Objekte von den ursprünglich 21000 als Bewirtschaftungseinheit klassifizierten baulichen Einrichtungen wurden identifiziert, um auf Teilen der Dachflächen eine PV-Anlage zu installieren. Das technische Gesamtpotenzial beträgt 660 MWp und reicht von Kleinstanlagen mit 2 kWp bis zu Anlagen über 1 MWp auf größeren Gebäudekomplexen, die ein Gesamterzeugungspotenzial von 620 GWh/a besitzen. Davon sind 250 MWp mit einer bevorzugten Ausrichtung nach Ost und West technisch-wirtschaftlich nutzbar zu LCOE zwischen 5 ct/kWh – 7 ct/kWh.

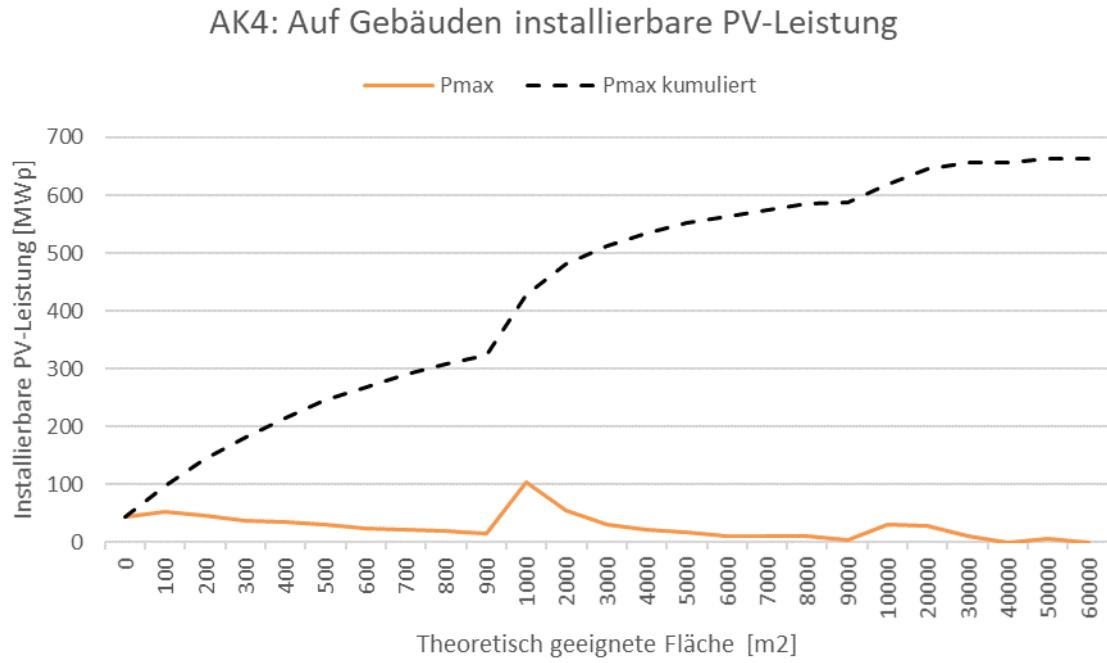


Abbildung 41: Auf baulichen Einrichtungen installierbare PV-Leistung. Quelle: TÜV Rheinland

## 17.4 Anwendungsklasse 5: Neben dem Schienenweg

2100 Freifeldanlagen neben dem Schienenweg bergen ein PV-Potenzial von 460 MWp, überwiegend mit Anlagen ab 100 kWp installierbarer Leistung.

Die größten Anlagen besitzen 5 MWp installierbarer Leistung. Ein Viertel davon können jährlich zusammen 100 GWh zu LCOE von 3 ct/kWh – 4 ct/kWh liefern.

## AK5: Neben den Schienenwegen installierbare PV-Leistung

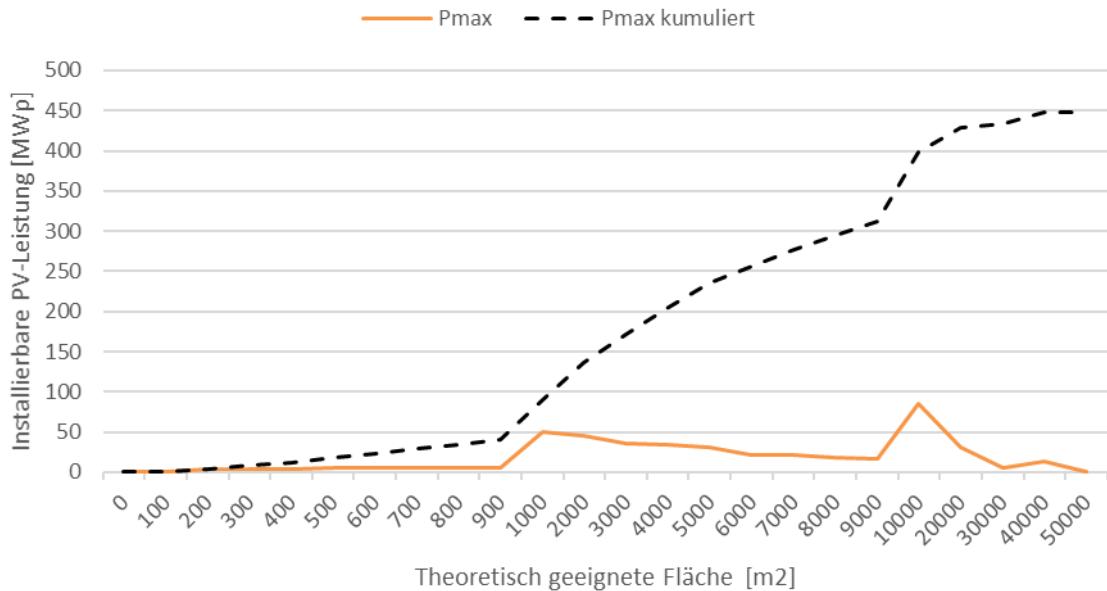


Abbildung 42: Neben dem Schienenweg installierbare PV-Leistung. Quelle: TÜV Rheinland

## 17.5 Anwendungsklasse 6: Sonstige Installationsorte, Fahrzeugdach

Für die Abschätzung des Leistungspotenzials von PV-Modulen auf Fahrzeugdachflächen wird folgende Annahme getroffen:

Größe der Dachfläche (in  $\text{m}^2$ ) geteilt durch 10 = maximale Anlagenleistung in Kilowattpeak (kWp).

Somit ergibt sich aus der ermittelten verfügbaren Dachfläche von ca. 309 000  $\text{m}^2$  eine Leistung in der Größe von 30 900 kWp.

Unter der Annahme, dass diese Leistung an ca. 900 Vollaststunden pro Jahr erbracht wird, ergibt sich eine erzeugbare Energie von 28 GWh/a.

Es ist allerdings hervorzuheben, dass der Wert von 30 900 kWp auch gewissermaßen nur theoretischer Natur ist, da von ihm noch die tatsächlichen Verluste abzuziehen sind. Hier sind u. a. Verluste aufgrund von Verschattung (z. B. sonnenabgewandte Seite des Fahrzeugs, Tunnelstrecken etc.) und der regional unterschiedlichen Sonnenstrahlung zu nennen. Aber insbesondere auch der nicht optimale Einstrahlungswinkel spielt hier eine wesentliche Rolle.

Im Vergleich zur DB Fernverkehr ist der Fahrzeugpark der DB Regio mit ca. 22 800 Zügen erheblich größer. Eine detaillierte Analyse der bei diesen Fahrzeugen nutzbaren Dachflächen kann im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts aufgrund der bereits genannten Unsicherheiten nicht erfolgen. Eine vereinfachte Abschätzung ergibt sich bei Beschränkung der Berechnung auf die Anzahl der Züge.

Wie aus obiger Tabelle ersichtlich, ist der IC 1 in der Länge sehr variabel, da es sich bei ihm im Gegensatz zu den anderen Zügen nicht um einen festen Zugverband handelt, sondern die Anzahl der gekuppelten Wagen variabel ist. Ohne den IC 1 ergibt sich für die verbleibenden 522 Züge der DB Fernverkehr eine nutzbare Dachfläche von ca. 264 000 m<sup>2</sup>. Umgerechnet auf die 22 800 Züge der DB Regio ergibt sich eine nutzbare Dachfläche von ca. 11 500 000 m<sup>2</sup> und ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Verluste somit eine Leistung von 1 150 000 kWp.

## 17.6 Gesamtpotenzial

Das Gesamtpotenzial aus den sechs Anwendungsklassen wird unterschieden in technisch-wirtschaftlich sinnvoll mit kurzfristiger Umsetzbarkeit und höhere Gestehungskosten mit gegebenenfalls unklarer technischer Realisierbarkeit.

Diese beiden Szenarien sowie ein dritter Fall, der sich zwischen den beiden genannten Grenzen bewegt, werden nachfolgend diskutiert. So wurden für Szenario A die Anlagen identifiziert, deren Installation eine hohe Wahrscheinlichkeit einer kurzfristigen Umsetzbarkeit aufweisen. Zusätzlich werden strengere, in der PV-Branche übliche Anforderungen an die Verschattungsfreiheit gestellt: die vorgesehenen Flächen müssen zur Wintersonnenwende am 21.12., im gesamten Zeitraum, während die Sonne im Azimut zwischen 150° und 210° steht (entspricht ca. zwischen 10:00 und 14:30 Uhr), verschattungsfrei sein. Aufgrund der strengen Anforderungen an die Verschattungsfreiheit wird dies zu geringeren LCOE führen. In Szenario B gelten reduzierte Anforderungen an die Verschattungsfreiheit, wie in Kap. 14 angegeben. Verschattungen in den Monaten Oktober bis März werden toleriert und resultieren in steigenden LCOE. In Szenario C werden alle technischen Potenziale ausgeschöpft und es ist folglich mit den höchsten LCOE ist zu rechnen.

Zu erwarten ist eine installierbare Gesamtleistung von ca. 420 MWp – 3200 MWp, die zu einem jährlichen Erzeugungspotenzial zwischen ca. 380 GWh und ca. 2940 GWh führt. Die Anzahl der dafür zu realisierenden Anlagen bewegt sich zwischen 12800 und 27250.

TABELLE 33: ERMITTELE ANZAHL DER INSTALLIERBAREN ANLAGEN, INSTALLIERBARE LEISTUNG UND ERZEUGUNGSPOTENZIAL (GERUNDET)

Anwendungsklassen	Anzahl der installierbaren Anlagen	Installierbare PV-Leistung	Erzeugbare Energie
<b>AK1: Gleisbett</b>	0 – 3400	0 – 1600 MWp	0 – 1500 GWh/a
<b>AK2&amp;AK3: LSW</b>	750 – 4800	70 – 470 MWp	50 – 350 GWh/a
<b>AK4: Gebäude</b>	11300 – 15600	250 – 660 MWp	240 – 620 GWh/a
<b>AK5: Freifeld</b>	750 – 2100	100 – 460 MWp	90 – 440 GWh/a
<b>AK6: Fahrzeugdach</b>	0 – 1350	0 – 30 MWp	0 – 28 GWh/a
<b>Gesamt</b>	<b>12800 – 27250</b>	<b>420 – 3220 MWp</b>	<b>380-2940 GWh/a</b>

## 17.6.1 Szenario A

In Szenario A sind die PV-Anlagen zusammengefasst, die ein hohes technisch-wirtschaftliches Potenzial mit geringen LCOE, sowie eine hohe Wahrscheinlichkeit einer kurzfristigen Umsetzbarkeit aufweisen. Die Freifeldanlagen neben den Schienenwegen haben, wie erwartet, die geringsten LCOE von 3 – 4 ct/kWh.

Der Anteil der PV-Anlagen auf baulichen Einrichtungen macht mit 250 MWp mehr als die Hälfte des Gesamtpotenzials in Szenario A aus. Der Energieertrag durch Lärmschutzwände und -wälle hat mit 50 GWh/a den geringsten Anteil und aufgrund der inhomogenen Ausrichtung der Flächen und die breit gestreuten LCOE (s. Abbildung 43). Die räumliche Verteilung der installierbaren PV-Leistung wird in Abbildung 44 gezeigt, der exemplarische Tagesverlauf der PV-Energieerzeugung in Abbildung 45.

Insgesamt können in Szenario A 380 GWh/a zu mittleren LCOE von 6,1 ct/kWh gerechnet werden.

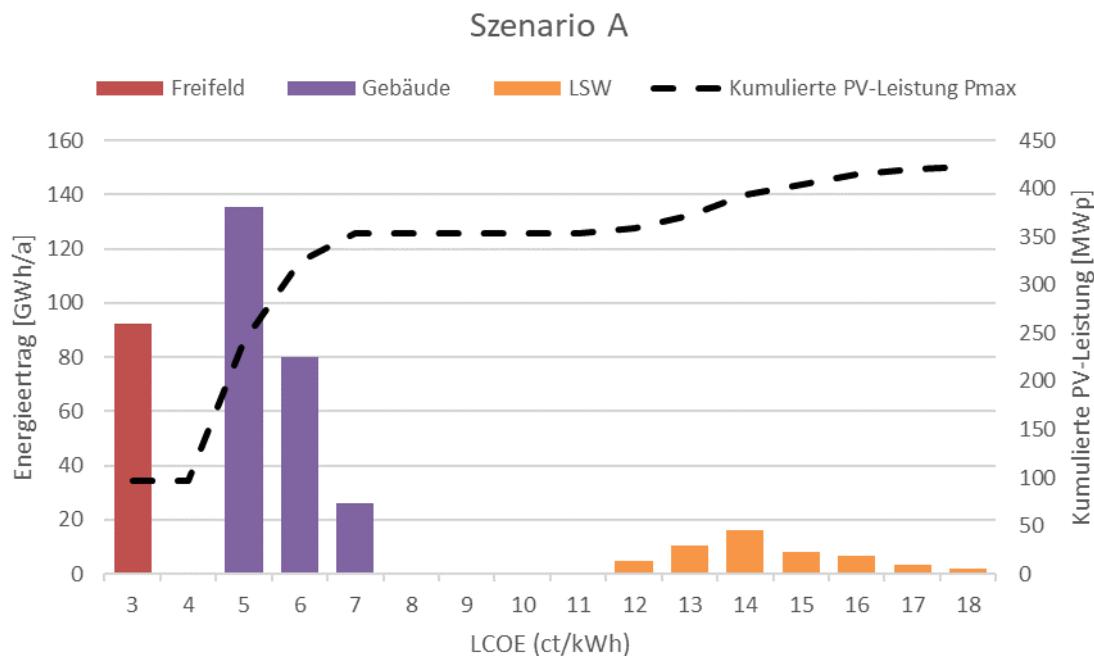


Abbildung 43: Szenario A mit hohem technisch-wirtschaftlichem Potenzial und geringen LCOE. Quelle: TÜV Rheinland

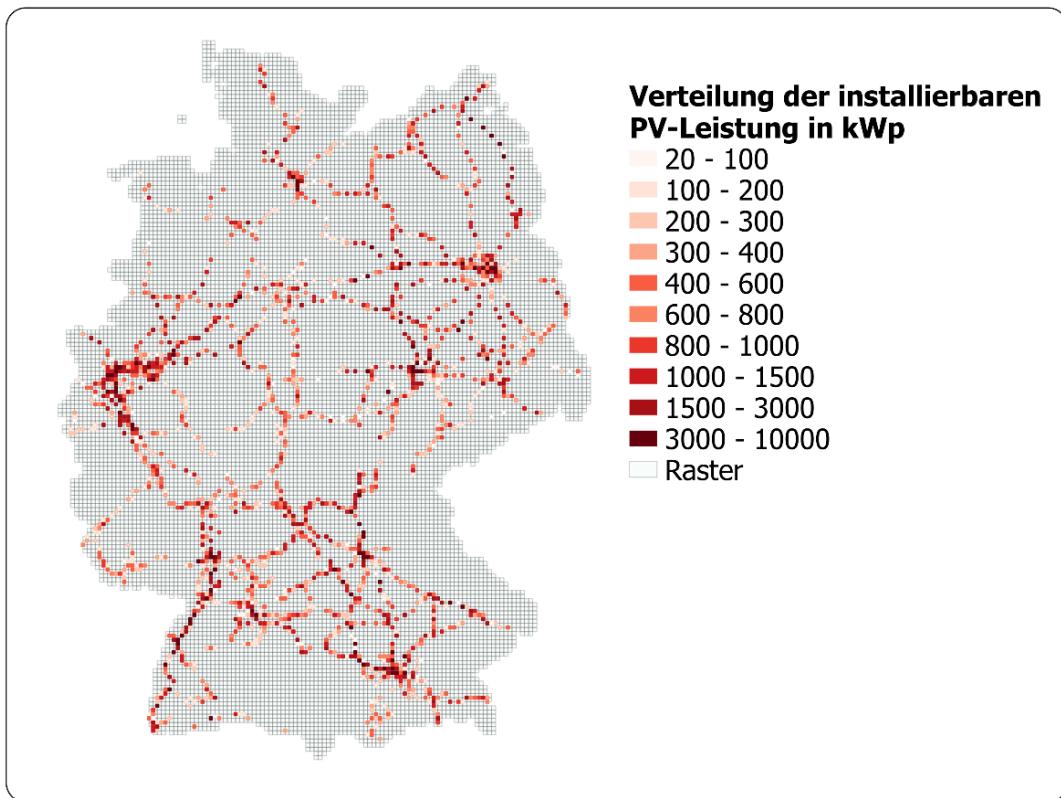


Abbildung 44: Verteilung der installierbaren PV-Leistung in kWp. Quelle: TÜV Rheinland

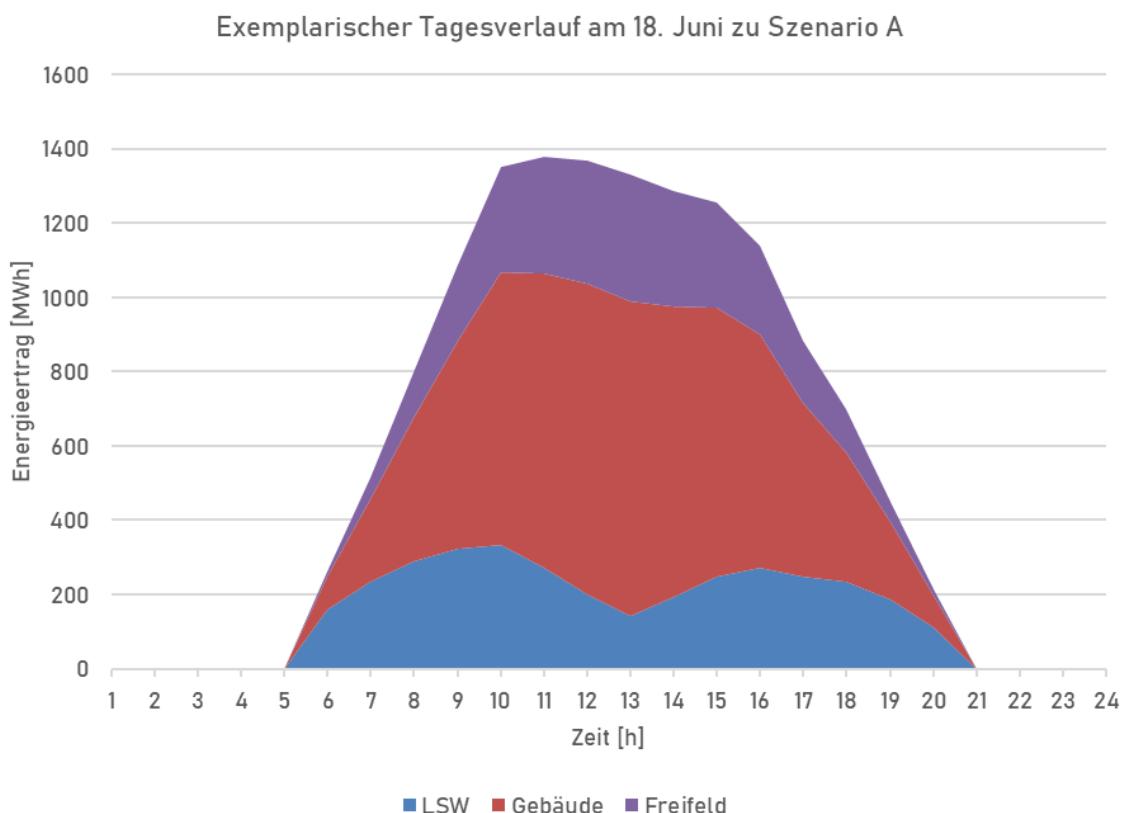


Abbildung 45: Exemplarischer Tagesverlauf des PV-Energieertrag zu Szenario A. (Dargestellt ist der Energieertrag zu jeder vollen Stunde in der zuvor abgelaufenen Stunde.) Quelle: TÜV Rheinland

## 17.6.2 Szenario B

In Szenario B zeigt sich eine ähnliche Verteilung mit anteilig höheren Potenzialen, aber auch höheren LCOE.

Insgesamt 910 GWh/a können aus 1100 MWp PV-Leistung gewonnen werden zu LCOE von 6,9 ct/kWh.

Mit der Akzeptanz einer Erhöhung von LCOE um 13 % im Vergleich zu Szenario A können Erzeugungspotenzial und PV-Leistung mehr als verdoppelt werden und sprechen für die Attraktivität dieses Szenarios.

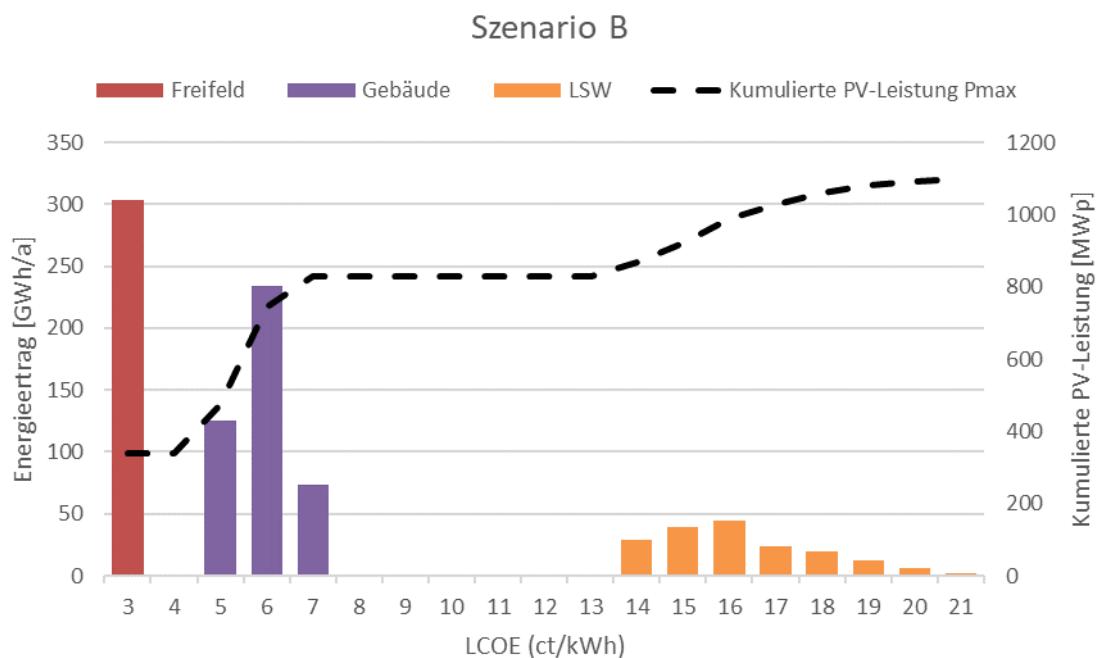


Abbildung 46: Szenario B mit mittlerem technisch-wirtschaftlichem Potenzial und mittleren LCOE. Quelle: TÜV Rheinland

## 17.6.3 Szenario C

In Szenario C sollen nun alle technischen Potenziale ausgeschöpft werden. Zusätzlich wird die Anwendungsklasse im Gleisbett mit geschätzten LCOE von 25 ct/kWh unter optimalen Bedingungen als weitere Variante ergänzt.

Es zeigt sich, dass sich das Potenzial der PV-Leistung auf maximal 3200 MWp und das Erzeugungspotenzial auf 2900 GWh/a erhöhen lässt bei signifikantem Anstieg der mittleren LCOE auf 19 ct/kWh.

Unter technisch-wirtschaftlichen Aspekten und dem Aspekt der Unsicherheit der Technologiereife der Anwendung im Gleisbett wird dieses Szenario als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt.

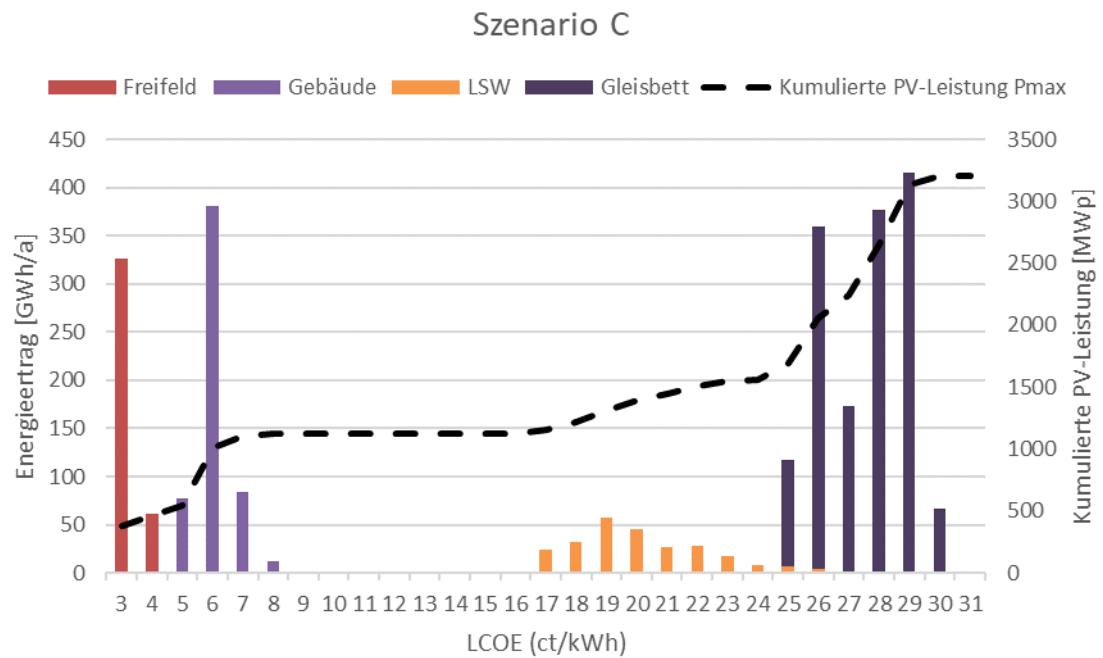


Abbildung 47: Szenario C mit geringem technisch-wirtschaftlichem Potenzial und hohen LCOE. Quelle: TÜV Rheinland

# 18 Anbindung an das Bahnenergieversorgungssystem

## 18.1 Einleitung

Im Arbeitspaket 1 dieses Projektes wurden die Anforderungen an die direkte elektrische Einspeisung von photovoltaisch erzeugter Energie in das Fahrleitungsnetz der Bahn beschrieben. Dazu ist vorgesehen, die DC-Spannung der PV-Generatoren mit einem statischen Wechselrichter auf eine AC-Spannung mit der Frequenz 16,7 Hz umzuwandeln und über einen anschließenden 15-kV-Transformator in die Fahrleitung einzuspeisen. Die in Bezug auf Technik und Wirtschaftlichkeit sinnvolle Leistung (installierte Leistung) dieser PV-Anlagen hängt von verschiedenen Faktoren ab, z. B.

- zur Verfügung stehende Grundfläche für den PV-Generator
- Formgebung und Ausrichtung (Exposition) dieser Fläche
- Anwendungsklasse
- Kosten der Komponenten und der Gesamtanlage

Die Kosten der Komponenten, vor allem die für die Einspeisung in die Fahrleitung, hängen auch davon ab, ob es gelingt, standardisierte Einspeisungen zu entwerfen, die für eine große Zahl von Anwendungen sinnvoll geeignet sind und die in größerer Stückzahl produziert werden können.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass Erzeugereinheiten in der Größenordnung von 500 kVA eine sinnvolle Größe sind. Bei Installation auf einer Freifläche wäre für eine solche installierte Leistung (Peakleistung der PV-Module) eine Fläche von ca. 6300 m<sup>2</sup> notwendig. Diese Fläche entspricht beispielsweise einem quadratischen Grundstück von ca. 80 m x 80 m. Falls der Aufbau beidseitig entlang des Schienenweges erfolgt und eine Breite von je 4 m für die Installation der PV-Module zur Verfügung steht, ist in Anlehnung an die Auslegung in Kap. 11.5 (1250 Module für 500 kW, acht Module je Reihe und Seite, 8,6 m Reihenabstand) ca. 675 m Länge notwendig. Der Aufbau der PV-Anlage entlang des Schienenweges über eine deutlich größere Länge erscheint aufgrund der großen DC-seitigen Ströme und der damit verbundenen notwendigen Kabelquerschnitte als nicht mehr sinnvoll.

In diesem Abschnitt wird zunächst die konventionelle Einspeisung in die Fahrleitung beschrieben. Im Anschluss erfolgt eine überschlägige Abschätzung der maximal möglichen, über PV-Anlagen einspeisbaren Leistung, getrennt nach den verschiedenen Anwendungsklassen. Es wird bewertet, ob Fahrleitung und Unterwerk ausreichende Kapazität zur Übertragung der durch die PV-Anlagen eingespeisten Leistung haben. Es erfolgt eine Analyse, welche Leistung durch den Zugbetrieb abgenommen werden kann und somit nicht durch die Unterwerke übertragen werden muss.

## 18.2 Konventionelle Einspeisung in die Fahrleitung

Bei vorhandenem zentralen Bahnstromnetz wird die Fahrleitung über die Transformatoren in den Unterwerken aus dem 110-kV-Bahnstromnetz gespeist. Die Unterwerke haben einen mittleren Abstand untereinander von ca. 40 km. Zwischen den Unterwerken sind bei Notwendigkeit aufgrund der elektrischen Netzgestaltung in der Fahrleitung Schutzstrecken mit einer Längskupplungsmöglichkeit vorhanden. Je nach Bedarf können bzw. sind die benachbarten Unterwerksspeisebereiche miteinander verbunden oder getrennt. Im Normalfall sind vorhandene Schutzstrecken geschlossen (z. B. [105]).

Die Unterwerke haben üblicherweise eine Nennspeiseleistung von  $2 \times 10$  MVA bis  $2 \times 15$  MVA. Aus Gründen der Redundanz sind in jedem Unterwerk zwei Transformatoren mit je 10 MVA bis 15 MVA vorhanden. Für den Normalbetrieb eines Unterwerkes ist die Leistung eines Transformatoren ausreichend, daher ist ein Transformator für die Einspeisung eingeschaltet. Bei Ausfall eines Transformators oder bei Instandhaltungsarbeiten kann der zweite Transformator eingeschaltet werden und somit die Bahnenergieversorgung des Speisebereiches gewährleisten. Vorteilhaft werden Unterwerke an Kreuzungen von Strecken oder Eisenbahnknoten gebaut, sodass von einem Unterwerk mehrere Strecken versorgt werden können. Die Einspeisung ist prinzipiell in Abbildung 48 dargestellt.

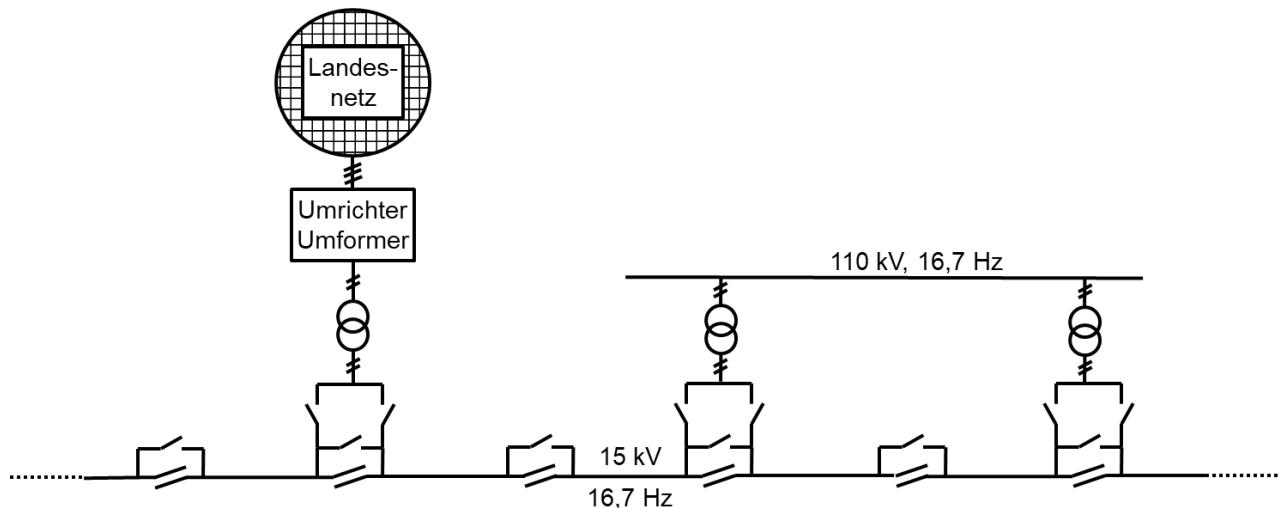


Abbildung 48: Prinzipielle Darstellung der Einspeisung aus Unterwerken in die Fahrleitung. Quelle: TÜV Rheinland

Ist das bahneigene Netz 16,7 Hz, 110 kV örtlich nicht verfügbar, wird aus dem Landesnetz (50 Hz) dezentral mittels Umrichter (dUrw) die 15-kV-Fahrleitungsspannung erzeugt und vor Ort eingespeist. Die dezentralen Bahnstromerzeuger müssen sich bei Hochlauf auf eine von den benachbarten Erzeugern über die Fahrleitung vorgestreckte 15-kV-Fahrleitungsspannung aufsynchronisieren bzw. werden über eine Datenkommunikationsverbindung zu benachbarten dUrw synchronisiert. Die Nennleistung beträgt ebenfalls ca. 10 MW bis 15 MW. Dezentrale Umformer (rotierende Umformer) zur Speisung der Fahrleitung aus dem Landesnetz sind zum geringen Teil auch noch vorhanden, werden jedoch in absehbarer Zeit durch Umrichter ersetzt werden.

Auch in der dezentralen Bahnenergieversorgung können zwischen den Bahnstromerzeugern ebenfalls Schutzstrecken in der Fahrleitung vorhanden sein, wodurch Speisebereiche benachbarter Erzeuger verbunden oder getrennt werden können. Im Normalfall sind die Speisebereiche miteinander verbunden. Somit kann bei Ausfall einer Einspeiseeinheit dessen Speisebereich vom benachbarten Erzeuger versorgt werden. Vorzugsweise werden die dUrw ebenfalls an Kreuzungen von Strecken oder Eisenbahnknoten gebaut, sodass von einem dUrw mehrere Strecken versorgt werden können.

Sowohl die Transformatoren im zentralen Bahnstromnetz als auch die dezentralen Umrichterwerke (dUrw) sind rückspeisefähig. Bremsleistung der Triebfahrzeuge oder die photovoltaisch erzeugte Leistung kann in das jeweilige übergeordnete Netz gespeist werden. Das übergeordnete Netz kann als aufnahmefähig angesehen werden.

Die elektrifizierten offenen Strecken (ohne Tunnel) sind mit Kettenwerksfahrleitungen ausgerüstet. Ein Fahrleitungskettenwerk, bestehend aus dem Fahrdräht, dem Tragseil und den Hängerseilen zwischen beiden, hat ohne Berücksichtigung von Verstärkungsleitungen eine Dauerstromtragfähigkeit von ca. 600 A. Ist dem Fahrleitungskettenwerk eine Verstärkungsleitung fest parallelgeschaltet, beträgt die

Stromtragfähigkeit ca. 1200 A. Dementsprechend sind bei 15 kV Fahrleitungsspannung die Leistungen von ca. 9 MVA bzw. 18 MVA über die Fahrleitung übertragbar.

Im Anhang I ist in einer Heat-Map für 2019 die gesamte zur Verfügung stehende installierte Traktionsleistung geografisch/regional dargestellt.

## 18.3 Schutz der Komponenten

Sollte die ermittelte einspeisbare PV-Leistung größer als die dauernd übertragbare Leistung der Fahrleitung sein, ist die einspeisbare PV Leistung entsprechend zu reduzieren. Dies ist notwendig, um die Fahrleitung vor Überlastung zu schützen.

Ist die einspeisbare PV-Leistung geringfügig oberhalb der vom Unterwerk übertragbaren Leistung, kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil der PV-Leistung von fahrenden Zügen aufgenommen wird und eine Überlastung des Unterwerks nicht auftritt. Sollte wider Erwarten die von den verkehrenden Zügen abgenommene Leistung zu gering sein und eine Überlastung der Unterwerke drohen, muss durch Schutz- und/oder Überwachungsgeräte eine Leistungsreduktion der PV-Generatoren herbeigeführt werden. Dabei können Warnsignale aus den Mess- und Überwachungsdaten des Unterwerks generiert werden und beispielsweise via Zes zu den Umrichtern der PV-Generatoren kommuniziert werden, so dass die eingespeiste Leistung reduziert werden kann. Abhängig von der Überlastfähigkeit des Unterwerks müssen Zeitverzug und Höhe der Leistungsreduktion gewählt werden. Alternativ kann auch der Ausbau mit PV-Generatoren so weit reduziert werden, dass eine Überlast des Unterwerks nicht auftritt. Dies sollte jedoch im Einzelfall wirtschaftlich verglichen werden mit der Methode der Leistungsreduktion.

## 18.4 Einhaltung der zulässigen Spannungsgrenzen

Durch die in die Fahrleitung eingespeiste Leistung von den PV-Anlagen wird die Fahrleitungsspannung entsprechend angehoben. Nach EN 50163 ist eine maximale Fahrleitungs-Dauerspannung von 17,25 kV zulässig. Zur Abschätzung der Spannungsanhebung durch die PV-Anlagen wird folgendes Szenario betrachtet:

- Länge des Speisebereiches: 40 km. Die im Speisebereich erzeugte PV-Leistung wird im Speisebereich in die Fahrleitung eingespeist. Es wird als worst-case-Bedingung angenommen, dass im Speisebereich keine Leistung durch Triebfahrzeuge aufgenommen wird. Die gesamte photovoltaisch erzeugte Leistung wird von der Fahrleitung zum Unterwerk übertragen und dort in das übergeordnete Netz eingespeist.
- Es erfolgt keine Einspeisung in benachbarte Bereiche, da diese in diesem Szenario als symmetrisch zum betrachteten Speisebereich angesehen werden.
- Die im Speisebereich eingespeiste PV-Leistung beträgt  $P_{PV} = 12 \text{ MVA}$ .
- Das Unterwerk befindet sich mittig im Speisebereich. Es handelt sich um ein Transformatoren-Unterwerk, das die 110-kV-Spannungsebene auf die Fahrleitungsspannung mit dem Nennwert 15 kV transformiert.
- Die Leistung einer PV-Einspeisung beträgt 500 kVA, damit gibt es im Speisebereich 24 Einspeisestellen, zu jeder Seite des Unterwerks 12. Der Abstand zwischen zwei PV-Einspeisungen ist identisch. Somit ist die erste PV-Einspeisung 0,833 km vom Einspeisepunkt des Unterwerkes entfernt, die folgenden PV-Einspeisungen haben je einen Abstand von 1,667 km zur vorherigen PV-Einspeisung.

- Der Impedanzbelag der Fahrleitung  $Z'$  wird nach [105] (RE 250, zweigleisige Strecke, 2 Kettenwerke, keine Verstärkungsleitung, kein Rückleitungsseil) zu  $0,108 \Omega/\text{km}$  ( $R' = 0,064 \Omega/\text{km}$ ,  $X' = 0,087 \Omega/\text{km}$ ) angenommen.
- Daraus ergibt sich eine Spannungsverhöhung in Höhe von ca. 400 V an der vom Unterwerk am weitesten entfernten PV-Einspeisung, bedingt durch die Spannungsabfälle auf der Fahrleitung aufgrund der von den PV-Anlagen eingespeisten Ströme.
- Bei einem Unterwerk mit Transformator am 110-kV-Bahnnetz:
  - Die Leerlaufspannung der Fahrleitung wird üblicherweise leicht höher als die Nennspannung eingestellt ist, z. B. 16 kV.
  - Es wird ein Kurzschlussspannungsverhältnis des Transformators von  $u_k = 10\%$  angenommen sowie eine Nennleistung von  $S_{TrN} = 15 \text{ MVA}$ .
  - Die Spannungsverhöhung am Transformator aufgrund der Einspeisung der PV-Anlagen wird ungefähr  $u_k \cdot U_N \cdot P_{PV}/S_{TrN} = 1200 \text{ V}$ . (Tatsächlich wird die Spannungsverhöhung etwas kleiner ausfallen, da aufgrund der höheren Spannung der Strom kleiner wird und somit der Spannungsabfall an der Streuinduktivität des Transformators geringer ausfällt.)

Unter diesem Szenario ergäbe sich bei Einspeisung durch die PV-Anlagen eine gesamte Spannungsverhöhung von ungefähr 1600 V. Der zulässige Spannungsbereich wäre damit deutlich überschritten. Die hier angenommene PV-Leistung kann nicht über ein Transformator-Unterwerk in das übergeordnete 110-kV-Netz eingespeist werden. Folgende Abhilfemaßnahmen sind denkbar:

- Die Steuerungen der PV-Generatoren enthalten für alle Fälle eine Regelung, die eine Überspannung am Ort der Einspeisung verhindert, indem die eingespeiste Leistung reduziert wird. Mit entsprechender Wahl der Sollwerte für diese Regelung wird die Überspannung am Unterwerk verhindert. Dies bedeutet allerdings, dass nicht die zur Verfügung stehende PV-Leistung eingespeist werden kann.
- Der Speisebereich wird nicht mit der maximal möglichen PV-Leistung ausgebaut. Siehe auch die verschiedenen Ausbauszenarien, die in Kap. 17.6 beschrieben sind. Nach Erfahrungen der DB können 5 MVA zuverlässig in die Fahrleitung eingespeist werden. Mit dieser Leistung wird die Spannungsverhöhung am Uw-Transformator ca.  $u_k \cdot U_N \cdot 5 \text{ MVA}/15 \text{ MVA} = 500 \text{ V}$ . Die Spannungsverhöhung in der Fahrleitung wird ca. 185 V. Damit liegt die Fahrleitungsspannung (ausgehend von der Leerlaufspannung 16 kV) innerhalb der zulässigen Dauerspannung nach EN 50163. Selbst bei einer am Transformator eingestellten Leerlaufspannung von 16,5 kV wäre die zulässige Dauerspannung nicht überschritten.
- Im Speisebereich wird ein beträchtlicher Teil der PV-Leistung durch den Zugverkehr aufgenommen. Analysen unter Einbezug der statistischen Schwankungen des tatsächlichen Zugverkehrs müssen hier streckenbezogen den wirtschaftlich sinnvollen Grad des Ausbaus mit PV-Anlagen ermitteln. Durch entsprechende Fahrplangestaltung des elektrischen Zugbetriebs könnte die Abnahme der PV-Leistung durch den Zugbetrieb optimiert werden.
- Die PV-Anlagen im Speisebereich werden so ausgelegt, dass die maximale Leistung zwar geringer ist, diese sich jedoch besser über den Tag verteilt. Dies kann z. B. erreicht werden, indem die PV-Module unterschiedlich ausgerichtet werden. Auch wenn dies vermutlich wirtschaftlich nicht die angestrebte Lösung ist, kann evtl. auf diese Weise bei geforderter Einspeisung in die Fahrleitung ein gesamt-energetisches Optimum erreicht werden.
- Es besteht die Möglichkeit, PV-Leistung direkt in das Netz 110 kV 16,7 Hz, in ein 50-Hz-Netz der örtlichen Energieversorger oder in die 50-Hz-Netze der DB Energie einzuspeisen.

Bei dezentralen Umrichterwerken (dUrw) können die Verhältnisse anders sein. Die Fahrleitungsspannung wird hier ebenfalls durch diese dUrw geregelt, sodass eine Überspannung an der Einspeisestelle verhindert werden kann. Ggf. wären entsprechende Anpassungen an der Regelung der dUrw notwendig.

## 18.5 Längenbezogene Generierung von PV-Leistung, Maximalbetrachtung

Im Folgenden wird die auf die Streckenlänge bezogene Generierung von PV-Leistung, die in die Fahrleitung eingespeist werden soll, abgeschätzt. Dabei werden Annahmen getroffen, sodass die maximal mögliche Leistung ermittelt wird. Unterschieden wird nach den verschiedenen Anwendungsklassen.

### 18.5.1 Allgemeines

Zur leichteren Lesbarkeit des Textes wird im Folgenden unter dem Begriff ‚Unterwerk‘ die aus dem Landesnetz oder aus dem 110-kV-Bahnnetz einspeisende Einheit verstanden. Dies kann ein Umspannwerk im üblichen Verständnis (im Wesentlichen bestehend aus Transformatoren und Schaltanlagen), ein dUrw oder dUfw sein.

Unter der Annahme des möglichst vollständigen PV-Ausbaus eines Unterwerksbereichs mit den in der jeweiligen Anwendungsklasse vorgesehenen PV-Generatoren wurden die folgenden Betrachtungen angestellt. In der Realität wird es kaum vorkommen, dass ein gesamter Unterwerksbereich vollständig mit PV-Generatoren einer Anwendungsklasse ausgebaut werden kann. Vielmehr wird der Ausbau, je nach den lokalen Gegebenheiten in einem Teilabschnitt, mit den verschiedenen Anwendungsklassen erfolgen. Die installierbare Leistung, die maximal einspeisbare Leistung sowie die zu erwartende Leistungsabnahme durch den Zugverkehr sind bei einem konkreten Projekt im Detail zu prüfen.

### 18.5.2 Anwendungsklasse 1: Im Gleisbett

Voraussetzungen/Annahmen (siehe auch Kap 10):

- PV-Module sind auf den Schwellen zwischen den Schienen montiert
- Modulmaße: 1350 mm x 375 mm
- Ein Standard-Modul mit einer Fläche von 1000 mm x 2000 mm hat eine Peak-Leistung von 400 W. Damit ergibt sich eine Peak-Leistung des hier verwendeten Moduls von 100 W
- Abstand von Vorderkante zu Vorderkante der PV-Module (Abstand der Schwellen): 600 mm
- Zweigleisige Bahnstrecke

Ergebnis:

- 3333 Module auf 1 km Bahnstrecke
- 333 kWp/km
- jährlicher Energieertrag ca. 295 MWh/km

Bei einer betrachteten Streckenlänge von ca. 40 km, die dem mittleren Abstand von zwei Unterwerken entspricht, ergäbe sich eine Gesamt-Peak-Leistung von ca. 13 MW. Der jährliche Energieertrag wäre etwa 11,8 GWh.

Die Fahrleitung der zweigleisigen Strecke wird damit nicht überlastet. Je nach Auslegung des Unterwerks und dem tatsächlichen Zugverkehr würde damit die Leistungsfähigkeit des Unterwerks leicht überschritten. Die zulässige Spannung der Fahrleitung wird bei dieser Einspeiseleistung überschritten.

### 18.5.3 Anwendungsklasse 2: LSW

Voraussetzungen/Annahmen (siehe auch Kap 10):

- Verlauf der Bahnstrecke in Nord-Süd-Richtung.
- Die LSW ist beidseitig der Strecke aufgebaut.
- Die oberen 2 m einer bestehenden LSW sind mit PV-Modulen belegt.
- Senkrechte Montage der Module an der LSW.
- PV-Module nur an der gleisabgewandten Seite (Richtung West und Ost zeigend).
- Anwendung von Standard-Modulen mit der Größe 1000 mm x 2000 mm und einer Peak-Leistung von ca. 400 Wp.
- Es wird eine zweigleisige Strecke benötigt.

Ergebnis:

- Pro Kilometer Strecke: 1000 Module Richtung Osten zeigend, 1000 Module Richtung Westen zeigend.
- Streckenbezogene installierte Leistung: 800 kWp/km.
- jährlicher Energieertrag ca. 850 MWh/km

Es ist äußerst unwahrscheinlich, dass die gesamte Streckenlänge eines Speisebereichs beidseitig mit LSW ausgerüstet ist. Nach Kap. 16.2 sind Lärmschutzwände und -wälle mit einer Länge von 1000 km Länge prinzipiell für die Installation von PV-Anlagen geeignet (Anmerkung zum Verständnis: Sind an einer Strecke beidseitig Lärmschutzwände vorhanden, entspricht die Länge der LSW der doppelten Streckenlänge.). Bei ca. 200 Unterwerken in Deutschland ergibt sich damit im Mittel eine Länge von 5 km LSW pro Unterwerk. Es wird daher der Fall eines extremen Ausbaus mit LSW betrachtet: 10 km des Speisebereichs ist beidseitig mit LSW versehen. Unter dieser Annahme ergäbe sich eine Gesamtleistung von 8 MWp und ein Jahresenergieertrag von ca. 8,5 GWh. Damit wären weder die Stromtragfähigkeit der Fahrleitung der zweigleisigen Strecke noch die Leistungsfähigkeit des Unterwerks überschritten. Die zulässige Spannung der Fahrleitung wird bei dieser Einspeiseleistung bei den gewählten Bedingungen noch nicht überschritten.

### 18.5.4 Anwendungsklasse 3: Lärmschutzwall

Lärmschutzwälle sind nur selten und nur in kurzen Abschnitten vorhanden. Sie sind in obiger Betrachtung (Kap. 18.5.3) mit enthalten.

### 18.5.5 Anwendungsklasse 4: Bauliche Einrichtungen

Voraussetzungen/Annahmen (siehe auch Kap 10):

- Betrachtung einzelner Gebäude in der Nähe der elektrifizierten Bahnstrecke
- gemäß Beispiel aus Kap. 10.4 ergibt sich z. B. eine installierte Leistung von 480 kWp (entspricht 32 A bei 15 kV)

Diese Leistung kann leicht von der Fahrleitung aufgenommen werden und, falls von keinem Verbraucher auf der Strecke abgenommen, via Unterwerk in das übergeordnete Netz eingespeist werden.

Bei den baulichen Einrichtungen sind die folgenden Aspekte mit zu berücksichtigen:

- Die baulichen Einrichtungen sind in der Regel an die übliche öffentliche Infrastruktur, wie Frischwasser, Abwasser, Gas, Elektrizität (3 AC, 50 Hz) angeschlossen.
- In den baulichen Einrichtungen werden meist Verbraucher elektrischer Energie betrieben.
- Falls Fahrleitungen in die Gebäude (z. B. Wartungs- oder Reparatur-Hallen) hineinführen, werden diese lediglich für Ein- und Ausfahrten sowie zum Verfahren der Fahrzeuge innerhalb der Gebäude genutzt. Der Leistungs- und Energiebedarf hierfür ist gering.

Aus diesem Grunde wird es wirtschaftlich sinnvoll sein, die photovoltaisch erzeugte Elektrizität in die Hausinstallation des Gebäudes einzuspeisen mit der Möglichkeit, überschüssige Energie an das Landesnetz oder das bahneigene 50-Hz-Netz abzugeben. Vorteile sind hier:

- Nutzung erprobter, konventioneller, in großer Stückzahl und damit preisgünstig hergestellter Technik
- direkte Speisung der erzeugungsnahen internen Verbraucher (im Gebäude oder in der Nähe des Gebäudes)
- deutlich bessere Aufnahmefähigkeit des Landesnetzes im Vergleich zum Bahnnetz mit seinen großen stochastischen Schwankungen

## 18.5.6 Anwendungsklasse 5: Neben dem Schienenweg

Voraussetzungen/Annahmen (siehe auch Kap 10):

- freie Fläche von 80 m x 80 m.
- gemäß obiger Abschätzung ergibt sich eine installierte Leistung von 500 kWp (entspricht 33 A bei 15 kV)
- Jahresenergieertrag nach [1]: 526 MWh

Unter der Annahme, dass solche Flächen alle 1000 m entlang der Bahnstrecke zur Verfügung stehen, wird bei einer Streckenlänge von ca. 40 km eine Gesamtleistung von 20 MWp (entspricht ca. 1300 A bei 15 kV) und ein Jahresenergieertrag von ca. 21 GWh in die Fahrleitung eingespeist.

Die Stromtragfähigkeit der Fahrleitung einer zweigleisigen Strecke und die Leistungsfähigkeit des Unterwerks wären überschritten. Auch die zulässige Spannung der Fahrleitung wird bei dieser Einspeiseleistung überschritten. Einschränkungen, wie z. B. der nicht vollständige Ausbau der verfügbaren Flächen oder die Begrenzung der maximal einspeisbaren Leistung, wären zu berücksichtigen.

## 18.5.7 Anwendungsklasse 6: Sonstige Installationsorte, Fahrzeugdach

Voraussetzungen/Annahmen (siehe auch Kap 10):

- Zuglänge Personenzug: 200 m
- gemäß Kap. 10.6 ergibt sich eine installierte Leistung von 72 kWp und ein Jahresenergieertrag von 65 MWh

Die erzeugte Leistung wird in die Hilfsbetriebe eingespeist und kann zum großen Teil im Normalbetrieb des Zuges von diesen aufgenommen werden. Selbst abgestellte Züge werden einen Teil der von den PV-Modulen zur Verfügung gestellten Leistung für Warm- oder Kühlhaltebetrieb und die verschiedenen elektronischen Steuerungen, Datenübertragungen und Zugsicherungsanlagen aufnehmen können. Eine Einspeisung der überschüssigen Energie in die Fahrleitung ist wirtschaftlich und technisch nicht geboten.

Bei Betrachtung eines Kühlwagens, der ein potenzieller Abnehmer von auf dem eigenen Dach erzeugter PV-Energie ist, gilt:

- effektiv belegbare Fläche (Annahme): 40 m<sup>2</sup>
- installierte Leistung: 8 kW; maximal möglicher Jahresenergieertrag: 7,2 MWh.

Die Kühlung des Wagens wird sicherlich nicht durchgehend im Dauerbetrieb sein, sodass die verfügbare Leistung vom Wagen nicht zuverlässig abgenommen werden kann. Aufgrund des üblichen Aufbaus von Güterwagen besteht nicht die Möglichkeit, die erzeugte Leistung an andere Wagen zu übertragen.

### 18.5.8 Zusammenfassung: Einspeisung PV-Leistung in die Fahrleitung

Obige Abschätzungen der Leistung der PV-Anlagen für die Anwendungsklassen „Im Gleisbett“, „An der LSW“, „Am Lärmschutzwand“ und „Neben dem Schienenweg“ erfolgten unter sehr optimistischen Annahmen der Bedingungen. Real werden diese Verhältnisse sehr wahrscheinlich an keiner Stelle im DB Netz so vorhanden sein. Für das gesamte DB Netz wurde bei Installation aller möglichen PV-Anlagen in allen Anwendungsklassen, außer bauliche Einrichtungen und auf den Fahrzeugdächern, eine PV-Peak-Leistung von ca. 2,5 GW ermittelt (Szenario C, Kap. 17.6.3). Dabei ist die aus technischer Sicht problematische Installation von PV-Modulen im Gleisbett (hohe Vibrationen, große Verschmutzung, hohes Risiko von Beschädigungen) mitberücksichtigt. Bei ca. 200 vorhandenen Unterwerken ergäbe sich eine mittlere PV-Peak-Leistung von ca. 12 MW pro Unterwerk. Dieser Wert liegt im Bereich der Unterwerksleistung; es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass ein beträchtlicher Teil der Speisebereiche eine deutlich höheres PV-Einspeisepotenzial besitzt, als vom Unterwerk in das übergeordnete Netz über längere Zeit übertragen werden kann. Zusätzlich wird bei hoher Einspeiseleistung der PV-Anlagen, zumindest bei Transformator-Unterwerken, die maximal zulässige Fahrleitungsspannung überschritten. Diese Verhältnisse müssen im konkreten Projekt vor der Realisierung im Detail untersucht werden. Das nach Szenario C, Kap. 17.6.3 ermittelte PV-Potenzial kann nicht vollständig in die Fahrleitung eingespeist werden.

Im Szenario C nach Kap. 17.6.3 beträgt die installierbare Leistung 1,1 GW. Pro Unterwerk ergäbe sich eine mittlere Einspeiseleistung von 5,5 MW. Diese Leistung kann in die Fahrleitung eingespeist und auch ohne Abnahme durch Zugbetrieb über die Unterwerke in die übergeordneten Netze übertragen werden. Im konkreten Fall muss untersucht werden, ob und in welchem Ausmaß in einzelne Speisebereiche deutlich mehr als ca. 5 MW eingespeist werden, was auch von der DB als realisierbar angesehen wird und welche Abhilfemaßnahmen getroffen werden können.

## 18.6 Abschätzung des Energiebezugs auf einer Bahnstrecke

### 18.6.1 Anzahl von Zügen in einem Speisebereich

Die Strecken der DB AG sind klassifiziert nach der dort zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Geschwindigkeitsklassen sind nach Infrastrukturregister [109]

- bis 100 km/h (24 min. für 40 km)
- bis 120 km/h (20 min. für 40 km)
- bis 160 km/h (15 min. für 40 km)
- bis 200 km/h (12 min. für 40 km)

In Klammern hinter die Geschwindigkeitsklassen sind die Verweildauern angegeben, die ein Fahrzeug/ein Zug bei dieser Geschwindigkeit innerhalb des Speisebereiches eines Unterwerkes (hier mit Streckenlänge 40 km angenommen) verbleibt.

Bei den Zugfolgezeiten 5 min, 10 min oder 15 min ergibt sich die rechnerisch ermittelte Anzahl von Fahrzeugen/Zügen in einem Speisebereich. Dies ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

TABELLE 34: ANZAHL ZÜGE IM SPEISEBEREICH

$V_{\max}$ km/h	$T_{\text{Verweil}}$ /min	Anzahl Züge im Speisebereich bei Zugfolgezeiten von		
		5 min	10 min	15 min
100	24	4,8	2,4	1,6
120	20	4,0	2,0	1,3
160	15	3,0	1,5	1,0
200	12	2,4	1,2	0,8

Dabei bedeuten die nicht ganzzahligen Angaben zur Anzahl von Fahrzeugen/Zügen, dass sich in gewissen Zeiten die jeweils kleinere bzw. größere Anzahl von Zügen im betreffenden Bereich befindet.

Die tatsächlichen Zugfolgezeiten auf einer Strecke sind weder konstant noch stochastisch gleich verteilt. Sie sind bestimmt durch den Fahrplan und unterliegen betriebs- und umweltbedingten Schwanken. Je größer die berechnete Anzahl der Züge in einem Speisebereich ist, desto eher kann man davon ausgehen, dass sich tatsächlich einige Züge in diesem Bereich befinden und Leistung abnehmen.

### 18.6.2 Leistungsbedarf eines Zuges

Nach [107] wird für gemischte Güterzüge die folgende Formel für die Berechnung des Fahrwiderstandes angewendet:

$$f_{wg} = 2,5 + 0,0005 v^2,$$

wobei

- $f_{wg}$  ist der auf die Gewichtskraft  $G$  des Zuges bezogene Wagenzugwiderstand in N/kN
- $v$  ist die Geschwindigkeit in km/h

Der Wagenzugwiderstand ergibt sich aus

$$W = f_{wg} \cdot G$$

Beispiel:

- Massa des Güterzuges: 1600 t
- Geschwindigkeit: 80 km/h
- Fahrt in der Ebene, keine Beschleunigung, kein Wind.

Daraus ergibt sich eine Zugkraft von 89,5 kN. Unter Vernachlässigung der Verluste im Antrieb und der Hilfsbetriebeleistung der Lokomotive ergibt sich eine Leistungsaufnahme der Lokomotive von 2 MW. Bei einer Geschwindigkeit 100 km/h steigt der Leistungsbedarf auf 3,3 MW.

Für Reisezüge, die häufig mit deutlich größerer Geschwindigkeit unterwegs sind, wird nach [107] die folgende Formel für den Fahrwiderstand angegeben:

$$f_{wg} = 1,0 + 0,0025 * v + 4,8 * \frac{n + 2,7}{G/kN} \cdot 0,0145 \cdot (v + 15)^2$$

Wobei

- $f_{wg}$  ist der Wagenzugwiderstand in N/kN
- $v$  ist die Geschwindigkeit in km/h
- $n$  Anzahl der Wagen im Zug
- $G$  Gewichtskraft des Zuges in kN
- 15 Zuschlag für Gegenwind

Der Wagenzugwiderstand ergibt sich aus

$$W = f_{wg} \cdot G$$

Beispiel:

- Massa des Reisezuges: 10 Wagen zu je 40 t, 1 Lokomotive zu 84 t; Summe 484 t
- Geschwindigkeit: 140 km/h
- Fahrt in der Ebene, keine Beschleunigung, kein Wind.

Daraus ergibt sich eine Zugkraft von 27 kN. Unter Vernachlässigung der Verluste im Antrieb und der Hilfsbetriebeleistung der Lokomotive ergibt sich eine Leistungsaufnahme der Lokomotive von 0,3 MW. Bei einer Geschwindigkeit 200 km/h wird die Leistungsaufnahme zu 2,7 MW.

### 18.6.3 Auswertung und Zusammenfassung

Die in einem Speisebereich von den PV-Anlagen erzeugte und in die Fahrleitung eingespeiste Leistung muss zur gleichen Zeit als Traktionsleistung abgenommen und/oder in das übergeordnete Netz (110 kV, 16,7 Hz oder dreiphasiges 50-Hz-Landesnetz) übertragen werden. Abhängig von der tatsächlichen Streckenlänge, der Zugfolgezeiten, den maximal zulässigen Geschwindigkeiten und dem tatsächlich angewendeten Fahrprofil wird Traktionsleistung von der Fahrleitung abgenommen. In den zuvor betrachteten Extremzonen hat sich herausgestellt, dass die mit PV bestenfalls erzeugbare Leistung nicht im-

mer als Traktionsleistung abgenommen werden kann oder in das übergeordnete Netz eingespeist werden kann. Daher ist es essentiell, im konkreten Projekt zu untersuchen, wieviel PV-Leistung maximal erzeugt werden kann, wie groß die Leistungsfähigkeit der Unterwerke ist und wieviel Leistung auf dieser Strecke durch den Zugverkehr mit hoher Wahrscheinlichkeit abgenommen wird und ob die zulässigen Spannungsgrenzen eingehalten werden.

## 18.7 Gesamt-Traktionsenergie-Verbrauch versus PV-Potenzial

Das Gesamt-PV-Potenzial ist in Kap. 17 ermittelt worden zu maximal ca. 3,2 GWp installierbarer PV-Leistung und einem Jahresertrag von 2940 GWh. Nach Vorschlag dieser Studie sind davon 0,66 GWp bzw. 620 GWh (PV-Anlagen auf Gebäuden) günstig in das 50-Hz-Netze einzuspeisen. Nach [108] betrug die in 2021 abgegebene Traktionsenergie 7445 GWh. Damit könnte rein rechnerisch/theoretisch das gesamte Potenzial der PV-Energie als Traktionsenergie genutzt werden.

Es sind leider keine Daten über abgenommene Traktionsleistungen als Tagesverläufe verfügbar<sup>8</sup>. Es kann daher nicht ermittelt werden, ob zu jedem Zeitpunkt die vom ermittelten PV-Potenzial zur Verfügung gestellte Leistung als Traktionsleistung abgenommen werden kann. Aus 2019 sind jedoch, wie im Anhang I beigefügt, Daten zum Traktionsenergieverbrauch in einer Heat-Map regionsbezogen/geografisch dargestellt. Ebenso sind in diesem Anhang die regionalen Leistungsspitzen zu den Starklastzeiten dargestellt. Wie zu erwarten, befinden sich die Lastschwerpunkte in den größeren Wirtschaftsregionen Deutschlands.

Als grobe überschlägige Betrachtung kann ersatzweise folgende Überlegung gelten:

- Aus vorhandenen, jedoch nicht öffentlich zugänglichen Quellen ist folgendes Lastprofil erkennbar:
  - Im Winter ist der Traktionsstrombedarf höher als im Sommer. Es ergibt sich ein nahezu sinusförmiger Verlauf der Leistung (monatlicher Mittelwert) mit dem Maximum in Januar und Minimum im Juli. Die Abweichung vom Mittelwert beträgt ca.  $\pm 15\%$  bis  $\pm 20\%$ .
  - Im Tagesgang ergibt sich ebenfalls ein schwingungsförmiger Verlauf um einen Mittelwert, mit dem Minimum nach Mitternacht und dem Maximum am Nachmittag. Die Abweichung vom Mittelwert beträgt hier ca.  $\pm 50\%$  bis  $\pm 70\%$ .
- Daraus kann geschlossen werden:
  - Die mittlere täglich abgegebene Traktionsenergie beträgt  $7445 \text{ GWh} / 365 \approx 20 \text{ GWh}$ .
  - Die mittlere täglich abgegebene Traktionsenergie im Sommer beträgt  $20 \text{ MWh} * 80\% \approx 16 \text{ GWh}$ .
  - Die mittlere abgegebene Traktionsleistung an einem Sommertag beträgt  $16 \text{ GWh} / 24\text{h} = 666 \text{ MW}$ , die Spitzenleistung ca. 1,3 GW.

Aus dieser überschlägigen Betrachtung wird deutlich, dass die Spitzenleistung der PV-Einspeisungen bei vollständigem Ausbau (Szenario C, Kap. 17.6.3) nicht durch den Zugbetrieb aufgenommen werden kann. Bei Vollausbau der Eisenbahninfrastruktur ist die Einspeiseleistung der PV-Anlagen zu reduzieren oder die überschüssige Energie zu speichern (Batterie, Pumpspeicher, Wasserstoff, etc.). Die Integration von

<sup>8</sup> Ggf. könnte aus verfügbaren Fahrplandaten die geplanten Zugläufe und somit die geplante Leistungsabnahme ermittelt werden. Dies würde jedoch deutlich über die Aufgabestellung dieser Studie hinausgehen.

weiteren dUrw, allein aus dem Grund, um die erzeugte PV-Leistung in übergeordnete Netze einzuspeisen, scheint für dieses Anliegen zu aufwändig. Hier wäre die Einspeisung in das 50-Hz-Landesnetz günstiger. Bei Ausbau nach Szenario B (Kap. 17.6.3) können Gesamtenergie und maximale Leistung durch den Zugbetrieb aufgenommen werden.

# 19 Anbindung erzeugungsnaher interner Verbraucher

Als erzeugungsnaher Verbraucher werden solche Verbraucher elektrischer Energie angesehen, die sich räumlich nahe an in der Bahninfrastruktur installierten PV-Anlagen befinden. Interne Verbraucher sind Verbraucher, die zur Eisenbahninfrastruktur gehören, beziehungsweise zum Eisenbahnbetrieb notwendig sind. Elektrotriebfahrzeuge sind hier von der Betrachtung ausgenommen, sie sind als sehr große Verbraucher bereits in Kap. 18 berücksichtigt.

Folgende erzeugungsnaher interne Verbraucher wurden identifiziert und werden an dieser Stelle bezüglich der Versorgung mit photovoltaisch erzeugter elektrischer Energie betrachtet:

- Weichenheizungen
- Anlagen im und am Bahnhof/Haltepunkt
- Betriebsanlagen in Wartungs- und Reparaturhallen
- Signaleinrichtungen, Stellwerke
- Bahnübergänge
- Beleuchtungsanlagen

Weichenheizungen sind zu kalten Tageszeiten in der kalten Jahreszeit und somit zu Zeiten eingeschaltet, in denen photovoltaisch erzeugte elektrische Energie ohnehin wenig bis gar nicht zur Verfügung steht. Die zu diesen Zeiten photovoltaisch erzeugte elektrische Energie wird aller Voraussicht nach durch den Zugbetrieb, der aufgrund der kalten Temperaturen einen erhöhten Heizenergiebedarf hat, aufgenommen. Zudem werden die Weichenheizungen häufig aus der Fahrleitung betrieben, in die die photovoltaisch erzeugte Leistung zum großen Teil eingespeist werden soll.

Anlagen in und an Bahnhöfen oder Haltepunkten sind recht große Verbraucher elektrischer Energie. Nach Vorschlag dieser Studie sollte die auf Gebäuden photovoltaisch erzeugte Energie direkt in die 50-Hz-Elektrizitätsversorgung (bereitgestellt von DB Energie oder von anderen Versorgern) dieser Gebäude eingespeist werden. Dadurch könnten konventionelle – und damit preisgünstigere – Einspeisungen angewendet werden, die auf den Gebäuden photovoltaisch erzeugte Energie direkt zur Versorgung der vorhandenen Verbraucher eingesetzt werden und überschüssige Energie in das Versorgungsnetz eingespeist und dort von anderen Verbrauchern genutzt werden. Gleiche Überlegungen gelten für Wartungs- und Reparaturhallen sowie für viele andere bauliche Einrichtungen, die an die 50-Hz-Elektrizitätsversorgung angeschlossen sind. In Wartungs- und Reparaturhallen werden häufig auch Fahrleitungen eingeführt, die zum Bewegen der Fahrzeuge genutzt werden. Die dafür an der Fahrleitung abgenommene Leistung und Energie ist jedoch vergleichsweise gering.

Signaleinrichtungen, Stellwerke, Bahnübergänge und Beleuchtungsanlagen werden ebenfalls aus dem 50-Hz-Netz versorgt. Sollte es im Einzelfall günstig erscheinen, PV-Anlagen oder Teile von PV-Anlagen zur Versorgung dieser Infrastruktureinrichtungen zu verwenden, wäre auch hier aus den oben genannten Gründen die Einspeisung der photovoltaisch erzeugten elektrischen Energie in das 50-Hz-Netz zu bevorzugen.

## 20 Recherche der anzuwendenden Regelwerke zu Bahnanlagen

Die DB AG hat für Ihre Konzernunternehmen ein umfangreiches Regelwerk mit betrieblichen Regeln und technischen Vorgaben unter anderem für die Infrastrukturanlagen verbindlich festgelegt. Ziel dabei ist ein möglichst reibungsloser und sicherer Betrieb sowie ein abgestimmtes Zusammenwirken aller Teilsysteme im System Eisenbahn. Mit wachsender Bedeutung finden sich in diesem Regelwerk auch die Belange des Umwelt- und Klimaschutzes sowie Anforderungen und deren Umsetzung für eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Anlagen sukzessive wieder. Das DB-Konzernregelwerk entwickelt sich fortlaufend dynamisch entsprechend den Anforderungen aus gesetzlichen und behördlichen Vorgaben, betrieblichen und technischen Erfordernissen und den anerkannten Regeln der Technik weiter. Bezogen auf Infrastrukturanlagen trifft das DB-Konzernregelwerk Festlegungen für die Planung, den Bau/die Installation, die Prüfung, die Zulassung und Abnahme sowie den Betrieb von Eisenbahnanlagen, um die o. g. Ziele zu erreichen.

Speziell bezogen auf die Planung, die Installation, Zulassung, Abnahme, Prüfung und den Betrieb von PV-Anlagen an oder in der Schieneninfrastruktur, insbesondere in der Nähe von Gleisbereichen und mit Direkteinspeisung der gewonnenen Solarenergie in die Fahrleitung, wurde das aktuell gültige DB-Konzernregelwerk dahingehend geprüft, welche betrieblichen Belange und welche Infrastrukturanlagen davon betroffen sein werden. Dies sind im Wesentlichen die folgenden Bereiche mit ihren zugeordneten DB-Konzernregeln (DB RiL):

- Notfallmanagement Brandschutz - DB RiL 123.xxxx [119]
- Infrastruktur gestalten – DB RiL 413.xxxx [120]
- Bahnanlagen entwerfen – DB RiL 800.xxxx [121]
- Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke – DB RiL 804.xxxx [122]
- Ausgewählte Maßnahmen und Anforderungen an das Gesamtsystem Fahrweg/Fahrzeug: Aerodynamik/Seitenwind – DB RiL 807.04xx [123]
- Personenbahnhöfe planen und bauen – DB RiL 813.xxx [124]
- Beeinflussung und Schutzmaßnahmen von LST- und TK-Technik – DB RiL 819.08xx [125]
- Grundlagen des Oberbaus – DB RiL 820.01xx [126]
- Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instandhalten – DB RiL 836.xxxx [127]
- Gas- und Wasserleitungskreuzungsrichtlinien – DB RiL 877.xxxx [128]
- Stromleitungskreuzungsrichtlinien – DB RiL 878.xxxx [129]
- Telekommunikationskreuzungsrichtlinien – DB RiL 879.xxxx [130]
- Oberleitungsanlagen – DB RiL 997.xxxx [131]
- Elektrische Energieanlagen – DB RiL 954.0xxx [132]
- Schaltanlagen für Bahnstrom – DB RiL 955.0xxx [133]

Zusätzlich wurde die EBA-Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an die Planung, den Bau und den Betrieb von Schienenwegen nach AEG“ [134] in die Betrachtung mit aufgenommen.

Die Rechercheergebnisse zu den genannten RiL sind im Anhang I in tabellarischer Übersicht mit Kommentaren, Hinweisen und Anmerkungen versehen. Aufgenommen in die Übersicht sind die jeweils relevanten Teile der RiL. Es wird aufgezeigt, welche Anforderungen aus den relevanten Teilen der vorgenannten RiL Auswirkungen auf die Gestaltung von PV-Anlagen haben. Diese Anforderungen müssen aus

Sicht der betrieblichen und technischen Kompatibilität bzw. Passfähigkeit mit angrenzenden Anlagen und Nahtstellen zu anderen Systemen bereits in die Konzept- und Planungsphase der PV-Anlagen Eingang finden.

Ebenso sind einige vorhandene RiL fortzuschreiben und zu ergänzen, um die speziellen Besonderheiten, die beim beabsichtigten konkreten Einsatz von PV-Anlagen zur Direkteinspeisung der Solarenergie in die Fahrleitung entstehen, zu berücksichtigen. Dies betrifft vornehmlich die RiL, die Festlegungen zur Inspektion von Bahn-Infrastrukturanlagen treffen, insbesondere für Lärmschutzwände und elektrische Anlagen der Bahnenergieversorgung. Auch die RiL bezüglich der elektrischen Beeinflussungen von Leit- und Sicherungstechnik (LST)- und Gleisfreimeldeanlagen müsste die Möglichkeit der Beeinflussung durch PV-Anlagen neu berücksichtigen. Es wurde keine Regelung in den RiL identifiziert, die die Anwendung von PV-Anlagen in der Bahninfrastruktur gänzlich verhindern würde.

# 21 Weitere bahnunabhängige Regelwerke

Neben den bahnspezifischen Regelwerken sind die technischen Regelwerke zu Errichtung und Betrieb von PV-Anlagen zu berücksichtigen. Diese sind recht umfangreich und basieren auf den allgemein bekannten Normen für elektrische Anlagen. Somit werden nur die spezifischen, im Zusammenhang mit den hier betrachteten PV-Anlagen zu berücksichtigenden Regelwerke benannt. Darüber hinaus sind Regelwerke aus dem Baurecht, Natur- und Umweltschutz und ggf. weitere Regularien tangiert. Diese sind nachfolgend als Überbegriffe aufgeführt und nach Grundlagen kategorisiert (Hinweis: Je nach konkretem Projekt können weitere Regularien relevant sein. Diese sind innerhalb des Projektes zu ermitteln.).

## 21.1 Technische Regelwerke

Die technischen Regelwerke umfassen Normen und RiL, die maßgeblich als Teil der anerkannten Regeln der Technik gelten, aber auch den Stand der Technik widerspiegeln.

DIN VDE 0100-712 Errichten von Niederspannungsanlagen –Teil 7-712: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – PV-Stromversorgungssysteme [40]
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Inhalt: Anforderungen an Komponenten und Aufbauart, insbesondere in Bezug auf die elektrische Sicherheit</li><li>○ Relevanz: zwingend zu berücksichtigen, Fokus auf elektrische Sicherheit</li></ul>
EC 62548 Photovoltaic (PV) array – Design requirements [135]
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Inhalt: Aufbau einer PV-Anlage, Architekturen, Mechanische Ausführung, Sicherheitsaspekte, Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Abnahme, Betrieb/Wartung, Dokumentation</li><li>○ Relevanz: keine europäische oder nationale Norm die zwingend zu berücksichtigen ist, anerkannte Regel der Technik, sehr hilfreich für das Anlagendesign „Best Practice“ in Bezug auf Funktionalität und Sicherheit</li></ul>
DIN EN 61936-1 VDE 0101-1 Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV AC und 1,5 kV DC -Teil 1: Wechselstrom [136]
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Inhalt: grundlegende Anforderungen an Komponenten und Aufbauart, insbesondere in Bezug auf die elektrische Sicherheit</li><li>○ Relevanz: zwingend zu berücksichtigen bei PV-Anlagen über 1 kV, Fokus auf elektrische Sicherheit</li></ul>
VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. [1]

<p>VDE-AR-N 4110 Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. [77]</p> <p>VDE-AR-N 4120 Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz. [78]</p> <p>Bei Betrieb am öffentlichen Netz</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Inhalt: Anforderungen an netzkonformen Aufbau und Regelungsparameter, insbesondere in Bezug auf die elektrische Sicherheit</li> <li>○ Relevanz: zwingend zu berücksichtigen bei netzparallelen Anlagen am öffentlichen Netz, Fokus auf Stromqualität und stabilem Netzbetrieb</li> </ul>
<p>DIN EN 62446-1(VDE 0126-23-1) PV-Systeme –Anforderungen an Prüfung, Dokumentation und Instandhaltung –Teil 1: Netzgekoppelte Systeme – Dokumentation, Inbetriebnahmeprüfung und Prüfanforderungen (IEC 62446-1:2016 + A1:2018); Deutsche Fassung EN 62446-1:2016 + A1:2018. [137]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Inhalt: Anforderungen an Prüfung, Dokumentation und Instandhaltung, insbesondere in Bezug auf die elektrische Sicherheit und Funktionalität</li> <li>○ Relevanz: zwingend zu berücksichtigen, Fokus auf elektrische Sicherheit und Funktionalität</li> </ul>
<p>DIN VDE 0105-100 Betrieb von elektrischen Anlagen –Teil 100: Allgemeine Festlegungen; Wiederkehrende Prüfungen; Deutsche Übernahme von Abschnitt 6.5 des HD 60364-6:2016. [138]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Inhalt: Anforderungen an wiederkehrende Prüfung, insbesondere in Bezug auf die elektrische Sicherheit und Funktionalität</li> <li>○ Relevanz: zwingend zu berücksichtigen, Fokus auf elektrische Sicherheit und Funktionalität</li> </ul>
<p>DIN VDE 0100-600 Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 6: Prüfungen (IEC 60364-6:2016); Deutsche Übernahme HD 60364-6:2016 + A11:2017. [139]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Inhalt: Beschreibung der Durchführung und Prüfanforderungen an Prüfung, insbesondere in Bezug auf die elektrische Sicherheit und Funktionalität</li> <li>○ Relevanz: zwingend zu berücksichtigen, Fokus auf elektrische Sicherheit und Funktionalität</li> </ul>
<p>DIN EN IEC 61215-1 VDE 0126-31-1:2022-02 Terrestrische PV-Module – Bauarteignung und Bauart-zulassung. Teil 1: Prüfanforderungen. [140]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Inhalt: Bauartprüfung von PV-Modulen; Beschreibung der Durchführung von Produktprüfungen und Prüfanforderungen an Prüfung, insbesondere in Bezug auf die Funktionalität und die Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen. „Während Teil 1 dieser Normenreihe Anforderungen (sowohl allgemein als auch spezifisch</li> </ul>

in Bezug auf die Produkttechnologie) festlegt, werden in den einzelnen Teilen von Teil 1 Technologieunterschiede behandelt und in Teil 2 die für die Bauarteignung und Bauartzulassung erforderlichen Prüfverfahren festgelegt. Die in Teil 2 beschriebenen Prüfverfahren gelten für alle Gerätetechnologien. Dieses Dokument legt Anforderungen für die Bauarteignung terrestrischer photovoltaischer Module fest, die für den Langzeitbetrieb in Freiluftklimaten geeignet sind. Die Nutzlebensdauer der so als geeignet bezeichneten Module ist abhängig von ihrer Konstruktion, der Umgebung und den Bedingungen, unter denen sie betrieben werden. Prüfergebnisse werden nicht als quantitative Vorhersage der Modullebensdauer interpretiert.“ (Quelle VDE-Verlag)

- Relevanz: zwingend zu berücksichtigen, Grundlage der CE-Kennzeichnung; Die Bauartprüfung wird durch den Hersteller oder Inverkehrbringer veranlasst. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die speziellen Anforderungen an die PV-Module in der Bahninfrastruktur nicht abgedeckt sind. Insbesondere die erhöhten Stoß- und Vibrationsbelastungen z. B. durch Windstöße und Fahrbewegungen sind nicht abgedeckt.

DIN EN IEC 61730-1 VDE 0126-30-1:2018-10 PV-Module – Sicherheitsqualifikation Teil 1: Anforderungen an den Aufbau (IEC 61730-1:2016); Deutsche Fassung EN IEC 61730-1:2018 + AC:2018. [38]

- Inhalt: Sicherheitsqualifikation von PV-Modulen; Anforderungen an den Aufbau: „Mit dieser Norm wird versucht, die grundlegenden Anforderungen an die verschiedenen Anwendungsklassen der PV-Module festzulegen, es darf jedoch nicht angenommen werden, dass alle nationalen oder regionalen Bauvorschriften eingeschlossen sind. Die spezifischen Anforderungen an Anwendungen auf Schiffen und Fahrzeugen werden nicht behandelt. Diese Norm gilt nicht für Module mit integrierten Wechselstrom-Wechselrichtern (Wechselstrom-Module). Die vorliegende Norm ist so aufgebaut, dass deren Prüffolge mit denjenigen aus IEC 61215 oder IEC 61646 koordiniert werden kann, sodass eine Gruppe von Prüflingen verwendet werden darf, um sowohl die Beurteilung der Sicherheit als auch des Betriebsverhaltens einer PV-Modul-Konstruktion vorzunehmen. Mit dem vorliegenden Schriftstück soll ein grundlegender Leitfaden zur Bestätigung des Aufbaus von PV-Modulen gegeben werden, die zur Bauartzulassung durch Prüfung nach EN 61730-2 vorgelegt werden. Diese Anforderungen sind vorgesehen, um Fehlanwendungen und Missbrauch der Module oder den Ausfall interner Bauteile, die zu Brand, elektrischem Schlag oder der Verletzung von Personen führen könnten, auf ein Mindestmaß zu senken. In der vorliegenden Norm werden die grundlegenden Sicherheitsanforderungen an den Aufbau und zusätzliche Prüfungen festgelegt, die sich entsprechend der Endanwendung der Module ergeben. Die Anforderungen an Bauteile sind dafür vorgesehen, den Nachweis des Betriebsverhaltens zu erbringen, dass diese Bauteile für ihre Anwendungen beim Aufbau und in der Umgebung der Module geeignet sind.“ (Quelle: VDE-Verlag)
- Relevanz: zwingend zu berücksichtigen, Grundlage der CE-Kennzeichnung; Die Überprüfung wird durch den Hersteller oder Inverkehrbringer veranlasst. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die speziellen Anforderungen an die PV-Module in der Bahninfrastruktur nicht abgedeckt sind. Insbesondere die Produktanforderungen durch erhöhte Stoß- und Vibrationsbelastungen, z. B. durch Windstöße und Fahrbewegungen, sind nicht abgedeckt.

DIN EN IEC 61730-2 VDE 0126-30-2:2018-10 PV-Module – Sicherheitsqualifikation Teil 2: Anforderungen an die Prüfung (IEC 61730-2:2016); Deutsche Fassung EN IEC 61730-2:2018 + AC:2018. [141]

- Inhalt: Sicherheitsqualifikation von PV-Modulen; Anforderungen an den Aufbau: „In diesem Teil von EN 61730 werden die Prüfanforderungen an PV-Module beschrieben, um den sicheren elektrischen und mechanischen Betrieb während der erwarteten Lebensdauer zu gewährleisten. Es werden spezifische Themen behandelt, nach denen der Schutz gegen elektrischen Schlag, Brandgefährdungen sowie Verletzungen von Personen infolge von mechanischen und umweltbezogenen Beanspruchungen bewertet werden können. Die Norm EN 61730 1 behandelt die besonderen Anforderungen an den Aufbau. In diesem Teil von EN 61730 werden die Prüfanforderungen beschrieben.“ (Quelle: VDE-Verlag)
- Relevanz: zwingend zu berücksichtigen, Grundlage der CE-Kennzeichnung; Die Überprüfung wird durch den Hersteller oder Inverkehrbringer veranlasst. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die speziellen Anforderungen an die PV-Module in der Bahninfrastruktur nicht abgedeckt sind. Insbesondere die Produktanforderungen durch erhöhten Stoß- und Vibrationsbelastungen, z. B. durch Windstöße und Fahrbewegungen, sind nicht abgedeckt.

## 21.2 Regelwerke in Bezug auf PV-Netzanbindung und Energievermarktung

Da die betrachteten PV-Anlagen nicht als Inselanlagen konzipiert sind, sondern mittelbar oder unmittelbar an das öffentliche Versorgungsnetz gekoppelt sind, sind die rechtlichen Grundlagen zum Anschluss, zur Energieversorgung als auch zur Energievermarktung zu berücksichtigen.

- EEG [11]
  - Inhalt: Rechtliche Grundlagen für die Förderung und Marktintegration von Strom aus Erneuerbaren Energien, Grundlagen Bau- und den Betrieb von erneuerbaren Anlagen, Ausbau der erneuerbaren Energien, Vergütungsregelungen, Regelungen zur Integration in das Elektrizitätsversorgungssystem
  - Relevanz: Gesetzliche Regelung, zentrales Steuerungsinstrument für den Ausbau der erneuerbaren Energien Fokus auf Regelungen zur Einbindung von erneuerbaren Energien
- EnWG [73]
  - Inhalt: Rechtliche Grundlagen für die Regelungen für die Energieversorgung
  - Relevanz: Gesetzliche Regelung (besondere Relevanz für Energieversorgungsunternehmen, Netzbetreiber), Fokus auf Energieversorgung; Hauptzweck des Gesetzes ist eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas

## 21.3 Regelwerke in Bezug auf Natur- und Umweltschutz

Dem Natur- und Umweltschutz ist politisch und rechtlich eine übergreifende Rolle zugeordnet. Die Regelwerke basieren überwiegend auf gesetzlichen Vorgaben und/oder Verordnungen, die z. B. im Baurecht oder anderen Rechtsgrundlagen verankert sein können. Sie sind daher zwingend für das jeweilige PV-Projekt in der Genehmigungs- Umsetzungs- und Betriebsphase zu berücksichtigen.

- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [152]
  - o Inhalt: Schutz des Menschen, der Tiere und Pflanzen, des Bodens, des Wassers, der Atmosphäre sowie Kultur- und sonstiger Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen z. B. vor Lärm, Lichtemissionen, Erschütterungen, Giftstoffen
  - o Relevanz: Regelwerk des Kernbereiches des Umweltschutzes, wird durch andere Gesetze spezifiziert, z. B. Gewässerschutz, Lichtschutz-Richtlinie (Blendungsvermeidung)
- Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege, Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) [142]
  - o Inhalt: Schutz von Natur und Landschaft, sowie Schutz der wild lebenden Tier- und Pflanzenarten, ihrer Lebensstätten und Biotope
  - o Relevanz: Gesetz, zwingend zu berücksichtigen
- Natura 2000
  - o Inhalt: Vogelschutz-Richtlinie (Richtlinie 2009/147/EG, [143]), Schutzgebiete der Fauna-Flora-Habitat (FFH) Richtlinie (Richtlinie 92/43/EWG, [144])
  - o Relevanz: Behördliche Regelung, bei lokaler Zuordnung zwingend zu berücksichtigen
- Regionale Einschränkungen/Vorgaben in Bezug auf geschützte Flora oder Fauna
  - o Inhalt: Z. B. ausgewiesene Schutzgebiete oder spezifische Vorgaben bei der Umsetzung des Projektes
  - o Relevanz: Behördliche Regelung, bei lokaler Zuordnung zwingend zu berücksichtigen
- Regionale Auflagen bzw. Beschränkungen durch Naturschutzvorgaben
  - o Inhalt: Z. B. Einschränkungen bei Bau- und Betrieb der Anlage
  - o Relevanz: Behördliche Regelung, bei lokaler Zuordnung zwingend zu berücksichtigen
- Gewässerschutz
  - o Inhalt: Z. B. Einschränkungen bei Bau- und Betrieb der Anlage durch untere oder obere Wasserschutzbehörde; Die obere Wasserbehörde (Ministerien für Umwelt, Energie und Klimaschutz) schafft den rechtlichen Ordnungsrahmen durch Herausgabe von Gesetzen, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften und Erlassen. Die untere Wasserbehörde (Landkreise, Städte etc.) überwacht die Einhaltung der Anforderungen der Anlagenverordnung (VawS) in allen Punkten
  - o Relevanz: Behördliche Regelung, bei lokaler Zuordnung zwingend zu berücksichtigen

Nachfolgende Hinweise bzw. Kriterien für eine umwelt- und naturverträgliche Installation und Betrieb von PV-Anlagen werden empfohlen:

- Naturschutzbund Deutschland (NABU) – Kriterien für naturverträgliche PV-Freiflächenanlagen basierend auf einer Vereinbarung zwischen der Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft e. V. (heute: BSW-Solar) und dem Naturschutzbund Deutschland – NABU
  - o Inhalt: Empfehlungen für eine umweltverträgliche Standortwahl und Gestaltung von PV-Freiflächenanlagen
- Praxis-Leitfaden für die ökologische Gestaltung von PV-Freiflächenanlagen, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014)

- Inhalt: Empfehlungen für eine umweltverträgliche Standortwahl und Gestaltung von PV-Freiflächenanlagen, mögliche Ausgleichsmaßnahmen sowie positive Beispiele

## 21.4 Baurechtliche Vorgaben

Da es sich bei PV-Anlagen um bauliche Anlagen handelt, sind die baurechtlichen Vorgaben zu befolgen. Im Baurecht gibt es mehrere Ebenen, die auf jeweils unterschiedliche Regelungsbereichen und Zuständigkeiten beruhen.

- Bebauungsplan
  - Inhalt: Rechtliche Grundlagen für die Bebauung (Vorgaben des Baugesetzbuches (BauGB)), regelt die Gestaltung, Struktur und Entwicklung des besiedelten Raumes
  - Relevanz: Behördliche Regelung (im Rahmen der Vorgaben des BauGB und Landesbauordnung). Sobald die Gemeinde einen Bebauungsplan aufgestellt hat, ist dieser zwingend zu berücksichtigen
- Baugenehmigung
  - Inhalt: Rechtliche Grundlagen für das spezifische Bauprojekt (Art und Weise der Bebauung, Ausführungsvorgaben, etc.)
  - Relevanz: Behördliche Regelung (im Rahmen der Vorgaben des BauGB und der Landesbauordnung). Unter bestimmten Randbedingungen sind PV-Anlagen nicht genehmigungspflichtig (z. B. kleine Anlage, auf/an Gebäuden, die unweentlich über die Gebäudehülle hinausragen). Bei PV-Freifeldanlagen ist grundsätzlich von einer Genehmigungspflicht auszugehen
- Nutzungsvorgaben (z. B. Grünland, Agrarfläche, Wald)
- Brandschutz
  - Inhalt: Vorgabe für das spezifische Bauprojekt (Brandschutzkonzept, Brandschutzauflagen im Rahmen der Landesbauordnungen (LBO), z. B. Abstandsregelungen, Leitungsführung, Brandabschnitte, Entflammbarkeits- und Brennbarkeitsklassen)
  - Relevanz: Behördliche Regelung (im Rahmen der Vorgaben des BauGB und Landesbauordnung)
- Denkmalschutz, Bodendenkmäler, archäologische Zonen, etc.
- Belastete Flächen (Altlasten, Mülldeponien etc.), hier können auch das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) [145] oder die Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung (BBodSchV) [146] berührt sein

## 21.5 Sonstige Vorgaben von Behörden und Institutionen

Neben den zuvor genannten Regelwerken gibt es weitere, durch Institutionen geregelte, Vorgaben und Handlungsanweisungen. Sie dienen der Klarstellung und Interpretation der gesetzlichen Regelungen, oder nehmen Stellung zu Sachverhalten, die in den Regelwerken nicht abschließend behandelt werden.

- Bundesnetzagentur und Clearingstelle
  - Inhalt: Kein Regelwerk. Die Bundesnetzagentur ist eine selbständige Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz

- (BMWK). Die Bundesnetzagentur fördert den Wettbewerb in den Märkten für Energie, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
- Relevanz: Beschwerdestelle; Meldestelle für PV-Anlagen, Eintragung der PV-Anlage in das Marktstammdatenregister (MaStR). Das Marktstammdatenregister ist das Register für den deutschen Strom- und Gasmarkt. Im MaStR sind vor allem die Stammdaten zu Strom- und Gaserzeugungsanlagen zu registrieren. Außerdem sind die Stammdaten von Marktakteuren wie Anlagenbetreibern, Netzbetreibern und Energielieferanten zu registrieren. Das MaStR wird von der Bundesnetzagentur geführt
  - Clearingstelle EEG/ Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)
    - Inhalt: Kein Regelwerk; Klarstellung und Interpretation der gesetzlichen Regelungen; die Clearingstelle EEG/KWKG ist eine neutrale Stelle zur außergerichtlichen Klärung von Fragen und Streitigkeiten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes [73], des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes [147] und des Messstellenbetriebsgesetzes [148]
    - Relevanz: Beschwerdestelle; klärt Anwendungsfragen und Konflikte im Bereich des EEG [73]

## 22 Auswirkungen, Einschränkungen, Hemmnisse, Synergien

In den beiden vorherigen Kapiteln 20 und 21 wurden die Regelwerke zu Bahninfrastruktur und bahnunabhängige Regelwerke mit Relevanz für PV-Anlagen in der Schieneninfrastruktur identifiziert und die Relevanz bewertet. Um weitere Anforderungen für das nutzbringende und zufriedenstellende Zusammenwirken von Bahn und PV-Anlagen zu ermitteln, die noch nicht in Gesetzen, RiL, Vorschriften, Regelungen und weiteren Anforderungsdokumenten enthalten oder bisher noch nicht identifiziert sind, wurden Interviews mit mehreren Expertinnen und Experten aus dem Bahnbereich geführt. Aus den identifizierten Anforderungen ergeben sich zum Teil Einschränkungen und Restriktionen, einerseits für die PV-Anlagen, die neu in die Bahninfrastruktur integriert werden, und andererseits für die Bahn bei neu eingebrachten PV-Anlagen. Je nach Umfang und dem resultierenden Aufwand können die Einschränkungen und Restriktionen zu Hemmnissen werden. Ziel der Interviews war es auch, die Einschränkungen und Restriktionen zu bewerten, ggf. Abhilfe- oder Minderungsmaßnahmen abzuleiten, Handlungsoptionen aufzuzeigen und möglicherweise Synergien zu erkennen.

Die Resultate der Interviews werden im Folgenden (Kap. 22.1 bis 22.7) thematisch strukturiert zusammengefasst. Die Aussagen der Interviewpartnerinnen und -partner aus den Gesprächsverläufen wurden übernommen, evtl. wurde die Formulierung leicht angepasst. Die Aussagen wurden im Nachgang nicht verifiziert oder bewertet. Jedoch wurde während des Interviews zum Verständnis und der späteren richtigen Wiedergabe tiefer liegender Zusammenhänge hinterfragt. Sofern Stellungnahmen von mehreren Interviewpartnerinnen und -partnern mit gleichem oder sehr ähnlichem Inhalt abgegeben wurden, werden sie im Folgenden nur einfach aufgeführt. Zum Teil wurden auch ähnliche Standpunkte, jedoch mit leicht anderen Ausrichtungen oder Akzentuierungen vertreten, die dann einzeln wiedergegeben sind. Weder die Reihenfolge der wiedergegebenen Aussagen noch die Anzahl von wiedergegebenen ähnlichen Aussagen stellt eine Wertung dieser Aussagen dar. Die Reihenfolge der aufgeführten Aussagen bedeutet nicht, dass daraus eine Kausalität geschlossen werden kann; auch wird mit der Reihenfolge ausdrücklich nicht die Priorität der Aussagen gewertet.

Einzelne wenige, gewiss richtige Aussagen, die wichtig und beachtenswert für das Bahnsystem sind, wurden hier nicht übernommen, da sie nicht den spezifischen Inhalt dieser Studie betreffen. Wir verschern, keinen relevanten Aspekt unterschlagen oder verfälschend dargestellt zu haben. Im Vergleich der Interviews kann hervorgehoben werden, dass keine Aussage einer Interviewpartnerin oder eines -partners einer Aussage einer anderen Interviewpartnerin oder eines anderen -partners widerspricht. Sie sind vielmehr gegenseitige Ergänzungen aus unterschiedlichen fachlichen Blickwinkeln.

Da den Interviewpartnerinnen und -partnern Anonymität zugesagt wurde, sind ihre Namen nicht angegeben.

Die Stellungnahmen aus den Interviews stellen einen umfassenden Fundus an Expertenwissen aus verschiedenen Fachdisziplinen der Bahntechnik und der Eisenbahn-Aufsichtsbehörde zusammen. Sie enthält sehr wertvolle Hinweise zu einzuhaltenden Vorschriften und Anforderungen und spiegelt existierende Erfahrung wider. Mit Kenntnis dieser Hinweise ist ein vorausschauender Blick bei der Planung, beim Bau und beim Betrieb von PV-Anlagen in der Bahninfrastruktur möglich, der viele wichtige Aspekte berücksichtigt, womit gewiss ein großer Teil von möglichen Schwierigkeiten von vornherein umgangen werden kann.

Anhand der Gesprächsergebnisse wurde auch ein Forschungsbedarf in einigen technischen Fachdisziplinen festgestellt, da es in einigen Teilgebieten bisher keine oder nur unzureichende bahnsystemspezifische Lösungen gibt.

Zum Schluss erfolgt in Kap. 22.8 eine Darstellung der sich aus der PV-Anwendung ergebenden Synergien.

## 22.1 PV-Module in der Nähe der Gleise

### 22.1.1 Generelle Anmerkungen

Die Nähe zum Gleis ist günstig, da verbrauchsnahe Erzeugung grundsätzlich zu befürworten ist.

Bei in der Nähe der Gleise (genaue Definition von "Nähe" ergibt sich aus den Vorschriften) installierten Komponenten und Anlagen ist eine bahnspezifische Zulassung durch das EBA und DB Netz erforderlich.

Um die Vegetationskontrolle zu ermöglichen, sollte der Schotterdamm nicht für PV-Module genutzt werden.

Ggf. wird der Rückschnitt von Pflanzen aufwändiger, wenn PV-Anlagen in der Nähe der Schienenstrecke installiert sind.

Ein Abstand von 2 – 3 m zum Gleis wird als unproblematisch angesehen.

Es müssten in ausreichenden Abständen Zugänge zum Schienenweg eingerichtet sein, um Wartungs- und Reparaturarbeiten zu ermöglichen.

Reflexionen des Sonnenlichtes an den Moduloberflächen können zu Blendung führen. Die Sonnenlicht-Reflexionen dürfen weder für den Zugverkehr (Blendung der Fahrzeugführerinnen und -führer) noch für benachbarte viel befahrene Straßen (Bundesautobahnen, Bundesstraßen) eine Gefährdung darstellen. Darüber hinaus sind angrenzende Wohngrundstücke oder andere im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [152] definierte schützenswerte Objekte zu berücksichtigen, um die Akzeptanz der Systeme nicht zu gefährden und einen kostenintensiven Umbau oder schlimmstenfalls Rückbau zu vermeiden. Das Thema Blendung ist jedoch sehr individuell abhängig von den konkreten Umgebungsbedingungen der jeweiligen Fläche. Die Blendungsrisiken sind daher bei der konkreten Projektplanung zu prüfen und zu berücksichtigen.

In Gleisnähe bestehen erhöhte Brandschutzanforderungen.

Die normalerweise große Zerkleüftung der Grundstücke reduziert die möglichen Stellen, an denen eine PV-Anlage mit sinnvoller Größe errichtet werden kann. Die spezifische Geometrie dieser Anlagen (schmal, lang) führt zu hohen internen Verlusten und vermindert den Ertrag.

Insgesamt spielt der Zustand der Infrastruktur eine Rolle bei Installationen in Gleisnähe.

Problematisch ist, Anbieter für PV-Anlagen im Bahnbereich zu finden. Meist werden die unbekannten bahnspezifischen Regelungen bei gleichzeitig geringer Stückzahl gescheut.

Aktuelle Pilotprojekte in Deutschland und Österreich zeigen die wirtschaftlich schwierige Lage für solche Anlagen. Dazu zählt auch, dass für die Instandhaltung eine „Genehmigung für Arbeiten im Gleis“ benötigt wird, die nur Fachunternehmen und die DB Netz erhalten.

Es existiert auch die Idee, Bahnstrecken zu überdachen und somit als Fläche für PV zu nutzen. Im Gleisbereich ergäben sich durch die Überdachung aufgrund des Witterungsschutzes weitere Vorteile. (Nachträgliche Anmerkung der Autorinnen und Autoren: siehe Kap. 6, Rechercheergebnisse realisierter Projekte: 2011, Belgien, Tunneldach Hochgeschwindigkeitsstrecke Paris – Amsterdam, ca. 3 MWp).

In Belgien gibt es eine PV-Anlage, die zur Einspeisung in das Bahnnetz genutzt wird. Dort gemachte Erfahrungen wären sicherlich auch hilfreich für in Deutschland vorgesehene Anlagen. (Nachträgliche Anmerkung der Autorinnen und Autoren: siehe [151].)

## 22.1.2 Mechanische Belastungen

Die Beanspruchungen infolge der Druck- und Sogwelle passierender Züge müssen wie bei der Bemessung von LSW-Elementen in den Nachweisen der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Ermüdung berücksichtigt werden. Während einer durchschnittlichen Lebensdauer von 50 Jahren müssen die daraus resultierenden Lastwechsel schadlos ertragen werden. Dazu gibt es einen EBA-Leitfaden ("Leitfaden für die Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen für Wandelemente von LSW im Anwendungsbereich der Eisenbahnen des Bundes im Rahmen des Zulassungsverfahrens beim Eisenbahn-Bundesamt", Vorabzug 01/2023). Dementsprechend gelten solche Anforderungen auch analog für PV-Module, die an LSW montiert werden sollen.

Belastung durch Eisabwurf ist zu berücksichtigen.

Belastung durch Schneeräumung ist zu berücksichtigen.

Die PV-Module müssen resistent gegen Beschädigungen sein.

## 22.1.3 Verschmutzung

In Gleisnähe gibt es hohe Verschmutzungen; dies insbesondere an Stellen an denen regelmäßig gebremst wird.

Eine Lösung gegen hohe Verschmutzung könnten schmutzabweisende Beschichtungen der PV-Module sein.

Die Verschmutzung durch Bremsstäube und Abrieb der Stromabnehmer ist zu berücksichtigen.

## 22.1.4 Betriebliche Aspekte, Inspektion, Wartung, Reparatur

Die vorhandenen Gleise sind bereits heute stark ausgelastet. Jede Inspektion, Wartung oder Reparatur stellt eine betriebliche Behinderung dar. Bei zusätzlichen Anforderungen oder Erschwernissen durch die PV-Anlagen würde es mehr und/oder länger dauernde betriebliche Behinderungen geben.

Bzgl. Vegetationsrückschnitt sind die PV-Module als unkritisch anzusehen. Jedoch wird der Grünschnitt aufwändiger.

Je näher die PV-Anlage am Gleis installiert ist, desto höher ist das Gefährdungspotenzial. Bei Arbeiten an der Anlage sind entsprechende Sicherungsmaßnahmen notwendig. Die Arbeiten, inkl. der Organisation werden aufwändiger.

Bei Gleisbegehungen, deren Intervall von der Streckengeschwindigkeit abhängig ist, und anderen Untersuchungen sowie Sonderinspektionen ist das Personal angehalten, auch nebenstehende Anlagen und Lärmschutzwände von beiden Seiten zu sichten/zu inspizieren (siehe DB-Ril 821).

Eine visuelle Inspektion der offen verlegten Kabel muss auch bei installierter PV-Anlage weiterhin möglich sein.

Bzgl. Inspektion, Wartung und Reparatur an den PV-Anlagen:

- Aus Sicherheitsgründen darf normalerweise nicht mit großen Maschinen in der Nähe des Gleises gearbeitet werden.
- Personal muss entsprechend ausgebildet sein, um im Umfeld der Bahn und Oberleitung arbeiten zu dürfen.
- Zur Reinigung der PV-Anlagen ist die Verwendung von Strahlwasser zu prüfen. Durch die Nähe zur Oberleitung können Gefahren entstehen. (Nachträgliche Anmerkung der Autorinnen und Autoren: gängige Methode sind Reinigungen mit textilen Bürsten/Walzen, keine Hochdruckreinigung)
- Arbeiten an PV-Anlagen sollten möglichst nicht von der Gleisseite aus nötig sein, um den Zugverkehr nicht zu behindern.

## 22.1.5 Sonstige Anforderungen

Beim Design der PV-Anlage sind nach den Anhängen zur Richtlinie 804.5501 noch weitere Anforderungen zu erfüllen, wie beispielweise bei einem Böschungsbrand.

Bei der Installation an Brücken ist zu beachten, dass beim Herabfallen von PV-Modulteilen aufgrund von Beschädigungen und/oder Vandalismus der unterföhrte Verkehrsweg nicht beeinträchtigt wird. Bei LSW wird beispielsweise durch eingegossene Polyamidfäden die Splitterwirkung vermieden.

Bei PV-Modulinstallationen an Tunnelmündern, müssen diese demontierbar/abbaubar sein, um Inspektionen zu ermöglichen.

Im Fall einer Havarie eines Personenzuges muss es weiterhin möglich sein, die Passagiere zu evakuieren. Entsprechende Wege müssen frei bleiben. In Folge kann nicht die gesamte, theoretisch zu Verfügung stehende Fläche für PV-Anwendungen genutzt werden.

# 22.2 PV-Module an der LSW, am Lärmschutzwall

## 22.2.1 Generelle Anmerkungen

Die Anbringung an den Innenseiten ist vermutlich ungünstig, da damit die Absorption von Lärm und somit der eigentliche Zweck der Lärmschutzwände eingeschränkt wäre.

PV-Module sollten nur an schienenabgewandter Seite installiert werden. Aufgrund des einzuhaltenden Lichtraumprofils ist oft nur die Installation an der schienenabgewandten Seite möglich. (Nachträgliche Anmerkung der Autorinnen und Autoren: bei integrierten PV-Modulen ist dies nicht relevant.)

Die Funktion der Schalldämpfung soll/darf nicht durch die vorgehängten PV-Module beeinträchtigt werden. Siehe auch DB-Ril 804-5501.

Die mögliche Blendung der Fahrzeugführerinnen und -führer durch die PV-Module ist zu berücksichtigen.

Anstelle von z. B. transparenter LSW-Aufmachung können auch Solarmodule verwendet werden, wenn diese die Funktion der Schalldämpfung wie die einer LSW erfüllen.

Es gibt kein zugelassenes LSW-Element mit integriertem PV-Modul. Derzeit gibt es keine Zulassung zusätzlich an der LSW PV-Module anzubringen.

## 22.2.2 Mechanische Belastung

Bei Anbringung an den Innenseiten ist die hohe Druck- und Sogbelastung zu berücksichtigen.

Die Bewegungen resultierend aus Schwingungen im unmittelbaren Gleisbereich als auch Windbeanspruchungen erzeugen Einwirkungen an den LSW, die berücksichtigt werden müssen. Bei LS-Wällen müssen ebenso solche Einwirkungen berücksichtigt werden. Bei schwingungsanfälligen LSW ist dies besonders bedeutsam.

Ab einer Entfernung von ca. 6 m zum Gleis ist fast nur der natürliche Wind bemessungsrelevant, entsprechend Eurocode 1: DIN EN 1991-2.

Auch die Rückseite der LSW ist mit Sog/Druck (Ausgleich der Druckunterschiede) beaufschlagt.

Die Ermüdungssicherheit und die Tragsicherheit muss nachgewiesen werden. Ermüdungsversuche wurden bei der Zulassung von LSW-Elementen durchgeführt. Diese Versuche sind aufwändig, da zum einen die hohen Lastwechselzahlen im Versuch nachgefahren und zum anderen im Falle von transparenten LS-Elementen auch Versuche an vorgesägten und gealterten Modulen durchgeführt werden müssen.

Beschädigungen an den PV-Modulen können durch aufgewirbelten Schotter entstehen.

Vibrationen und Schwingungen am Gleis sind zu berücksichtigen. Empfehlung: man sollte nie näher als 3 m mit den PV-Anlagen an die Gleise herangehen.

Bei Lärmschutzwällen: Beim Aufbau einer PV-Anlage darf die Stabilität des LS-Walls nicht beeinträchtigt werden.

Bei der Anbringung an den Außenseiten ist sicherzustellen, dass die zusätzliche mechanische Belastung der LSW abgesichert ist.

## 22.2.3 Betriebliche Aspekte, Inspektion, Wartung, Reparatur

Es spricht Einiges dagegen, PV-Module auch auf der Innenseite der Lärmschutzwände zu montieren. Bei Strecken ohne Hochgeschwindigkeitsverkehr beispielsweise sind alle drei Jahre ingenieurtechnische Be-gutachtungen im Rahmen der Inspektion durchzuführen.

Die Inspektion der Lärmschutzwände ist auch bei vorhandenen PV-Modulen zu gewährleisten.

Eine mögliche Maßnahme, um eine Inspektion zu realisieren, ist eine Aufteilung der Modulfelder mit definierten Freibereichen an den zu prüfenden Punkten (Ankerpunkte, Befestigungselemente). Es sind weiterhin Möglichkeiten zur einfachen Demontage/Wiedermontage zu schaffen.

Bei Gleisbegehungen, deren Intervall von der Streckengeschwindigkeit abhängig ist, und anderen Untersuchungen sowie Sonderinspektionen ist das Personal angehalten, auch nebenstehende Anlagen und Lärmschutzwände von beiden Seiten zu sichten/inspizieren (siehe DB-Ril 821).

Die Inspektion der Lärmschutzwände wird beeinträchtigt und erschwert.

Für die Inspektion der LSW genügt evtl. auch die Möglichkeit der Einsicht hinter die vormontierten PV-Module.

## 22.2.4 Schutz vor elektrischem Schlag

Die Belastung der PV-Module im Falle von Kontakt mit herabhängender Oberleitung (nach Oberleitungsriß) ist zu berücksichtigen. Der Schutz vor elektrischem Schlag muss gewährleistet sein. (Stichwort Potenzialverschleppung.) Dies gilt auch für PV-Module an LSW. Anm.: Der Oberleitungsriß ist auch bei auf der Außenseite der Lärmschutzwände angebrachten PV-Module zu berücksichtigen, da die (nicht isolierende) LSW von der Oberleitung berührt werden kann.

# 22.3 Installation der PV-Module im Gleisbett

## 22.3.1 Generelle Anmerkungen

Aufgrund der großen verfügbaren Fläche wird generell ein großes Potenzial gesehen.

Das Gleis ist evtl. Rettungsweg. Die PV-Module müssen daher begehbar sein.

Der mögliche Hitzestau ist zu analysieren, um mögliche Auswirkungen dadurch (in den PV-Modulen, aber auch zwischen PV-Modulen und Schwellen) zu identifizieren und durch geeignete Anforderungen/Maßnahmen zu kontrollieren.

Die Installation im Gleisbett erfordert sehr lange Kabelwege.

Unterschiedliche Interessenlagen innerhalb der Organisation der Bahn stellen ein Hemmnis dar: der Anlagenverantwortliche ist für den sicheren operationellen Betrieb und die Instandhaltung verantwortlich. Er ist auf die Bereitstellung der entsprechenden finanziellen Mittel angewiesen, um z. B. den erhöhten Aufwand der PV-Anlagen für die Instandhaltung tragen zu können.

Es ist eine Pilotanlage auf der Teststrecke der Erzgebirgsbahn in Sachsen installiert. Hier sind lediglich die Module ohne Verkabelung installiert.

Der Ertrag ist aufgrund der ungünstigen Ausrichtung der Module gering. (Nachträgliche Anmerkung der Autorinnen und Autoren: siehe Kap. 11, hier sind die LCOE abgeschätzt.)

Die Installation ins Gleisbett wird als nicht wirtschaftlich eingeschätzt.

Es sind umfangreiche Tests zu planen, um die diversen Anforderungen (insbesondere mechanische und weitere umgebungsbedingte Belastungen) im Feldversuch zu validieren. Die Tests sollten zunächst auf wenig befahrenen Strecken, z. B. Rangiergleise, durchgeführt und dann in der Folge schrittweise an Strecken mit höheren Belastungen (mehr Verkehr, höhere Geschwindigkeiten) ausgedehnt werden.

## 22.3.2 Mechanische Belastung

Schotterflug gefährdet die PV-Module. Sie müssen dementsprechend ausgelegt sein.

Eisabwurf gefährdet die PV-Module. Sie müssen dementsprechend ausgelegt sein. S. a. TSI-Anforderungen bei  $v > 250$  km/h: Eurobalisen werden einem Beschusstest mit einer Geschwindigkeit von 300 km/h ausgesetzt (Durchführung durch DB-Systemtechnik).

Sog- und Druckwirkung belastet und gefährdet die PV-Module. Die PV-Module müssen entsprechend ermüdungssicher sein.

Im Gleisbereich gibt es hohe Belastungen durch Stöße und Vibrationen.

Die Zwischenräume der Schwellen werden mit Unkrautbekämpfungsmittel besprüht.

## 22.3.3 Verschmutzung

Durch den Abrieb des Schotters im Zugbetrieb und auch durch Schienenschleifarbeiten entsteht feiner Staub, der die PV-Module verschmutzt.

Vermehrter Schotterabrieb entsteht im Übergangsbereich zwischen Schotterfahrbahn der freien Strecke und Brücken. Dies deutet auf eine starke Gleisbewegung hin. In solchen Übergangsbereichen sollten keine PV-Module installiert werden.

## 22.3.4 Befestigungstechnik

Die Befestigung der PV-Module darf die Festigkeit der Schwellen nicht unzulässig mindern. Eine entsprechende Befestigungstechnik ist zu entwickeln.

Festklemmen an Schienen oder Anbohren an Schwellen ist prinzipiell denkbar. Es wird auch bei anderen Komponenten (z. B. Eurobalisen, Achszählern und Spurstangen) so verfahren.

Schienenschwellen dürfen prinzipiell nicht angebohrt werden (Ausnahmen nur punktuell, z. B. bei Eurobalisen, die an zwei kleinen Bohrungen befestigt werden), dadurch entfällt eventuell die Möglichkeit des Anschraubens von PV-Modulen auf die Schwellen. Die auftretenden Kräfte müssen ermittelt und nachgewiesen werden.

Die Befestigungen müssen den mechanischen Belastungen, durch z. B. Zug- und Druckkräfte, Stöße und Vibrationen standhalten.

Durch Festklemmen an den Schienen wird ggfs. das Schwingverhalten beeinflusst.

Generell ist bei der Befestigung der PV-Module zu prüfen, ob und wie diese die Geräuschentwicklung beeinflussen bzw. ob eine zusätzliche Lärmelastung entsteht.

Aus Gründen der Instandhaltung ist zwischen Oberkannte der Schiene und Oberkante von Befahrbarkeitsplatten ein Höhenunterschied von 6 cm erforderlich (Ril 820. 2020A11, Kap. 2 (2)). Weiterhin muss ein seitlicher Abstand von 250 mm eingehalten werden (Ril 820. 2020A11, Kap. 2 (3)). Diese Regeln wären aus Analogiegründen auch auf PV-Module übertragbar, da es hier um Abstände für die Instandhaltung geht. Diese sind mit der Bahn abzustimmen.

## 22.3.5 Betriebliche Aspekte, Inspektion, Wartung, Reparatur

Inspektion der Gleise muss auch bei vorhandenen PV-Modulen möglich sein.

Die Doppelfunktion der Fahrbahn als Fahrweg und zur Energiegewinnung ist ein wichtiges Thema für die Verfügbarkeit und Instandhaltung des gesamten Bahnsystems. Wie häufig müssen Wartungen an den PV-Anlagen erfolgen? Können diese während des Bahnbetriebes durchgeführt werden? Anmerkung: Die Instandhaltung des Gleises wird zunehmend zum Problem, weil keine Zeitfenster dafür zur Verfügung stehen. Es ist ein Zielkonflikt zwischen einer hohen Verfügbarkeit und notwendiger Instandhaltung am sensibelsten Element, dem Gleis.

Die Gleise und Schwellen sind regelmäßig (abhängig von der maximal zulässigen Geschwindigkeit und der Belastung auf dem jeweiligen Streckenabschnitt, s. a. RL 821. 2001 bis RL 821. 2004) zu inspizieren. Bei der Gleisbegehung erfolgt eine Sichtprüfung des Gleisbettes und der Schwellen. Im Falle von auf den Schwellen angebrachten PV-Modulen ist die eigentliche Begehung (Schritte im Schwellenabstand) nicht oder ggfs. nur eingeschränkt möglich. Die freie Sicht auf Gleis und Schwelle ist nicht gegeben. Im Falle von im Gleisbett angebrachten PV-Modulen müsste das Personal die Begehung auf dem Schotter durchführen, dabei wäre der Arbeitsschutz beeinträchtigt.

Reinigung der Gleise, Stopf- und Richtarbeiten sowie Schienenerneuerungen sind wiederkehrende Arbeiten am und im Gleis. Diese dürfen durch die installierten PV-Module nicht zu sehr behindert werden. Entsprechende technische und organisatorische Anforderungen müssen erarbeitet werden.

Die Intervalle für die Schotterstopfung sind von der Befahrung/Geschwindigkeit abhängig. Einerseits behindern die im Gleisbett montierten PV-Module die Stopfung, andererseits werden die PV-Module durch die Arbeiten stark belastet.

Mögliche Milderungsmaßnahme bzgl. Wartung und Reparatur: Die PV-Module müssen abhebbar bzw. demontierbar sein.

Die Vegetationskontrolle ist erschwert.

Negative Auswirkungen auf die Kontrolle (Sichtkontrolle, aber auch Messungen) der signaltechnischen Kabel, die mindestens halbjährig durchzuführen ist, werden nicht gesehen.

Die Schienen müssen instandgehalten und auch bei Bedarf ausgetauscht werden. Dabei werden die neuen Schienen nach Anlieferung im Gleisbett zwischengelagert. Diese Lagermöglichkeit ist bei auf den Schwellen oder in den Schwellenzwischenräumen aufgebrachten PV-Modulen nicht mehr oder nur eingeschränkt gegeben.

Grundsätzlich scheint die feste Fahrbahn insbesondere aufgrund der dort nicht vorhandenen Schotterproblematik gegenüber den Schottergleisen die zu bevorzugende Variante. Für feste Fahrbahnen gilt auch:

- Bohrungen in der Fahrbahn können leichter vorgenommen werden (keine Einschränkungen wie bei Schwellen).
- Inspektionen sind leichter durchführbar, da links und rechts mehr Platz zur Verfügung steht.
- Das Schotterstopfen entfällt.

## 22.3.6 Schutz vor elektrischem Schlag

Die Belastung der PV-Module im Falle von Kontakt mit herabhängender Oberleitung (nach Oberleitungsriß) ist zu berücksichtigen. Der Schutz vor elektrischem Schlag muss gewährleistet sein (Stichwort Potenzialverschleppung).

## 22.3.7 Elektromagnetische Verträglichkeit

Die zusätzlichen Kabel könnten die Funktion der Gleisfreimeldung beeinflussen.

Gleichstrom im Gleisbereich ist bzgl. EMV ein neues, bisher nicht berücksichtigtes, Thema.

Der Einfluss durch die beim Einsatz von Wirbelstrombremsen (auf festen Fahrbahnen) entstehenden Magnetfeldern auf die PV-Module muss berücksichtigt werden.

## 22.4 Installation an baulichen Einrichtungen

Ein mögliches Hindernis stellen fehlende oder unzureichende Kenntnisse z. B. bzgl. der Statik der Bauwerke dar.

Zu berücksichtigen sind Einschränkungen bei der Umgestaltung von Bauwerken aufgrund von Architektenrechten.

Der Denkmalschutz ist ggf. zu berücksichtigen.

Der Brandschutz muss sichergestellt bleiben. (Nachträgliche Anmerkung der Autorinnen und Autoren: dies schließt den Blitzschutz ein.)

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) muss sichergestellt sein.

Bei nahe am Gleis stehenden Gebäuden ist das Lichtraumprofil zu beachten.

Es werden keine Probleme bei der Einspeisung der PV-Leistung in das 50-Hz-Drehstromnetz gesehen.

Insbesondere ältere Gebäude der DB haben zum Teil keine Energiemessung. Solche Messeinrichtungen müssten nachgerüstet werden. Bei Neuinstallation einer solchen Messeinrichtung kann der Bestandschutz der bestehenden 50-Hz-Verteilungsanlagen gefährdet sein.

Eisenbahnbetriebsanlagen, z. B. Stellwerke, werden i. d. R. durch den Bund (mit-)finanziert. PV-Anlagen werden nach bisheriger Auffassung des EBA nicht mitfinanziert (Im Moment ist die Sichtweise wie folgt: Wird eine PV-Anlage auf einem subventionierten Gebäude installiert, könnte der Eigenbedarf genutzt werden. Die Vergütung aus überschüssiger, ins Netz gespeister Energie müsste an den Bund abgeführt werden. Dies hemmt die Bereitschaft, PV-Anlagen auf den Gebäuden zu installieren. Ggf. wären zusätzliche technische Einrichtungen erforderlich, wie z. B. ein Zweirichtungszähler.).

Es darf keine Beeinträchtigung der Sicherungstechnik geben. Eine Gefahr wird gesehen, da PV-Anlagen häufig über das Internet gesteuert werden. Nicht autorisierter Zugang zu sicherheitskritischen Bereichen könnte erleichtert werden.

## 22.5 Einspeisung in die Oberleitung

### 22.5.1 Allgemeines

Die Technischen Netzanschlussbedingungen der DB für die Einspeisung in das AC 15 kV, 16,7 Hz Oberleitungsnetz [149] sind als maßgebliches Regelwerk relevant.

Weiter sind Anforderungen aus den Erfahrungen des Anlagenbetriebes bei der DB zu berücksichtigen.

Die vier Themen Schutz der Fahrleitung, Leistungsregelung, Netzkurzschlussleistung und Netzstabilität sowie EMV müssen durch entsprechende Forschungen zu diesen Themen gelöst werden, bevor die PV-Einspeisung als Direkteinspeisung in die Fahrleitung realisiert werden kann. Übergangsweise ist es die zu bevorzugende Lösung, wenn die PV-Solarenergie direkt in die 110 kV 16,7 Hz Ebene, dort wo verfügbar, eingespeist wird. Wenn diese nicht verfügbar ist, wird vorgeschlagen, in die 50 Hz Netze der Energieversorger einzuspeisen.

Die Fahrleitung ist kein Transport- oder Verteilnetz. Der Lastfluss durch die Fahrleitung sowie die Abnahme und die Transportkapazität sind begrenzt. Die Längstransportkapazität ist nicht auf Lastfluss dimensioniert. Hierzu müssten eine Anschluss- und Migrationsanalyse durchgeführt werden.

Es gibt wenige Anbieter von Stromrichtern zur Einspeisung in die Oberleitung. Die Entwicklungskosten für die Stromrichter sind hoch.

Es gibt derzeit keine vom EBA zugelassene PV-Wechselrichter für die Einspeisung in die Oberleitung.

Problematisch ist derzeit, geeignete und zugelassene Umrichter zur Einspeisung in die Fahrleitung zu finden. Bisher verwendete Umrichter sind Modifikationen konventioneller Anwendungen (Einspeisung in das 50-Hz-Netz). Das Zulassungsverfahren ist aufwändig. Die Schwierigkeiten liegen in vielen Details, insbesondere in der Steuerung und Regelung des Umrichters.

Für die PV-Installateuren und Installateure und die Hersteller von PV-Wechselrichtern sind die bahnspezifischen Anforderungen neu und ungewohnt. Zusätzlich wird die Projekt-Planung aufwändig und ungewohnt. (Nachträgliche Anmerkung der Autorinnen und Autoren: Im März 2023 wurde ein Forschungsprojekt »PV4Rail« (Solarstrom für das Bahnstromnetz) beim Fraunhofer ISE in Partnerschaft mit der DB Energie GmbH und der Schweizer Bundesbahnen (SBB) gestartet. Im Projekt soll die systemtechnische Lücke der nicht verfügbaren kosteneffizienten Systemtechnik geschlossen werden.)

Bei größeren Grundstücken oder nahe beieinanderliegenden Grundstücken, und damit verbundener großer Einspeiseleistung, ist ggf. die Kapazität des Netzes nicht mehr ausreichend. Dieses müsste dann ggf. ausgebaut werden, was mit erheblichen Kosten verbunden wäre.

Das Bahnstromnetz ist heute nicht ausgelegt auf fluktuierende Einspeisungen.

Der Nutzungsgrad eingespeister Energie dürfte bei Einspeisung in die Fahrleitung geringer sein, als bei Einspeisung in die Bahnstromleitung.

Hemmnis für die großflächige Anwendung der PV-Energieerzeugung in der Bahninfrastruktur werden die Kosten sein. Da für 16,7-Hz-Anwendungen sehr geringe Stückzahlen zu erwarten sind, werden die Kosten für alle Komponenten hoch bleiben. Notwendige Entwicklungen werden Spezialentwicklungen bleiben. Eine Auslegungsleistung < 1 MW ist wirtschaftlich nicht vorstellbar.

Aus technischer Sicht besteht kein Hemmnis für die Aufstellung von Betonschalthäusern, in denen die technische Ausrüstung für eine PV-Anlage, z. B. Schaltanlage, Wechselrichter, enthalten ist.

Generell wird die Einspeisung in das 50-Hz-Netz, insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht, als vorteilhaft angesehen und ist zu bevorzugen. Über einen Systemkoppler (bekanntes und vorhandenes Konzept) kann in das Fahrleitungsnetz der Bahn eingespeist werden.

Folgende Erfahrungen bzgl. der Einspeisung gibt es in Deutschland. Diese sollten für die Planung zukünftiger Anlagen genutzt werden.

- Eine große PV-Anlage in Neumünster speist in das 110-kV-Netz ein.
- In Weimar wird eine Pilot-Anlage erstellt zur Einspeisung von PV-Leistung direkt in die Fahrleitung (15 kV). Leistung: 1,2 MW. Es werden angepasste Standard-Solarumrichter verwendet. Die Pilotanlage befindet sich in der Nähe eines 110 kV/15 kV 16,7 Hz Bahnstrom Unterwerkes. Problematisch ist die Nachweisführung der EMV.

Es gibt Interessenten, die beabsichtigen, regenerative Energie in das Netz der DB Energie einzuspeisen.

Aus rechtlichen Gründen müssen Netzbetreiber und Energieerzeuger voneinander unabhängig sein. In der vorhandenen Struktur der DB ist dies nicht immer einfach realisierbar.

## 22.5.2 Die DB veröffentlicht einen sogenannten Integrierten Bericht [150]. Darin ist der Gesamt-Traktionsenergieverbrauch als auch der DB-spezifische Verbrauch aus dem 16,7-Hz-Netz aufgeführt. (Anmerkung der Autorinnen und Autoren: für 2022 wird ein Traktionsstrom -16,7 HSchutz

Der Betriebs- und Kurzschlusschutz der Fahrleitung ist im Zusammenhang mit der Einspeisung durch PV-Anlagen in die Oberleitung eine noch ungelöste Aufgabe. Bisher gibt es dafür keine Lösung und auch keine RiL. Dem Charakter nach sind PV-Direkteinspeisungen in die Fahrleitung gleichbedeutend mit der Bremsenergie-Rückspeisung von Triebfahrzeugen.

Durch die zusätzlichen Einspeisungen aus den PV-Anlagen ergeben sich geänderte Impedanzen der Fahrleitung. Eine zuverlässige Erkennung eines Kurzschlusses und die folgende Abschaltung sind nicht mehr unbedingt gewährleistet. Ggf. müssen Erkennung und Schutzpegel angepasst werden.

Zunehmend ist das Bahnstromversorgungsnetz durch die vielen Einspeisungen aus Umrichterwerken ein masseloses Netz geworden. PV-Umrichter müssen auch Kurzschlussströme übernehmen, eine Beteiligung ist erforderlich. Hierzu sind ebenfalls eine Anschluss- und Migrationsanalyse erforderlich. Das Thema ist bisher nicht gelöst.

## 22.5.3 Schutz vor elektrischem Schlag

Für alle Installationsorte, die im sogenannten Rissbereich der Fahrleitung liegen, ist die Berührung mit der Fahrleitung zu berücksichtigen und angemessene Erdungsmaßnahmen vorzusehen.

Es ist zu klären, wie PV-Module mit der Erdung elektrisch verbunden werden können und wie ein Spannungsübertritt von der Fahrleitungsspannung in die Niederspannungsseite der PV-Anlage bei Oberleitungsriß verhindert werden kann. Es ist beispielsweise zu prüfen, ob eine separate Erdung für die Module erforderlich ist.

## 22.5.4 Leistungsregelung

Zusätzliche Einspeisungen in das 15 kV-Fahrleitungsnetz werden bisher nicht in der Leistungsregelung des Netzes berücksichtigt. Wenn PV-Solarenergie in Größenordnungen wie beabsichtigt eingespeist wird, müssen diese Einspeisungen in die Leistungsregelung einbezogen werden. PV-Umrichter müssen netzbildend sein. Die Einbindung von zusätzlichen Einspeisungen in die Leistungsregelung erfolgt bisher nur in der 110 kV 16,7 Hz-Ebene. Die Leistungsregelung muss geklärt werden. Die Frequenz ist die Führungsgröße für die Leistung. Die Schnelligkeit der Regelung ist ein Problem. Masselose Einspeisungen (ohne rotierende Generatoren) verursachen sehr schnelle Schwankungen verbunden mit großen/schnellen Frequenzsprüngen. Es ist nicht bekannt was passiert, wenn große PV-Solarenergieerzeugeranlagen solche starken Schwankungen verursachen.

## 22.5.5 Elektromagnetische Verträglichkeit

Im derzeitigen DB-Regelwerk ist die Thematik des Einflusses von Störströmen durch volatile, netzstützende Umrichter auf Telekommunikations- und signaltechnische Kabel noch nicht erfasst und nicht geregelt.

Die Längskabelbeeinflussung zwischen zwei Unterwerken kann für heute existierende netzführende Erzeugeranlagen berechnet werden. Bei beliebig vielen volatilen, netzstützenden Erzeugern (z. B. PV-Anlagen) zwischen den Unterwerken ist eine Berechnung aktuell noch nicht festgelegt.

In der TR EMV 04 [59] ist die Nachweisführung für netzstützende Umrichter noch nicht erfasst.

Zu klären ist eine mögliche Beeinflussung der Gleisfreimeldeanlagen.

Problematisch sind die Gleisstromkreise im Zusammenhang mit der LST. Die Störstromgrenzwerte gemäß der vom EBA veröffentlichten TR-EMV Teil 4 [59] müssen durch die PV-Umrichter eingehalten werden.

Zu klären sind auch mögliche negative Einflüsse der PV-Anlage auf die Fahrzeugtechnik und umgekehrt. Für die Fahrzeuge ist eine Mindestkapazität am Eingang festgelegt. Tendenziell werden zukünftig die Kapazitäten der neuen Fahrzeuge kleiner werden.

Die Integration weiterer Umrichter, hier die PV-Umrichter, mit ihren individuellen Regelungen und Steuerungen birgt das Risiko, die EMV, die Kompatibilität mit Gleisfreimeldeeinrichtungen (Achszähler, Gleisstromkreise), die Kompatibilität mit den verkehrenden Fahrzeugen zu gefährden.

## 22.6 Regulatorische und rechtliche Aspekte

Für das Bahnstromnetz gelten neben den energierechtlichen auch die eisenbahnrechtlichen Anforderungen, was es von anderen Stromnetzen der allgemeinen Versorgung unterscheidet. Das Bahnstromnetz ist das einzige bundesweite Verteilnetz, welches allen vier Übertragungsnetzbetreibern nachgelagert ist.

Die unterschiedliche Netzfrequenz (16,7 Hz) ist technisch und regulatorisch zu beachten.

Insbesondere folgende Regelungen/Gesetze sind zu beachten:

- technische Netzanschlussbedingungen der DB für die Einspeisung in das AC 15 kV, 16,7 Hz [149]
- Allgemeines Eisenbahngesetz [70]
- Energiewirtschaftsgesetz [73]
- Messstellenbetriebsgesetz [148]
- Anlagen müssen nach EEG [11] steuerbar sein
- Redispatch 2.0, ergibt sich aus dem Netzausbaubeschleunigungsgesetz:
  - Anlagen müssen fernsteuerbar sein
  - die vorhandenen technischen Lösungen sind aufwändig und teuer, weil sie nicht für die Bahnstromversorgung entwickelt wurden
  - bis zum Roll Out des Controllable Local System (CLS)-Managements und des Smart Meter Gateway (SMGW) wird mit einer Interims-Lösung gearbeitet
- Marktkommunikation und Datenaustausch ist in standardisierter Form gefordert

Bahnstromnetz unterscheidet sich vom klassischen Stromnetz der allgemeinen Versorgung hinsichtlich der zusätzlichen eisenbahnrechtlichen Anforderungen.

Ob eine Netzausbauverpflichtung für Oberleitungen besteht, ist nicht geklärt.

Einzelne Gesetze und Standards müssen geschaffen bzw. angepasst werden. So ist z. B. der Brandschutz kommunal geregelt. Jede Kommune stellt dazu eigene Anforderungen. Die Projektierung und Planung könnte erleichtert werden, indem die kommunalen PV-Kataster die jeweiligen Brandschutzaflagen mitabbilden.

Der Brandschutz und das Planungsrecht sollten einheitlich gestaltet sein.

Häufig ist in den DB-eigenen Gebäuden keine entsprechende Messtechnik vorhanden. Die aktuelle Rechtslage zur Eigenversorgung erschweren und verhindern PV-Projekte. Denn an eine Weiterleitung z. B. an andere Nutzer der Liegenschaften/der Gebäude (wie z. B. Shops in einem Bahnhof) sind hohe Anforderungen geknüpft, die die einzelnen DB-Konzernunternehmen nicht erfüllen können.

Die meisten Anlagen, die existieren, sind "Volleinspeiser". Die gesamte erzeugte PV-Energie wird ins öffentliche Netz gespeist. Es gibt nur wenige Eigenversorgungsanlagen.

Es sollten Rechtsgrundlagen geschaffen werden für tragfähige gewerbliche Mieter- und Quartiersstrommodelle oder Direktlieferungen sollten einfacher möglich sein.

## 22.7 Anmerkung zur vorliegenden Studie

Das Studiendesign weicht von üblichen energiewirtschaftlichen Studien ab. Üblich ist, ausgehend von einem theoretischen, energetischen Potenzial, in weiteren Stufen ein daraus technisch realisierbares und schließlich wirtschaftlich umsetzbares Potenzial zu ermitteln. Das letztgenannte Potenzial ist Grundlage für Pilotprojekte und anschließend einen möglichen Rollout. Erst mit dem Rollout von PV-Anwendungen sollten Fragen bzgl. Hemmnissen, Einschränkungen, Anforderungen, Empfehlungen und dergleichen mehr adressiert werden.

## 22.8 Synergieeffekte

Neben der Vielzahl an Anforderungen an die PV-Anlagen in der Bahninfrastruktur, die gewiss ein nicht zu vernachlässigendes Maß an Hemmnis darstellt, ergeben sich auch Synergieeffekte zwischen PV-Anlagen und der Bahninfrastruktur. Beispielhaft seien die folgenden genannt, die während der Bearbeitung der Studie aus gegebenen Zusammenhängen abgeleitet wurden.

- Vorhandene bauliche Objekte der bahntechnischen Installationen können für die PV-Installationen genutzt werden (Schallschutzwände, Wälle, Gebäude, Kabelwege und Infrastruktur).
  - Synergie: Kosteneinsparung durch Doppelnutzung der vorhandenen Konstruktion bzw. baulichen Anlagen und Einsparung einer eigenen Gründung bzw. Unterkonstruktion für die PV-Anlage
- Umweltfreundliche und nachhaltige Energiegewinnung aus erneuerbaren Energiequellen erfolgt auf DB-eigenen Liegenschaften ohne zusätzlichen Flächenverbrauch.
  - Synergie: Einsparung von CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit Verbesserung des ökologischen Fußabdruckes in der Mobilität
- Erzeugte Energie kann direkt für lokale 50-Hz-Verbraucher genutzt werden.
  - Synergie: Kosteneinsparung durch verringerten Energiebezug vom lokalen Energieversorger, ggf. Vermeidung von Investitionen für überregionalen Netzausbau
- Durch Nutzung von integrierter Bauweise der PV-Anlage, Building Integrated PV (BIPV), können PV-Module Aufgaben von anderen Bauprodukten übernehmen und diese ersetzen (Schallschutz, Sichtschutz, Wetterschutz, etc.).
  - Synergie: Bei Kosteneinsparung durch Doppelnutzung der PV-Anlage für bauliche Schutzaufgaben und Energieerzeugung

Es bestand ebenfalls die Idee, durch die Installation der PV-Anlagen Einsparungen bei der Energieerzeugung/-bereitstellung durch konventionelle Energieversorgungen, die in die Fahrleitung einspeisen, zu erzielen. Beispiele dafür könnten sein die Vermeidung notwendiger Leistungserhöhungen bestehender Bahnstromunterwerke oder nicht mehr notwendige Revisionen älterer Bahnstromunterwerke oder Kraftwerke, die am Ende ihrer Nutzungsdauer angelangt sind und rückgebaut werden könnten.

Diese Einsparungen lassen sich jedoch durch PV-Anlagen allein nicht realisieren. Dazu ist die photovoltaische Energieerzeugung zu volatil und über große Zeiträume nicht oder nur in vergleichsweise geringem Umfang verfügbar. Es müssen hier die Energieerzeugung aus den verschiedenen regenerativen Quellen (Energiemix aus Sonne, Wind, Wasserkraft, etc.), die Energiespeicherung sowie die Energieübertragung über große Distanzen gemeinsam betrachtet werden. Es muss ein Optimum für die Belange einer stabilen, verfügbaren und am zukünftigen Bedarf ausgerichteten nachhaltigen Bahnenergieversorgung mit dem o. g. Energiemix gefunden werden und eine wirtschaftlich tragfähige Lösung für eine definierte Lebensdauer unter den harten Bedingungen des Bahnbetriebes herausgearbeitet werden.

## 23 Fazit

In dieser Studie wurde das Potenzial der PV-Anwendungen an der Bahninfrastruktur untersucht. Die besonderen bahnseitigen baulichen Voraussetzungen, die zu beachtenden Umgebungsbedingungen und die generell einzuhaltenden Vorschriften und Regelungen wurden ermittelt und beschrieben. Die verschiedenen möglichen Installationsorte wurden in Anwendungsklassen unterteilt:

- Installation am oder im Gleisbett,
- Installation an oder in einer LSW,
- Installation an oder auf einem Lärmschutzwall,
- Installation an oder in baulichen Einrichtungen,
- Installation neben dem Schienenweg,
- sonstige Installationsorte, insbesondere auf Schienenfahrzeugen.

Die Integration von PV-Anlagen in die Bahninfrastruktur ist, unter Einhaltung der gegebenen Randbedingungen, prinzipiell möglich. Generell ergeben sich dadurch insbesondere die folgenden Vorteile:

- Erzeugung erneuerbarer Energie und damit Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.
- Dezentrale Stromerzeugung. Der Strom wird da erzeugt, wo er benötigt wird. Damit geht die Reduktion von Übertragungsverlusten einher.
- Doppelnutzung der bestehenden Anlagen, für den Bahnverkehr und zur Energieerzeugung.
- Es wird ein Beitrag zur sicheren und autarken Energieerzeugung geleistet.

Die Basistechnik für die Integration der PV-Anlagen in die Bahninfrastruktur ist grundsätzlich vorhanden, wenn auch Modifikationen und Anpassungsentwicklungen für die Integration in die Bahninfrastruktur nötig sein werden. In verschiedenen weltweit durchgeföhrten Projekten konnte dies gezeigt werden. Projekte zur Direkteinspeisung in die 15-kV-Fahrleitung sind bis dato selten und eher als Pilotprojekte anzusehen. Derzeit sind keine Systeme zur Direkteinspeisung in die 15-kV-Fahrleitung am Markt verfügbar. Zudem besteht zur großflächigeren Anwendung der Direkteinspeisung Forschungsbedarf in Bezug auf Schutz, Leistungsregelung, Netzkurzschlussleistung und Stabilität.

Das PV-Potenzial an der Schieneninfrastruktur wurde anhand der DB-Flächen, die als vektorielle Geodaten zur Verfügung standen, ermittelt. Von diesen Flächen wurden solche ausgeschlossen, die nicht geeignet für PV-Anwendungen sind, z. B. aufgrund ungünstiger Ausrichtung oder Verschattung. Damit konnte ein relevantes Potenzial ermittelt werden. Dieses mögliche Potenzial wurde unterteilt in:

- Szenario A: kurzfristige Umsetzung wird als möglich angesehen, geringe LCOE
- Szenario B: Mittelfristige Umsetzung kann erwartet werden, mittlere LCOE
- Szenario C: gesamtes ermitteltes, mögliches Potenzial

Für das Szenario A wurde beispielsweise eine jährlich zu erwartende Energieerzeugung von 380 GWh/a ermittelt, für Szenario C 2940 GWh/a. Zum Vergleich: die in 2021 von der DB abgegebene Traktionsenergie betrug 7445 GWh.

Auch wenn die Integration von PV-Anlagen in die Bahninfrastruktur als prinzipiell möglich eingestuft wird, wird die konkrete Umsetzung Herausforderungen beinhalten. Das Bahnsystem in Deutschland ist historisch gewachsen und bisher ausschließlich für die Erbringung der Verkehrsleistung ausgelegt und daraufhin optimiert. Dadurch ergeben sich besondere Randbedingungen für die Integration von PV-Anwendungen in die Bahninfrastruktur. Es gibt eine Vielzahl einzuhaltender bahnspezifischer Regelung, die zudem für die PV-Branche ungewohnt sind. Wechselwirkungen mit dem Bahnbetrieb sind zu berücksichtigen. Die schon jetzt an der Grenze betriebene Bahninfrastruktur würde um eine Funktion ergänzt.

Letztendlich gilt es diese Herausforderungen risikoarm zu bewerkstelligen, um die Klimaziele zu unterstützen und eine nachhaltige Energieversorgung im Schienenverkehr zu gewährleisten. Daher wird vorgeschlagen, zunächst vorrangig das Potenzial aus Szenario A zu erschließen und praktische Erfahrun-

gen zu sammeln. Jede PV-Integration ist dabei auf die individuell vorhandenen Gegebenheiten zu untersuchen und entsprechend anzupassen. Die aus diesen Projekten gewonnenen Erkenntnisse helfen, weitere Anlagen planungssicherer auszulegen und auf die verschiedenen Ziele hin abgestimmter in die Bahninfrastruktur zu integrieren.

# 24 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energieerzeugungspotenzial von drei Szenarien mit LCOE . Quelle: TÜV Rheinland..	20
Abbildung 2: Projektstruktur. Quelle: TÜV Rheinland.....	26
Abbildung 3: Ablaufprozess. Quelle: TÜV Rheinland.....	27
Abbildung 4: Blockschaltbild PV-Anlage . Quelle: TÜV Rheinland .....	42
Abbildung 5: Beispiele zu PV-Anlagen. Quelle: TÜV Rheinland .....	44
Abbildung 6: Bewertungstabelle: geeignete PV-Module (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch) . Quelle: TÜV Rheinland .....	47
Abbildung 7: Beispiele zu Unterkonstruktionen . Quelle: TÜV Rheinland .....	49
Abbildung 8: Bewertungstabelle: geeignete Unterkonstruktion (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch). Quelle: TÜV Rheinland .....	51
Abbildung 9: Beispiele zu Umwandlungs- und Transformierungssystemen. Quelle: TÜV Rheinland	53
Abbildung 10: Bewertungstabelle: geeignete Umwandlungseinheiten (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch). Quelle: TÜV Rheinland .....	56
Abbildung 11: Bewertungstabelle: geeignete Kabel- und Leitungssysteme (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch) Quelle: TÜV Rheinland.....	58
Abbildung 12: Bewertungstabelle: geeignete Steuerungs- und Überwachungssysteme (Kategorien 0 – 10, niedrig bis hoch). Quelle: TÜV Rheinland.....	60
Abbildung 13: Prinzipielle Darstellung der Wechselstrom-Bahnenergieversorgung in Deutschland. Quelle: TÜV Rheinland. ....	96
Abbildung 14: Direkteinspeisung in die Fahrleitung, mit direkter Wandlung in 16,7 Hz (links) und mit zwischengefügter Wandlung in 3 AC 50 Hz (rechts). Quelle: TÜV Rheinland .....	97
Abbildung 15: Prinzipieller Aufbau der PV-Anlage zur Direkteinspeisung. Quelle: TÜV Rheinland.	98
Abbildung 16: Schematische Darstellung der einheitlichen Modulverschaltung. Quelle: TÜV Rheinland .....	113
Abbildung 17: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 1. Quelle: TÜV Rheinland.....	114
Abbildung 18: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 2. Quelle: TÜV Rheinland.....	116
Abbildung 19: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 3. Quelle: TÜV Rheinland.....	117
Abbildung 20: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 4. Quelle: TÜV Rheinland.....	118
Abbildung 21: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 5. Quelle: TÜV Rheinland.....	119
Abbildung 22: Schematische Darstellung von Anwendungsklasse 6. Quelle: TÜV Rheinland.....	120
Abbildung 23: Relativer leistungs-, längen- und flächenbezogener Energieertrag nach exemplarischen Anwendungsklassen; höchstes Ergebnis pro Kategorie ergibt 100 %. Quelle: TÜV Rheinland. ....	122
Abbildung 24: Gegenüberstellung LCOE von netzgekoppelten Standard PV-Systemen und abgeleiteten LCOE für PV-Systeme in der Bahninfrastruktur mit Direkteinspeisung in das Bahnnetz. Die breiten Säulen stellen den Mittelwert dar, die dünneren Striche die Varianz nach oben. Quelle: TÜV Rheinland.....	127

Abbildung 25: Aufschlüsselung der Gesamtinstallationskosten für große Freiland-PV-Systeme in verschiedenen Ländern, 2020. Quelle: IRENA (2021), Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [80].	128
Abbildung 26: Karte zur Solaren Einstrahlung; im Jahresmittel ca. 1100 kWh/m2. Quelle: Global Solar Atlas, Global Horizontal Irradiation – Germany [Online], [Zugriff am: 2023-10-16]. Verfügbar unter: <a href="https://globalsolaratlas.info/download/germany">https://globalsolaratlas.info/download/germany</a> .	131
Abbildung 27: Bewirtschaftungseinheiten (als Umring) der DB Netz AG, DB Regio AG, DB Cargo, DB Station & Service, DB Energie, DB Fernverkehr AG und DB Immobilien. Quelle: TÜV Rheinland	132
Abbildung 28: Digitales Oberflächenmodell DOM1 mit einer Auflösung von 1 m; ca. 15000 Kacheln zu je 5x5 km decken ganz Deutschland ab. Quelle: TÜV Rheinland	133
Abbildung 29: Neubaustrecken Nürnberg - Erfurt u. Erfurt – Leipzig Halle (zw. Bamberg u. Leipzig): nicht im Bahn-Umrang enthalten. Quelle: TÜV Rheinland	135
Abbildung 30: Anwendungsklassen. Quelle: TÜV Rheinland	137
Abbildung 31: Analysemodelle unterteilt nach sechs Anwendungsklassen. Quelle: TÜV Rheinland	143
Abbildung 32: Geeignete Strecken zu Anwendungsklasse 1. Quelle: TÜV Rheinland	145
Abbildung 33: Geeignete Flächen zu Anwendungsklassen 2 und 3 (Zahlenwerte gerundet). Quelle: TÜV Rheinland	146
Abbildung 34: Geeignete Beispieldächer zu Anwendungsklasse 4 (Zahlenwerte gerundet). Quelle: TÜV Rheinland	147
Abbildung 35: Geeignete Beispieldächer zu Anwendungsklasse 5 (Zahlenwerte gerundet). Quelle: TÜV Rheinland	148
Abbildung 36: Verschiedene Ausrichtungen und Neigungen mit Transpositionsgewinnen am Standort Bonn. (Anm.: Ein Azimut von 0° entspricht in dieser Abbildung der Ausrichtung nach Süden.) Quelle: TÜV Rheinland	154
Abbildung 37: Übersicht der Größe von Verlustfaktoren. Quelle: TÜV Rheinland	156
Abbildung 38: Beispiel zur Ermittlung der verschattungsfreien Flächen. Quelle: TÜV Rheinland	157
Abbildung 39: Im Gleisbett installierbare PV-Leistung. Quelle: TÜV Rheinland	158
Abbildung 40: An LSW und -wällen installierbare PV-Leistung. Quelle: TÜV Rheinland	159
Abbildung 41: Auf baulichen Einrichtungen installierbare PV-Leistung. Quelle: TÜV Rheinland	160
Abbildung 42: Neben dem Schienenweg installierbare PV-Leistung. Quelle: TÜV Rheinland	161
Abbildung 43: Szenario A mit hohem technisch-wirtschaftlichem Potenzial und geringen LCOE. Quelle: TÜV Rheinland	163
Abbildung 44: Verteilung der installierbaren PV-Leistung in kWp. Quelle: TÜV Rheinland	164
Abbildung 45: Exemplarischer Tagesverlauf des PV-Energieertrag zu Szenario A. (Dargestellt ist der Energieertrag zu jeder vollen Stunde in der zuvor abgelaufenen Stunde.) Quelle: TÜV Rheinland	164
Abbildung 46: Szenario B mit mittlerem technisch-wirtschaftlichem Potenzial und mittleren LCOE. Quelle: TÜV Rheinland	165
Abbildung 47: Szenario C mit geringem technisch-wirtschaftlichem Potenzial und hohen LCOE. Quelle: TÜV Rheinland	166

Abbildung 48: Prinzipielle Darstellung der Einspeisung aus Unterwerken in die Fahrleitung. Quelle: TÜV Rheinland .....	168
Abbildung 49: Heat-Map, Traktionsenergieverbrauch der von DB Energie versorgten Anlagen in 2019. Quelle: DB Energie.....	222
Abbildung 50: Heat-Map, von DB Energie erzeugte Traktionsenergie in 2019. Quelle: DB Energie	223
Abbildung 51: Heat-Map, Spitze der Traktionsleistung (Verbrauch) in den von DB Energie versorgten Anlagen. Quelle: DB Energie.....	224
Abbildung 52: Heat-Map, Installierte Traktionsleistung der von DB Energie versorgten Anlagen. Quelle: DB Energie .....	225

## 25 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Marktrecherche – methodisches Vorgehen, Übersicht.....	28
Tabelle 2: Quantifizierung des technischen PV-Potenzials – methodisches Vorgehen, Übersicht ...	29
Tabelle 3: Bewertung der Anforderungen – methodisches Vorgehen, Übersicht .....	30
Tabelle 4: Sichtbarkeit von Haupt- und Vorsignalen (Quelle: [73]) .....	34
Tabelle 5: Anzahl der aufgenommenen relevanten Fundstellen für realisierte PV-Projekte.....	67
Tabelle 6: Anforderungen an PV-Systeme, Übersicht .....	85
Tabelle 7: Verfügbarkeit geeigneter Hauptkomponenten in Abhängigkeit der verschiedenen Anwendungsfälle.....	110
Tabelle 8: Einheitliche Systemparameter zu allen Anwendungsklassen .....	112
Tabelle 9: Spezifische Auslegung zu Anwendungsklasse 1.....	114
Tabelle 10: Spezifische Berechnung zu Anwendungsklasse 1.....	114
Tabelle 11: Spezifische Auslegung zu Anwendungsklasse 2 .....	115
Tabelle 12: Spezifische Berechnung zu Anwendungsklasse 2.....	115
Tabelle 13: Spezifische Auslegung zu Anwendungsklasse 3 .....	116
Tabelle 14: Spezifische Berechnung zu Anwendungsklasse 3.....	117
Tabelle 15: Spezifische Auslegung zu Anwendungsklasse 4 .....	118
Tabelle 16: Spezifische Berechnung zu Anwendungsklasse 4.....	118
Tabelle 17: Spezifische Auslegung zu Anwendungsklasse 5 .....	119
Tabelle 18: Spezifische Berechnung zu Anwendungsklasse 5.....	120
Tabelle 19: Spezifische Berechnung zu Anwendungsklasse 6.....	120
Tabelle 20: Spezifische Auslegung zu Anwendungsklasse 6 .....	121
Tabelle 21: Vergleich der Anwendungsklassen, AK6: *Kompletter Fernverkehrszug mit 200 m Länge.....	121
Tabelle 22: Aktuelle LCOE aus PV und abgeleitete Schätzung der Kosten für PV in Bahninfrastruktur in Deutschland .....	126
Tabelle 23: Aufsplittung der Kosten für PV-Systeme für Deutschland basierend auf Abbildung 25129	129
Tabelle 24: Übersicht der herangezogenen Datenquellen.....	130
Tabelle 25: Verifikation der genutzten Datenquellen Legende: + = hoch, o = durchschnittlich, - = gering.....	134
Tabelle 26: Generell anwendbare Kriterien für ungeeignete Flächen Je ak .....	138
Tabelle 27: Bewertung von Risiken durch innere/Äußere EinwirkungsFaktoren.....	140
Tabelle 28: Fahrzeugflotte DB Fernverkehr ([111], [112], [113], [114]) .....	149
Tabelle 29: Fahrzeugtypen der DB Fernverkehr ([110], [111], [112], [113], [114]) .....	149
Tabelle 30: Fahrzeugtypen und nutzbare Dachflächen .....	151
Tabelle 31: Ermittelte Flächen .....	152

Tabelle 32: Verlustfaktoren je Anwendungsklasse .....	157
Tabelle 33: Ermittete Anzahl der installierbaren Anlagen, installierbare Leistung und Erzeugungspotenzial (gerundet) .....	162
Tabelle 34: Anzahl Züge im Speisebereich.....	175

## 26 Quellenverzeichnis

- [1] **VDE-AR-N 4105:2018** (2018): Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz
- [2] **Bundesrepublik Deutschland** (2019): Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)
- [3] **DIN EN 15273-1: 2017**, Bahnanwendungen – Begrenzungslinien, Teil 1: Allgemeines - Gemeinsame Vorschriften für Infrastruktur und Fahrzeuge
- [4] **DIN EN 15273-3: 2017**, Bahnanwendungen – Begrenzungslinien, Teil 3: Lichtraumprofile
- [5] **C. Göbel und K. Lieberenz** (2013): Handbuch Erdbauwerke der Bahnen, Hamburg: DVV Media Group GmbH, Eurailpress
- [6] **Technische Universität Dresden**, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Gestaltung von Bahnanlage: Grundlagen des Eisenbahnunterbaus [Online]. [Zugriff am: 16.10.2023]. Verfügbar unter: [https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibv/gvb/ressourcen/dateien/download\\_gvb/lehrmaterialien/Aufbau\\_V/A-12f.pdf?lang=de](https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibv/gvb/ressourcen/dateien/download_gvb/lehrmaterialien/Aufbau_V/A-12f.pdf?lang=de)
- [7] **DB Netz AG** (2019): Richtlinie 836 – Erdbauwerke und sonstige geotechnischen Bauwerke planen, bauen und Instand halten
- [8] **Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur** (2021): Lärmschutz im Schienenverkehr, Berlin
- [9] **Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur** (2020): Einsatzpotenziale erneuerbarer Energien für Verkehr und Infrastruktur verstärkt erschließen – Ergebnisbericht des Themenfeldes 5 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019
- [10] **Deutsche Bahn** (2020): Pressemitteilung der Deutschen Bahn: DB speist erstmals Solarstrom direkt ins Bahnstromnetz [Online]. [Zugriff am: 23.02.2022]. Verfügbar unter: [https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart\\_zentrales\\_uebersicht](https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht)
- [11] **Bundesrepublik Deutschland** (2023): Erneuerbare Energien Gesetz (EEG). Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien – Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21.07.2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 3.07.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 176) geändert worden ist.
- [12] **Bundesregierung**: Team Europa: EU soll bis 2050 klimaneutral sein [Online]. [Zugriff am: 24.03.2022]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/mehr-klimaschutz-in-der-eu-1790042>
- [13] **BMUV**: Novelle des Klimaschutzgesetzes vom Bundestag beschlossen [Online]. [Zugriff am: 22.03.2022]. Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/novelle-des-klimaschutzgesetzes-vom-bundestag-beschlossen>
- [14] **Bundesministerium für Digitales und Verkehr** (2021): Mit der Elektro bahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes [Online], [Zugriff am: 16.10.2023].

Verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/elektro-bahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html>

- [15] Antwort der **Bundesregierung** auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sabine Leidig, Dr. Gesine Lötzsch, Lorenz Gösta Beutin, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. – Drucksache 19/18024 – vom 23.04.2020, „Drucksache 19/18808“
- [16] **TrackoPedia**: Stromsystem und Oberleitung - geschichtliche Entwicklung [Online], [Zugriff am: 07.02.2022]. Verfügbar unter: <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/stromsystem-und-oberleitung>
- [17] Dipl.-Ing. Uwe **Weiser**, Dipl.-Ing. Philipp **Zipf**, Deutsches Verkehrsforum e.V. (2002): Die Eisenbahn im grenzüberschreitenden Verkehr, Bonn.
- [18] **Bundesanstalt für Straßenwesen** (2015): Bericht zum Forschungsprojekt: FE 09.0153/2011/LRB: Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potentielle Photovoltaik-Anwendungen sowie Wildbarrieren, in: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Verkehrstechnik, Heft V 252, Bremen: Carl Schünemann Verlag GmbH
- [19] **Schweizerische Eidgenossenschaft, Der Bundesrat** (2021): Studie über das Potenzial der Lärmschutzwände entlang von Autobahnen und Bahnstrecken für die Produktion von Solarenergie, Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats 20.3616 vom 15.06.2020 [Online], [Zugriff am: 16.10.2023]. Verfügbar unter: <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/68659.pdf>
- [20] Dr. Julius **Bosch**, SBB Energie (2021): Innovative Direkteinspeisung von Photovoltaikstrom in das Bahnstromnetz, Bern: Bundesamt für Verkehr BAV
- [21] **Greenpeace** (2021): Solaroffensive – wie wir mit Sonnenenergie einen Wirtschaftsboom entfesseln und das Klima schützen [Online]. Zugriff am: 07.02.2022]. Verfügbar unter: <https://www.greenpeace.de/publikationen/20210806-greenpeace-kurzstudie-solaroffensive.pdf>
- [22] **U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration** (2017): Highway Renewable Energy: Photovoltaic Noise Barriers [Online], Zugriff am: 16.10.2023]. Verfügbar unter: <https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/energy/publications/photovoltaic/fhwahep17088.pdf>.
- [23] **Fraunhofer ISE** (2021): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland [Online]. [Zugriff am: 07.02.2022]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>
- [24] **Lixia Tian, Yuansheng Huang, Shuang Liu, Shize Sun, Jiajia Deng, Hengfeng Zhao** (2021): Application of photovoltaic power generation in rail transit power supply system under the background of energy low carbon transformation, in Alexandria Engineering Journal, Volume 60, Issue 6, S. 5167 – 5174, [Zugriff am: 16.10.2023]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821002519>.
- [25] Shiro **Sekijima**, Hidenori **Sato**, Hitoshi **Hayashiya** (2020): Application of Smart Grid Technology to Railway Power Supply, in JR EAST Technical Review-No.40-2020, S. 17 – 22. Verfügbar unter: [https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf\\_40/tec-40-17-22eng.pdf](https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_40/tec-40-17-22eng.pdf)

- [26] **pv magazine - Photovoltaics Markets and Technology** (2017): Idea of solar powered trains gaining traction [Online], [Zugriff am: 16.10.2023], Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.com/2017/12/12/solar-pv-powered-trains-gaining-traction/>
- [27] **Fraunhofer ISE**: PVWINS: Entwicklung von wandintegrierten PV-Elementen für den Lärmschutz [Online], [Zugriff am: 07.02.2022], Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pvwins.html>
- [28] **Vallati, Andra, de Lieto Vollaro, Roberto, Tallini, Alessandro, Cedola, Luca** (2015): Photovoltaic Noise Barrier acoustic and energetic study [Online], [Zugriff am: 16.10.2023]. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/289992048\\_Photovoltaics\\_Noise\\_BARRIER\\_Acoustic\\_and\\_Energetic\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/289992048_Photovoltaics_Noise_BARRIER_Acoustic_and_Energetic_Study)
- [29] Studie zur Entwicklung von smarten Bahnschwellen, EU-Projekt, Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020, Nr. 738373, Italien
- [30] **GE Global Research**: Design Aspects for High Voltage MW PV Systems for Railway Power Supply, <https://cordis.europa.eu/article/id/135498-greenrail-project-innovative-and-sustainable-railway-sleepers/de>
- [31] **DIN EN 50125-2** (2002): Bahnanwendungen – Umweltbedingungen für Betriebsmittel, Teil 2: Ortsfeste elektrische Anlagen
- [32] **DIN EN 50124-1** (2017): Bahnanwendungen - Isolationskoordination – Teil 1: Grundlegende Anforderungen – Luft- und Kriechstrecken für alle elektrischen und elektronischen Betriebsmittel
- [33] **DIN EN 50124-2** (2017): Bahnanwendungen – Isolationskoordination – Teil 2: Überspannungen und zugeordnete Schutzmaßnahmen
- [34] **DB Netz AG**: [Online], [Zugriff am 22.02.2022], Verfügbar unter: [https://fahrtweg.dbnetze.com/fahrtweg-de/unternehmen/db\\_netz\\_ag/wir\\_ueberuns-1368710](https://fahrtweg.dbnetze.com/fahrtweg-de/unternehmen/db_netz_ag/wir_ueberuns-1368710). [Zugriff am 22.02.2022]
- [35] **A. p. S. e.V., „Allianz pro Schiene e.V.“**: [Online], [Zugriff am 22.02.2022], Verfügbar unter: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/schienennetz/>
- [36] **Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN, Freie Demokraten (FDP)** (2021): Koalitionsvertrag zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN UND FDP: Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit
- [37] **S. Enkhardt**, pv magazine (2020): Enerparc baut Solarpark für Deutsche Bahn – Direkteinspeisung ins Bahnstromnetz [Online], [zugriff am: 07.02.2022], Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/2020/01/20/enerparc-baut-solarpark-fuer-deutsche-bahn-direkteinspeisung-ins-bahnstromnetz/>
- [38] **DIN EN IEC 61730-1 VDE 0126-30-1** (2018): Photovoltaik (PV)-Module – Sicherheitsqualifikation Teil 1: Anforderungen an den Aufbau
- [39] **DIN EN 50122-1** (2017): Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung – Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag

- [40] **DIN VDE 0100-712** (2016): Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 7-712: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – photovoltaik-(PV)-Stromversorgungs- systeme
- [41] **DIN EN 60076-1** (2012): Leistungstransformatoren Teil 1: Allgemeines
- [42] **DIN EN 61378-1** (2012): Stromrichtertransformatoren – Teil 1: Transformatoren für industrielle Anwendungen
- [43] S. Franesi, M. Marchesoni, M. Passalacqua und L. Vaccaro (2019): Solid-State Transformers in Locomotives Fed through AC Lines: A Review and Future Developments, MDPI energies
- [44] M. Claessens und e.a. (2022): „Kleiner, leichter, effizienter,“ ABB technik, S. 11 – 17
- [45] M. Steiner und H. Reinhold (2007): „Medium Frequency Topology in Railway Applications“, Aal- bourg: European Power Electronic Conference
- [46] U. Behmann (2012): „Erster Mittelfrequenz-Traktionstransformator im Betriebseinsatz,“ in Elekt- rische Bahnen eb, S. 408 – 413
- [47] B. Engel und e.a (2003).: „15 kV/16.7 Hz Energy Supply System with Medium Frequency Trans- former and 6.5 kV IGBTs in Resonant Operation“, Toulouse: 10th European Power Electronics conference
- [48] **Siemens** (2018): „Sitrans SFC plus – Statischer Frequenzumrichter für die AC-Bahnstromversor- gung“
- [49] **DIN EN 50119** (2021): „Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen – Oberleitungen für die elektri- sche Zugförderung“
- [50] **Deutsche Bahn** (2020): „DB RiL 997.0100, Richtlinie DB – Maschinen-, Energie- und Elektrotech- nik, Werkstättenwesen - Oberleitungsanlagen - Allgemeine Bestimmungen, Planen und Errich- ten“
- [51] **Deutsche Bahn** (2020): „DB RiL 997.0201, Richtlinie DB - Maschinen-, Energie- und Elektrotech- nik, Werkstättenwesen - Grundsätze für Rückstromführung, Bahnerdung, Potenzialausgleich, 2013“
- [52] **Deutsche Bahn** (2020): „DB RiL 955.0101, Richtlinie DB - Maschinen-, Energie- und Elektrotech- nik, Werkstättenwesen - Schaltanlagen für Bahnstrom, Anlagentechnik“
- [53] **DB Energie GmbH** (2022): „Technische Netzanschlussbedingungen für 16,7-Hz-Bahnenergie- Erzeugungsanlagen und Speicher und/oder Verbraucheranlagen am 15-kV-Oberleitungsnetz“
- [54] **DIN EN 62305-3 Beiblatt 5** (2014): „Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Per- sonen; Beiblatt 5: Blitz- und Überspannungsschutz für PV-Stromversorgungssysteme“
- [55] **DIN EN 50121-2:** (2017): „Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 2: Störaussendungen des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt“
- [56] **DIN EN 50163** (2005): §Bahnanwendungen - Speisespannungen von Bahnnetzen“

- [57] **DIN EN 50388** (2012): „Bahnanwendungen – Bahnenergieversorgung und Fahrzeuge – Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität“
- [58] **Eisenbahn-Bundesamt** (2021): „Technische Regelung für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit mit der Infrastruktur im Geltungsbereich der EBO (TR-EMV), Teil 1 – Allgemeines“
- [59] **Eisenbahn-Bundesamt** (2021): „Technische Regelung für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit mit der Infrastruktur im Geltungsbereich der EBO (TR-EMV) – Teil 4 – Nachweis der Einhaltung der bahnseitigen Störstromgrenzwerte durch speisende Einheiten (z. B. Bahnstromumrichter)“, Ausgabe 1.0
- [60] **Eisenbahn-Bundesamt** (2021): „TR-EMV – Teil 4 – Störstromgrenzwerte speisende Einheiten“, (Ausgabe 1.0), Anhang A
- [61] **DB Netz AG** (2021): „Technische Netzzugangsbedingungen (TNB)“, Gültig ab 11.12.2022
- [62] **Deutsche Bahn** (2021): „DB RiL 955.0102, Richtlinie DB – Maschinen-, Energie- und Elektrotechnik, Werkstättenwesen – Schaltanlagen für Bahnstrom, Netzschatztechnik“
- [63] **P&M Power Consulting GmbH** (2016): „Resonanzfrequenzen im Bahnstromnetz 110 kV/15 kV – Teil 1: messtechnische Ermittlung der frequenzabhängigen Netzimpedanzen und der Oberschwingungsverhältnisse im Bereich ausgewählter Umrichter“, Bericht im Auftrag der DB Energie GmbH, Bericht Nr. B 712 37 100 15 - I
- [64] **P&M Power Consulting GmbH** (2017): „16,7-Hz-Netz der DB Energie Netzstabilität/Netzresonanzen – Teil 2: Berechnung und Bewertung der frequenzabhängigen Netzimpedanzen und der Netzresonanzen“, Bericht im Auftrag der DB Energie GmbH, Bericht Nr. B 712 37 100 15 - II
- [65] Christoph **Pache** (2016): „Professur Elektrische Bahnen: Netzstabilität für umrichtergespeiste HS- und MS-Netze – Netzstabilität und Netzsimulation im Zeitbereich für umrichtergespeiste HS- und MS-Netze der Deutschen Bahn“, TU Dresden
- [66] C. **Pache** und A. **Stephan** (2018): „Netzstabilität beim Einsatz von Umrichtern in der Bahnstromversorgung, in Symposium Fahrstromanlagen“, Wien
- [67] **Deutsche Bahn** (2010): „DB RiL 462.0102, Richtlinie DB – Bahnbetrieb – Betrieb des Oberleitungsnetzes – Betriebsführung“
- [68] **Deutsche Bahn** (2021): „DB RiL 955.0103, Richtlinie DB - Maschinen-, Energie- und Elektrotechnik, Werkstättenwesen – Schaltanlagen für Bahnstrom, Stationsleittechnik...“
- [69] **Deutsche Bahn** (2021): „DB RiL 955.0104, Richtlinie DB - Maschinen-, Energie- und Elektrotechnik, Werkstättenwesen – Schaltanlagen für Bahnstrom, Informations- und Kommunikationstechnik“
- [70] **Bundesrepublik Deutschland** (2020): „Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)“
- [71] Verordnung der **Bundesrepublik Deutschland** (2020): „Verordnung über die Erteilung von Inbetriebnahmegenehmigungen für das Eisenbahnsystem (Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung – EIGV)“

- [72] **Kommission der Europäischen Union** (2013): „Durchführungsverordnung (EU) Nr. 402/2013 der Kommission vom 30. April 2013 über die gemeinsame Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken und zur Aufhebung der Verordnung (EG)“, Nr. 352/2009
- [73] **Bundesrepublik Deutschland** (2023): Energiewirtschaftsgesetz (EnWG). Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung – Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970; 3621), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 12.06.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 184) geändert worden ist
- [74] **Schneider Electric** (2011): Datenblatt Vakuum-Leistungsschalter Typ VA, VAA, VAH, VXA, VXB, VXC
- [75] **ABB** (2008): Betriebsanleitung Vakuum Leistungsschalter GSH 5960.x
- [76] **Siemens** (2002): Datenblatt Vakuum-Leistungsschalter 3AH47
- [77] **VDE-AR-N 4110** (2020): „Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung)“, inkl. Berichtigung 2018
- [78] **VDE-AR-N 4120** (2020): „Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung)“, inkl. Berichtigung 2018
- [79] Christoph **Kost** u. a. (2021): „Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien“, Fraunhofer ISE
- [80] **IRENA** (2021), “Renewable Power Generation Costs in 2020”, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, ISBN 978-92-9260-348-9.
- [81] J. **Wolfsberger** (2010): „Frei geschrieben. Mut, Freiheit & Strategie für wissenschaftliche Abschlussarbeiten“, (UTB Schlüsselkompetenzen, 3218) Hrsg., 3. Aufl. Wien: Böhlau
- [82] **Eisenbahn-Bundesamt** (2017): „Technische Regelung für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit zwischen Schienenfahrzeugen und der Infrastruktur im Geltungsbereich der EBO (TR-EMV)“, Teil 3 – Sensorik
- [83] Antwort der **Bundesregierung** auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Matthias Gastel, Dr. Julia Verlinden, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Drucksache 19/10847, [Online], [Zugriff am: 02.03.2022], Verfügbar unter: <https://www.solafy.eu/2019/07/11/989-db-koennte-noch-gruener-werden/>
- [84] **Elektrische Bahnen** (2022): „Karte der elektrifizierten Bahnstrecken in Deutschland, in: Elektrische Bahnen“, Bd. 120, Heft 1-2, S. 8 – 9
- [85] **DIN EN IEC 60721-3-4** (2020): „Klassifizierung von Umgebungsbedingungen – Teil 3 – 4: Klassen von Einflussgrößen und deren Grenzwerte – Ortsfester Einsatz, nicht wettergeschützt“
- [86] **DIN EN IEC 60721-3-3** (2020): „Klassifizierung von Umgebungsbedingungen – Teil 3 – 3: Klassen von Einflussgrößen und deren Grenzwerte – Ortsfester Einsatz, wettergeschützt“
- [87] **DIN EN 50125-3** (2003): „Bahnanwendungen – Umweltbedingungen für Betriebsmittel – Teil 3: Umweltbedingungen für Signal- und Telekommunikationseinrichtungen“, inkl. Berichtigung 2010

- [88] **DIN EN 14067-3** (2003): „Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 3: Aerodynamik im Tunnel. Zurückgezogen“
- [89] **DIN EN 14067-4:** (2009): „Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke“
- [90] **DIN EN 14067-5:** (2011): „Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel. Historisch.“
- [91] **DIN EN 1991-2** (2010): „Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken“
- [92] **DIN EN IEC 61000-6-4** (2020): „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6 – 4: Fachgrundnormen – Störaussendung für Industriebereiche“
- [93] **Bayerische GemeindeZeitung** (2022): „Einzigartiges Konzept in Neuötting: Erneuerbarer Strom und Lärmschutz als ideale Symbiose“, Ausgabe: GZ-1/2-2018, Zugriff am: 18.03.2022
- [94] Dipl.-Ing Frank **Panier**, Dipl.-Ing. Frank **Feuchter**, DB Konzern: „Generationenaufgabe europaweite Standardisierung“
- [95] **UIC 797 V** (2001): „Koordination der elektrischen Schutzeinrichtungen Unterwerk / Triebfahrzeuge“
- [96] **Kommission der Europäischen Union** (2014): Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission vom 18.11.2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des Eisenbahn-Systems in der Europäischen Union
- [97] **DIN EN 15273-2:** (2017): „Bahnanwendungen - Begrenzungslinien, Teil 2: Fahrzeugbegrenzungslinien“
- [98] **DIN EN 50121-5:** (2017): „Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 5: Störaussendungen und Störfestigkeit von ortsfesten Anlagen und Einrichtungen der Bahnenergieversorgung“
- [99] **Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur** (2020): „Einsatzpotenziale erneuerbarer Energien für Verkehr und Infrastruktur verstärkt erschließen“, Berlin
- [100] **DIN EN IEC 60721-3-3 (VDE 0468-721-3-3)** (2017): „Klassifizierung von Umgebungsbedingungen – Teil 3-3: Klassen von Einflussgrößen und deren Grenzwerte – Ortsfester Einsatz, wettergeschützt“
- [101] **DIN EN 50153** (2019): „Bahnanwendungen – Fahrzeuge – Schutzmaßnahmen in Bezug auf elektrische Gefahren“
- [102] **Deutsche Bahn AG** (2005): „Schallschutz – eine Investition in die Zukunft der Bahn“
- [103] **Fast Company & Inc** (2017): “This Is the World’s First Fully Solar Train” [Online], [Zugriff am: 21.08.2023], Verfügbar unter: <https://www.fastcompany.com/40509756/this-is-the-worlds-first-fully-solar-train>

- [104] **Deutsche Bahn**: „DB speist erstmals Solarstrom direkt ins Bahnstromnetz ein“, Presseinformation 23.04.2023, [Online], [Zugriff am: 29.08.2023], Verfügbar unter: [https://www.deutsche-bahn.com/de/presse/pressestart\\_zentrales\\_uebersicht/DB-speist-erstmals-Solarstrom-direkt-ins-Bahnstromnetz-ein-10568312](https://www.deutsche-bahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/DB-speist-erstmals-Solarstrom-direkt-ins-Bahnstromnetz-ein-10568312)
- [105] **Biesenack, George, Hofmann, Schmieder** u. a. (2006): „Energieversorgung elektrischer Bahnen.“, Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH
- [107] **Steimel**, A (2017): „Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung.“, 4. Auflage 2017, Augsburg: ITM Innotech Medien GmbH
- [108] **Deutsche Bahn AG** (2021): „Deutsche Bahn – Daten Fakten“
- [109] **Deutsche Bahn AG**: „Infrastrukturregister der DB“ [Online], [Zugriff am: 04.11.2022], Verfügbar unter: <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr>
- [110] **Statista GmbH**: „Anzahl der Güterwagen im Bestand der Deutsche Bahn AG in den Jahren 2007 bis 2021“, [Online], [Zugriff am: 19.10.2022], Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13346/umfrage/anzahl-der-gueterwagen-im-bestand-der-db-ag/>
- [111] **DB Fernverkehr AG** (2021): „Die Fahrzeugstrategie der DB Fernverkehr – Für eine Starke Schiene“, [Online], [Zugriff am: 19.10.2022], Verfügbar unter: [https://www.ews.tu-berlin.de/fileadmin/fg98/aushaenge/2021-sose/20210426\\_EWS\\_Nagl\\_DB\\_Die\\_Fahrzeugstrategie\\_der\\_DB\\_Fernverkehr.pdf](https://www.ews.tu-berlin.de/fileadmin/fg98/aushaenge/2021-sose/20210426_EWS_Nagl_DB_Die_Fahrzeugstrategie_der_DB_Fernverkehr.pdf)
- [112] **Deutsche Bahn AG**: „Der neue Fernverkehrszug „ECx“ [Online], [Zugriff am 30.10.2023], Verfügbar unter: [https://www.www.deutschebahn.com/de/talgo\\_ecx-6876314](https://www.www.deutschebahn.com/de/talgo_ecx-6876314)
- [113] **DB Vertrieb GmbH**: „Die wichtigsten Fakten und Daten zum neuen ICE L“, [Online], [Zugriff am: 19.10.2022], Verfügbar über <https://www.bahn.de/service/ueber-uns/inside-bahn/news/ICE-L>
- [114] **DB Vertrieb GmbH**: „Züge im Fernverkehr und Bahnen im Ausland“, [Online], [Zugriff am: 30.10.2023], Verfügbar über: <https://www.bahn.de/service/ueber-uns/zugtypen>
- [115] **C. Reise, B. Müller, A. Armbruster, N. Reich, K. Kiefer** (2012): „Ist eine Performance Ratio von mehr als 90 Prozent machbar?“
- [116] **Geofabrik GmbH Karlsruhe**: OpenStreetMap [Online], [Zugriff am: 08.11.2022], Verfügbar über: <https://www.geofabrik.de/de/geofabrik/openstreetmap.html>
- [117] **Geographisches Institut der Universität Heidelberg**: OpenStreetMap Datenqualität [Online], [Zugriff am: 06.11.2022], Verfügbar über: <https://doczz.net/doc/5997318/openstreetmap-datenqualit%C3%A4t---geographisches-institut-der>
- [118] **M. Richter, C. Tjengdrawira, J. Vedde, L. Freadson, B. Herteleer, M. Green, B. Stridh, U. Jahn, M. Herz, M. Köntges** (2017): “Technical Assumptions Used in PV Financial Models – Review of Current Practices and Recommendations”, Report IEA-PVPS T13-08: ISBN 978-3-906042-46-6, 2017
- [119] **Deutsche Bahn**: „DB Ril 123.xxxx. Notfallmanagement Brandschutz“, Alle Teile, gültig ab 1.7.2004 / 1.9.2004
- [120] **Deutsche Bahn**: „DB Ril 413.xxxx. Infrastruktur gestalten“, Alle Teile, gültig ab 31.05.2020

- [121] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 800.xxxx. *Bahnanlagen entwerfen*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 01.02.2021
- [122] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 804.xxxx. *Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 01.03.2023
- [123] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 807.04xx. *Ausgewählte Maßnahmen und Anforderungen an das Gesamtsystem Fahr-weg/Fahrzeug: Aerodynamik / Seitenwind*“, Teile 807.0401 – 807.4049, gültig ab 30.04.2006
- [124] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 813.xxx. *Personenbahnhöfe planen und bauen*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 01.12.2022
- [125] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 819.08xx. *Beeinflussung und Schutzmaßnahmen von LST- und TK-Technik*“, Alle Teile, gültig ab 01.02.2018
- [126] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 820.01xx. *Grundlagen des Oberbaus*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 15.10.2021
- [127] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 836.xxxx. *Erbbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten*“, Alle Teile, gültig ab 01.10.2008
- [128] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 877.xxxx. *Gas- und Wasserleitungskreuzungsrichtlinien*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 01.01.2021
- [129] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 878.xxxx. *Stromleitungskreuzungsrichtlinien*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 01.01.2021
- [130] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 879.xxxx. *Telekommunikationskreuzungsrichtlinien*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 01.01.2021
- [131] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 997.xxxx. *Oberleitungsanlagen*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 01.12.2022
- [132] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 954.0xxx. *Elektrische Energieanlagen*“, Alle Teile, letzte Aktualisierung 01.01.2022
- [133] **Deutsche Bahn:** „DB RiL 955.0xxx. *Schaltanlagen für Bahnstrom*“, Alle Teile, gültig ab 01.08.2021
- [134] **Eisenbahn-Bundesamt** (2012): „Richtlinie - Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an Planung, Bau und Betrieb von Schienenwegen nach AEG“
- [135] **IEC 62548:** (2016): “Photovoltaic (PV) array – Design requirements”
- [136] **DIN EN 61936-1 VDE 0101-1:** (2023): “Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV AC und 1,5 kV DC-Teil 1: Wechselstrom“
- [137] **DIN EN 62446-1(VDE 0126-23-1):** (2019): “Photovoltaik (PV)-Systeme –Anforderungen an Prüfung, Dokumentation und Instandhaltung –Teil 1: Netzgekoppelte Systeme – Dokumentation, Inbetriebnahmeprüfung und Prüfanforderungen“
- [138] **DIN VDE 0105-100:** (2017): „Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen; Wiederkehrende Prüfungen“, inkl. Berichtigung 2020

- [139] **DIN VDE 0100-600: 2017:** „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 6: Prüfungen“
- [140] **DIN EN IEC 61215-1 VDE 0126-31-1 (2022):** „Terrestrische Photovoltaik (PV)-Module – Bauart-eignung und Bauartzulassung. Teil 1: Prüfanforderungen“
- [141] **DIN EN IEC 61730-2 VDE 0126-30-1 (2018).** „Photovoltaik (PV)-Module – Sicherheitsqualifika-tion Teil 2: Anforderungen an die Prüfung“
- [142] **Bundesrepublik Deutschland** (2022): Bundesnaturschutzgesetz (BnatSchG). Gesetz über Natur-schutz und Landschaftspflege – Bundesnaturschutzgesetz vom 29.7.2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 8.12.2022 (BGBl. I S. 2240) geändert worden ist
- [143] **Europäische Gemeinschaft** (2009): „Vogelschutzrichtlinie 2009/147/EG. RICHTLINIE 2009/147/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES“ vom 30.11.2009 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten
- [144] **EWG** (1992): „Fauna-Flora-Habitat (FFH) Richtlinie 92/43/EWG. RICHTLINIE 92/ 43 /EWG DES RATES“ vom 21. 05.1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen
- [145] **Bundesrepublik Deutschland** (2021): „Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten – Bundes-Boden-schutzgesetz“ vom 17.03.1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25.02.2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist
- [146] **Bundesrepublik Deutschland** (2020): „Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung“ vom 12.07.1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 126 der Verordnung vom 19.06.2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- [147] **Bundesrepublik Deutschland** (2022): „Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung - Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz“ vom 21.12. 2015 (BGBl. I S. 2498), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 20.12.2022 (BGBl. I S. 2512) geändert worden ist
- [148] **Bundesrepublik Deutschland** (2023): „Messstellenbetriebsgesetz (MsbG). Gesetz über den Mess-stellenbetrieb und die Datenkommunikation in intelligenten Energienetzen - "Messstellenbe-triebsgesetz“ vom 29.09.2016 (BGBl. I S. 2034), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22.05.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 133) geändert worden ist
- [149] **DB Energie GmbH** (2022): „Technische Netzanschlussbedingungen für 16,7-Hz-Bahnenergie-Erzeugungsanlagen und Speicher und/oder Verbraucheranlagen am 15-kV-Oberleitungsnetz.“
- [150] **Deutsche Bahn AG:** „Integrierter Bericht 2022“, [Online], [Zugriff am: 2023-07-23]. Verfügbar unter [https://ir.deutschebahn.com/fileadmin/Deutsch/2023/Berichte/DB\\_IB22\\_d.pdf](https://ir.deutschebahn.com/fileadmin/Deutsch/2023/Berichte/DB_IB22_d.pdf)
- [151] **Sam Breugelmans, Paul Tobback** (2023): “Optimal design of PV systems along lines with direct feed into 25kV AC”, Leipzig: Konferenz a.c. rail power supply (acrps), 30. – 31.03.2023
- [152] **Bundesrepublik Deutschland** (2023): „Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschüt-

terungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung“ vom 17.05.2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 11 Absatz 3 des Gesetzes vom 26.06.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) geändert worden ist

- [153] **Forschungs-Informations-System** (2003): „Schallschutzwände und -wälle an Bahnstrecken“, [Online], [Zugriff am: 16.10.2023], Verfügbar unter: <https://fis.server.de/servlet/is/49310/>
- [154] **energie-experten.org, Greenhouse Media GmbH**: „Solare Kennedybrücke in Bonn-Beuel“ [Online], [Zugriff am: 16.10.2023], Verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/projekte/solare-kennedybruecke-in-bonn-beuel>
- [155] **Power Technology**: “Blackfriars Station Solar Bridge”, [Online], [Zugriff am: 16.10.2023], Verfügbar unter: <https://www.power-technology.com/projects/blackfriars-station-solar-bridge/?cf-view>
- [156] **DB Energie GmbH**: „Geburtsstunde des 16,7-Hz-Bahnstroms“ [Online], [Zugriff am: 16.10.2023], Verfügbar unter: <https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/Geburtsstunde-des-16-7-Hz-Bahnstroms-4362188>
- [157] **Nazir, Cawas Phiroze** (2019): “Solar Energy for Traction of High Speed Rail Transportation: A Techno-economic Analysis”, in: Civil Engineering Journal, Vol. 5, No. 7, Seite 1566 – 1576. [Online verfügbar, Zugriff am: 2023-10-16]. [Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/334599424\\_Solar\\_Energy\\_for\\_Traction\\_of\\_High\\_Speed\\_Rail\\_Transportation\\_A\\_Techno-economic\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/334599424_Solar_Energy_for_Traction_of_High_Speed_Rail_Transportation_A_Techno-economic_Analysis)]



## 27 Anhänge

### Anhang I: Heat-Maps

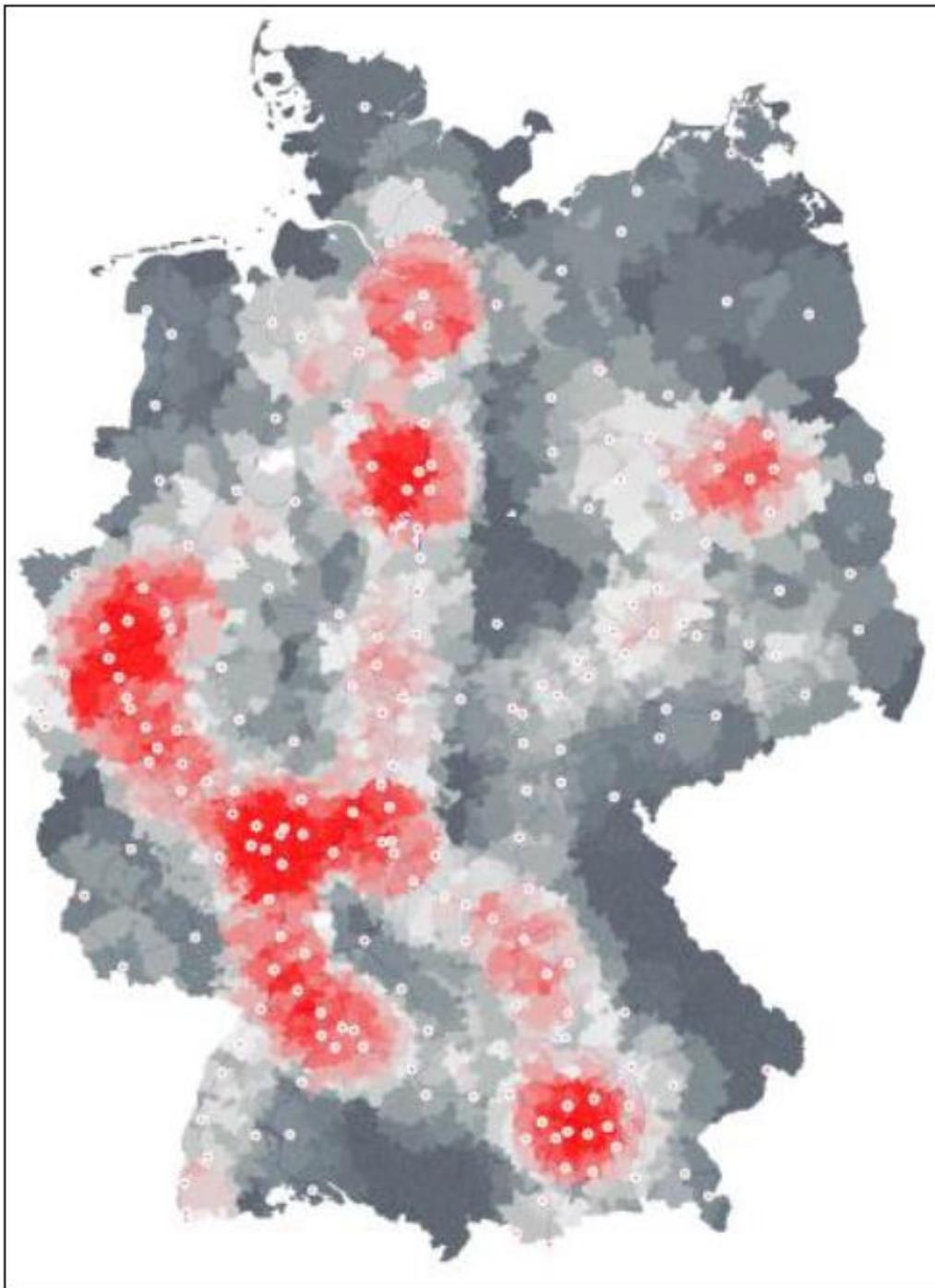


Abbildung 49: Heat-Map, Traktionsenergieverbrauch der von DB Energie versorgten Anlagen in 2019. Quelle: DB Energie

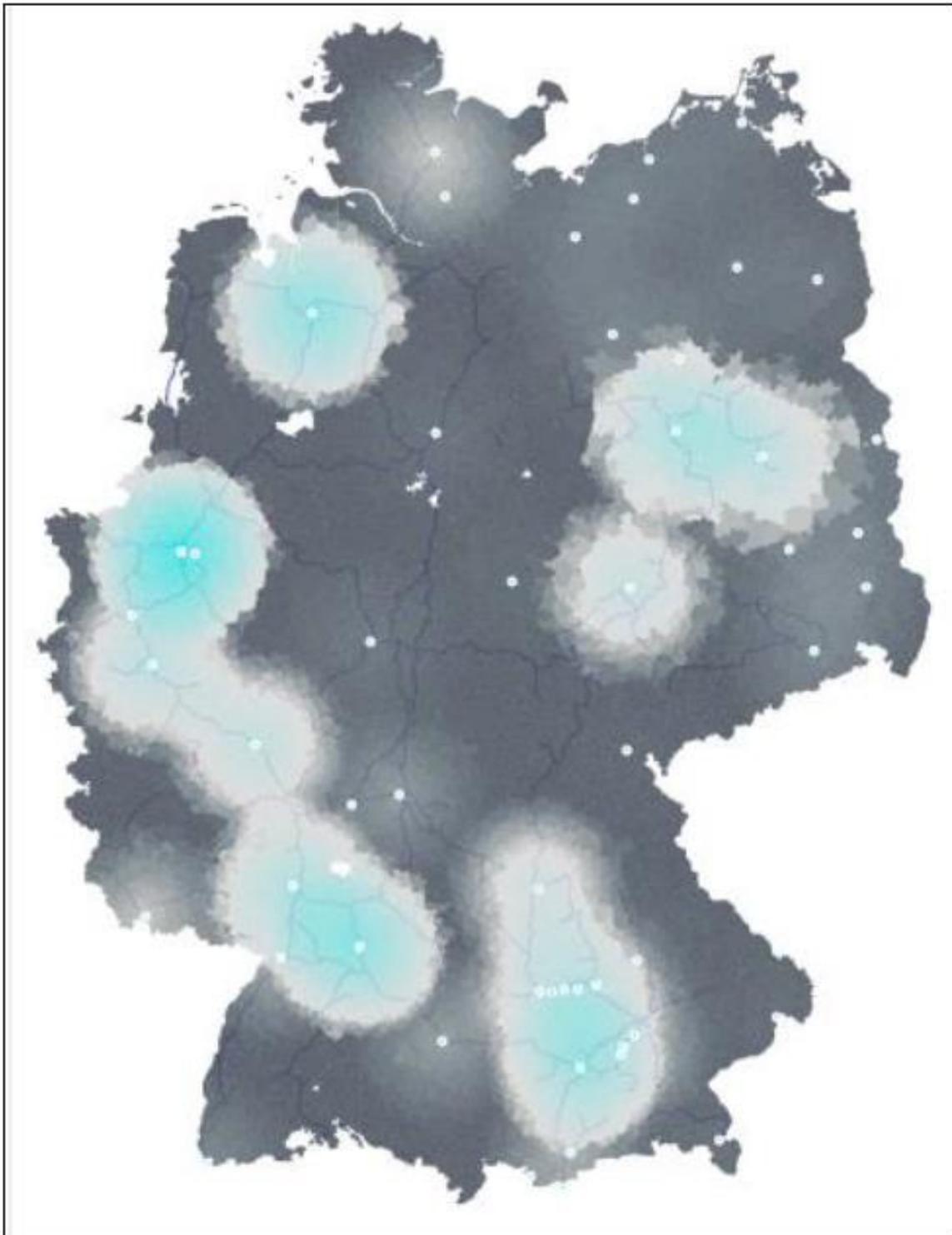


Abbildung 50: Heat-Map, von DB Energie erzeugte Traktionsenergie in 2019. Quelle: DB Energie

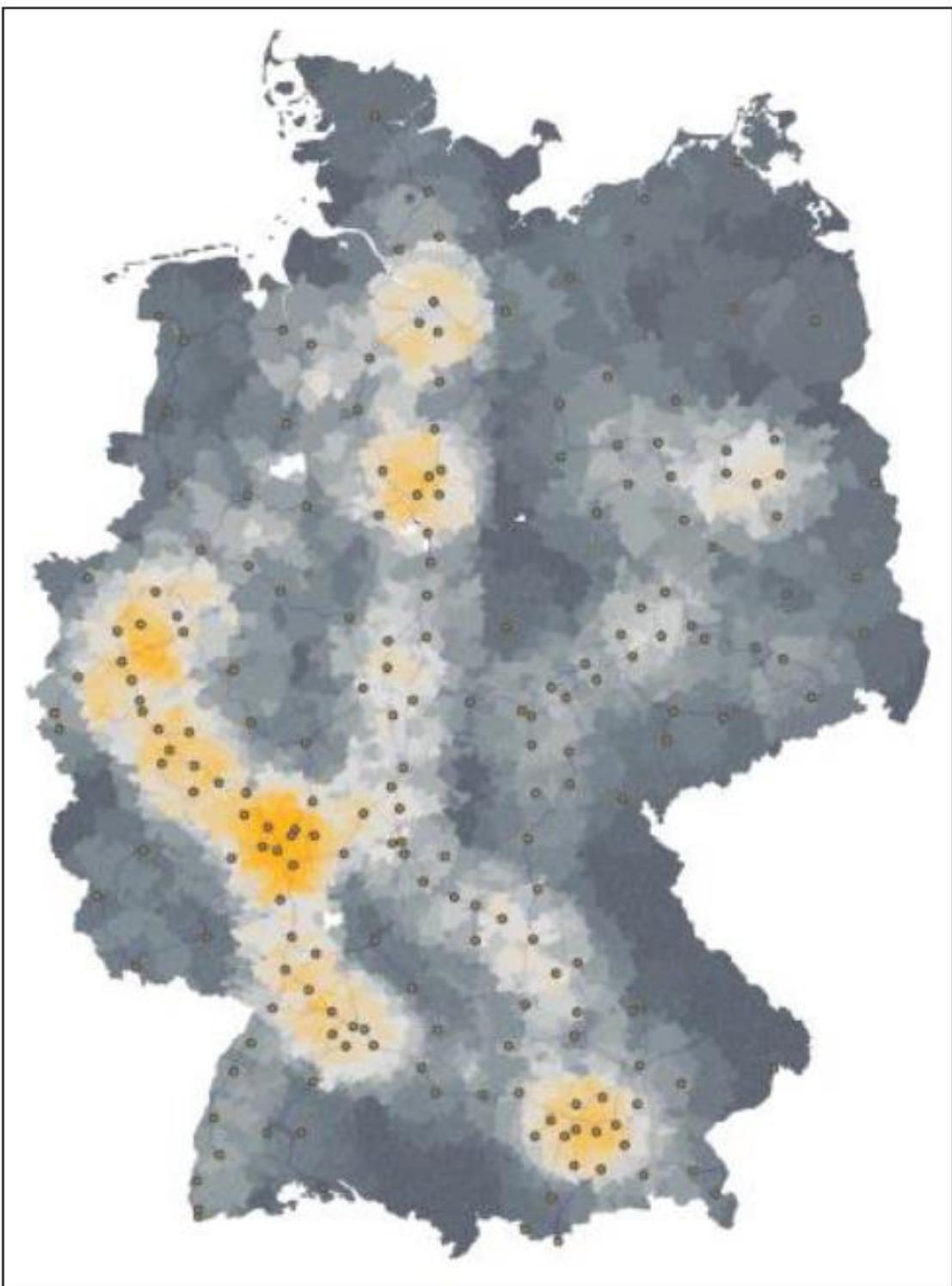


Abbildung 51: Heat-Map, Spitze der Traktionsleistung (Verbrauch) in den von DB Energie versorgten Anlagen.  
Quelle: DB Energie

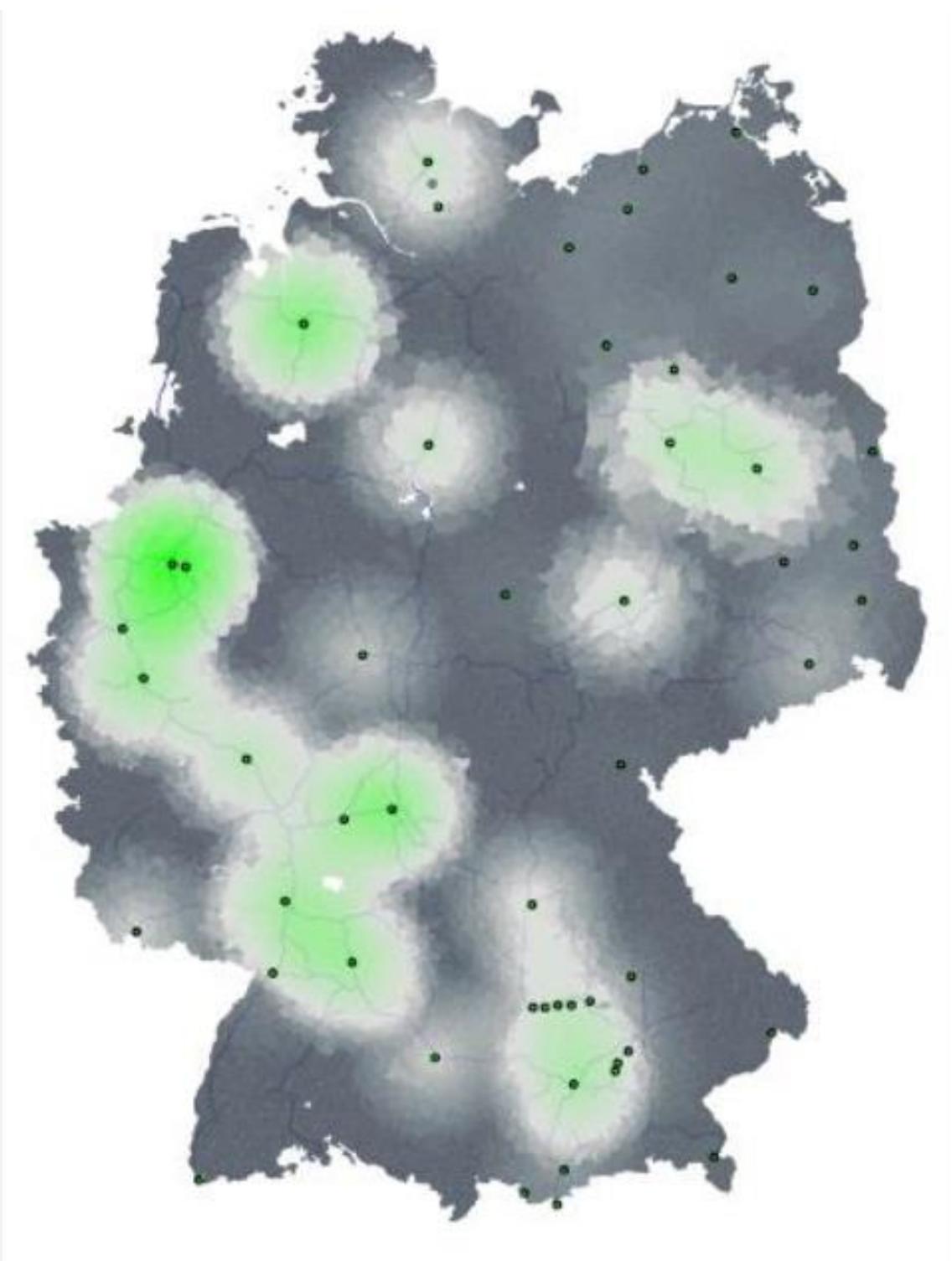


Abbildung 52: Heat-Map, Installierte Traktionsleistung der von DB Energie versorgten Anlagen. Quelle: DB Energie

## Anhang II: Tabellarische Darstellung der Rechercheergebnisse zu DB Richtlinien und zur EBA-Richtlinie

### Anhang II.I DB RiL 123.xxxx - Notfallmanagement, Brandschutz

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
123.0101	<p>Ziel dieser Richtlinie: Grundlegende Vorgaben zum vorbeugenden Brandschutz und alle Maßnahmen bei gefährlichen Unregelmäßigkeiten, Unfällen, Bränden</p> <p>Geltungsbereich</p> <p>Grundlagen: Hinweise auf wesentliche Gesetze, Verordnungen und Anweisungen</p> <p>Aufgabenverantwortung, Aufgabenwahrung: Generische Definition der Rollen und Aufgaben</p>	<p>Gefährliche Unregelmäßigkeiten, Unfälle, Brände, etc. sind auch bei PV-Anlagen zu berücksichtigen.</p> <p>Anwendungsbereich sind die gesamten Anlagen der DB AG und ihrer Konzernunternehmen. Damit auch evtl. vorhandene PV-Anlagen.</p> <p>Gültige Gesetze, Verordnungen und Anweisungen sind generell zu beachten.</p> <p>Bei Planung und Errichtung sowie im Betrieb der PV-Anlagen sind diese zu berücksichtigen.</p> <p>Bei zukünftigen PV-Anlagen sind die Rollen und Aufgaben auf die Anwendung PV-Anlage auszudehnen.</p>	X	-
123.0110	Voraussetzungen: Allgemeine Festlegungen, Alarmierungen, Notfallbezirke der EIU, Aufgaben der EVU	In diesem Teil werden allgemeine Festlegungen getroffen. Eine Anpassung aufgrund vorhandener PV-Anlagen erscheint nicht notwendig.	X	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
123.0110	Organisation der Nothilfe	In diesem Teil werden generelle Festlegungen zur Organisation der Nothilfe getroffen. Eine Anpassung aufgrund vorhandener PV-Anlagen erscheint nicht notwendig.	X	-
	Vorbedingungen für das Aufgleisen von Eisenbahnfahrzeugen	Beim Aufgleisen von Eisenbahnfahrzeugen sind sicherlich Festlegungen zu treffen, damit so wenig wie möglich PV-Module in oder in der Nähe von Gleisbereichen beschädigt werden. Eine Ergänzung der RiL könnte erforderlich sein.	X	X
	Erarbeiten von Unterlagen	Hier werden die zu erarbeitenden Unterlagen, wie z. B. Notfallmappe, Kartenmaterial beschrieben. In diese Unterlagen sind die PV-Anlagen mit einzubeziehen.	X	X
	Kommunikation	Festlegungen für Kommunikation.	-	-
	Ausrüstung	Ausrüstung nach oder in Anlehnung an Anhang 1 wird festgelegt. Ggf. muss die notwendige Ausrüstung bei vorhandenen PV-Anlagen erweitert werden.	X	X
	Prüfungen	Es werden Prüfungen der Unterlagen und Ausrüstung vorgeschrieben. Generelle Anforderung.	-	-
	Werkfeuerwehr	Vorgaben für die Einrichtung einer Werkfeuerwehr.	-	-
	Zusammenarbeit mit beteiligten Dritten	Hier werden Kontaktpflege zu Behörden und Informationsveranstaltungen genannt.	X	-
	Ausrüstung des Notfallmanagers	Die Ausrüstung ist ggf. für Anwendungen an und in der PV-Anlage zu erweitern.	X	X

## Anhänge

---

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
123.0117	Begriffe  Dampfgetriebene Schienenfahrzeuge	Begriffsdefinitionen  nicht relevant	-	-
123.0130	Allgemeine Bestimmungen  Ergänzenden Bestimmungen Strecken mit neuen langen Tunnels  Schematischer Handlungsablauf bei Brand im Zug  Verzeichnis der Begriffe	Selbstrettungsmaßnahmen dienen der unmittelbaren und aktuellen Abwehr von Gefahren für die Reisenden und die Mitarbeiter und werden vom Zugpersonal durchgeführt.  nicht relevant  nicht relevant  nicht relevant	-	-
123.0140	Erste Maßnahmen: Maßnahmen gemäß Fahrdienstvorschrift, Gleise sperren, kein Verlassen des Ereignisortes.	Generelle Festlegungen.	X	-
123.0140	Leitung am Einsatzort, Einsatzleitung  Aufgaben am Ereignisort.  Auskunft an Behörden und Medien  Benachrichtigung von Angehörigen  Busnotverkehr planen und durchführen  Begriffe	Generelle Festlegungen.  Generelle Aufgabenbeschreibung. Fokus auf Störungen des Bahnbetriebes mit Fahrzeugen.  Festlegungen zu Kommunikation  nicht relevant  nicht relevant  nicht relevant	X  X  X  -	-

## Anhang II.II: DB RiL 413.xxxx - Infrastruktur gestalten

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
413.0101	Ziele und Grundlagen der Infrastrukturplanung	PV-Anlagen können als "Betriebliche Infrastruktur" angesehen werden. Damit wäre diese RIL ebenfalls für PV-Anlagen anwendbar.  Anwendungsbereich der RIL 413 ist "DB Netze Fahrweg". Damit sind PV-Anlagen nur am Rande betroffen.	X	-
413.0102	Kompetenz und Verantwortung	Generelle Beschreibung	-	-
	Zusammenwirken mit anderen Funktionsträgern	Generelle Beschreibung	X	-
413.0102	Koordinieren der Investitions- und Instandhaltungsmaßnahmen	Generelle Beschreibung	X	-
413.0201	Allgemein gültige Regeln und Hinweise	Generelle Beschreibung	X	-
	Phasen der Betrieblichen Infrastrukturplanung	Generelle Beschreibung	X	-
	Planungsveranlassung	Generelle Beschreibung, welche Anlässe eine Planung auslösen.	X	-
	Grobcheck, Einschätzung der Machbarkeit	Generelle Beschreibung	X	-
	Erarbeiten der Grundlagenermittlung	Generelle Beschreibung	X	-
	Vorplanung	Generelle Beschreibung	X	-
	Weitere Planungsphasen	Generelle Beschreibung	X	-
	Inhalt und Gliederung der Betrieblichen Aufgabenstellung	Generelle Vorgaben, u. a. Checkliste	X	-
	Muster für Betriebliche Aufgabenstellung	Nicht relevant	X	-
413.0202	Bestelländerungen während der laufenden Planungs- und Bauaktivitäten verursachen in der Regel Leistungen außerhalb der abgeschlossenen Verträge und damit Mehrkosten.	Generelle Beschreibung	X	-

## Anhänge

---

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
413.0301	Definition von Streckenstandards	Definition von Streckenstandards, um Verkehre zu vergleichmäßigen und damit mehr Verkehrsleistung über weniger komplexe und damit günstigere Strecken zu führen.  Kein Einfluss auf PV-Anlagen	-	-
413.0401	Strategische Ausrichtung  Beschreibung der Entwicklung von Strategien und deren Ausrichtung	nicht relevant	-	-
413.0402	Anwendung TEIV (durch EIGV ersetzt) / TSI	Kein Einfluss auf PV-Anlagen, solange sie nicht den einschlägigen Regelungen widersprechen.	-	-
413.0501	Betriebliche Inhalte und Grundlagen	Dieses Modul gilt auch für DB Energie.  Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen. Alle Module 413.05nn sind somit auf PV-Anlagen nicht anwendbar.	-	-
413.0502	Inhalte und Grundaussagen des Betriebsprogramms	siehe 413.0501	-	-
413.0503	Anheben örtlich zulässiger Geschwindigkeiten	siehe 413.0501	-	-
413.0504	nicht vorhanden	siehe 413.0501	-	-
413.0505	Eine Strecke als Haupt- oder Nebenbahn betreiben	Siehe 413.0501	-	-
413.0506	Betriebsverfahren für eingleisige Strecken auswählen	siehe bei 413.0501	-	-
413.0507	Gleisarten und Gleislängen	siehe bei 413.0501	-	-
413.0508	Reduzierung von Bahnanlagen betrieblich planen und beauftragen	siehe bei 413.0501	-	-
413.0601	Leit- und Sicherungstechnik-/TK Maßnahmen	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen. Alle Module 413.06nn sind somit auf PV-Anlagen nicht anwendbar.	-	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
413.0602	ESTW betrieblich planen	siehe bei 413.0601	-	-
413.0603	ESTW-R betrieblich planen	siehe bei 413.0602	-	-
413.0604	Schnittstelle zwischen ESTW und Zugleitstrecke planen	siehe bei 413.0603	-	-
413.0605	Ortsstellbereich betrieblich planen	siehe bei 413.0604	-	-
413.0701	Das Ziel dieser RiL und der RiL 413.0702 dient der weiteren Erläuterung zur Erstellung der Betrieblichen Aufgabenstellungen. Dieses Modul ist nicht anwendbar für DB Energie.	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
413.0702	Maßnahmen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
413.0801	Bestandsdaten werden erfasst. Weichenheizungen werden in durchgehenden Hauptgleisen vorgesehen.	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
413.0802	Spezifische Streckencharakteristika, Spezifische Streckencharakteristika werden aufgezeigt. Übersichtspläne sind in den Anhängen enthalten.	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
413.0803	Hinweise auf Informationsquellen zur Erstellung der Betrieblichen Aufgabenstellung	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
413.4101	Verpflichtung zur Nachrüstung von Gleisfreimeldeanlagen	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
413.9701	Abkürzungsverzeichnis	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-

## Anhang II.III: DB RiL 800.xxxx – Bahnanlagen entwerfen

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
800.01	Geltungsbereich, Regelzeichnungen, weitere Planungsgrundlagen	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
800.01	Linienführung, wie z. B. Gleisbogen, Überhöhung, Längsneigung	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
800.01	Weichen und Kreuzungen	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
800.01	Querschnittsgestaltung der Gleisanlagen	<p>Ausführliche Behandlung des Lichtraumprofils. Damit ist auch der mögliche Raum für die Unterbringung von PV-Modulen definiert.</p> <p>Der Abstand zwischen zwei parallel verlaufenden Gleisen ist in der Regel so dimensioniert, dass zwischen den Gleisen kein Raum für die Installation von PV-Modulen besteht.</p> <p>Gem. Absatz 25 ist bei Neu- und Umbauten einer Strecke in der Regel ein Streifen von 1 m neben notwendigen Nutzung freizuhalten. Dieser Streifen ist für eine sinnvolle Nutzung durch PV-Anlagen zu schmal.</p> <p>Diese Regelung ist bei der Installation der PV-Anlagen zu beachten, eine Änderung des Lichtraumprofils und der betreffenden Anforderungen dieser RiL scheint nicht sinnvoll möglich.</p>	X	-
800.01	Sonstige Entwurfsgrundlagen	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
800.01	Sonstige Entwurfsgrundlagen - Maßnahmen gegen Schneeverwehungen	Abschnitt 38 beschreibt Maßnahmen gegen Schneeverwehungen. Hier können mögliche Hinweise für die Errichtung von Schutzanlagen für PV-Module abgeleitet werden.	X	-
800.01	Betriebsstellen der freien Strecke	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
800.01	Bahnhofsanlagen	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
800.01	Gleisabschlüsse	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
800.01	Umweltschutz - Untersuchungsbereiche	Bei der Planung von Vorhaben sind Belange des Umweltschutzes zu berücksichtigen. Dies beinhaltet auch Landschaft, Kultur- und Sachgüter.	X	-
800.01	Umweltschutz	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-

## Anhänge

---

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
800.01	Anforderungen an Lärmschutzwände	<p>Der Aufbau der LSW ist bei der Installation von PV-Modulen an LSW zu berücksichtigen. Ggf. ergeben sich beispielsweise einzuhaltende Grenzwerte der Belastung oder unzureichende Befestigungsmöglichkeiten.</p> <p>Es ist zu beachten, dass dieser Anhang von 1991 ist. Mittlerweile mögen sich die gängigen Konstruktionen der LSW geändert haben.</p> <p>Ob eine Änderung der hierin enthaltenen Vorschriften für die Anwendung von PV erforderlich ist, kann im Rahmen dieses Projektes nicht geprüft werden.</p>	X	X
800.02	Ähnlich der Ril 800.01 werden die Entwurfsgrundlagen für NBS spezifiziert.	<p>Der größte Teil der Anforderungen enthält keinen Bezug zu PV-Anwendungen oder möglicher Anwendungen auf PV-Anlagen.</p> <p>Die Querschnittsgestaltung der freien Strecke spielt auch in dieser Ril eine bedeutende Rolle. Die diesbezüglichen Anmerkungen zur Ril 800.01 gelten auch hier.</p> <p>Schneeverwehungen werden hier nicht behandelt.</p>	X	-
800.0110	Linienführung, Spezifikation der Linienführung, z. B. Gleisbogen und Gerade, Überhöhung, Längsneigung	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-
800.0120	Auswahl Weichen, Kreuzungen u. Hemmschuh- ausw.(m*02, Spezifikation der Weichen, Kreuzungen und Hemmschuh- auswurfvorrichtungen	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
800.0130	Netzinfrastruktur; Streckenquerschnitte Erdkörper Spezifikation des Aufbaus der Strecke mit Angaben zu Lichtraumprofil, Gleisabstände, Fahrbahnquerschnitte, Rand- und Zwischenwege, Planum, Kabeltrassen, Ab- stände fester Anlagen von der Gleismitte und Eigentums- grenzen neben der Strecke.	Diese Punkte sind bereits in anderen analysierten RiL's behan- delt worden. Sie haben keinen direkten Einfluss auf die Ausge- staltung von PV-Anlagen, wiewohl Anforderungen z. B. bzgl. lichem Raum durch die PV-Anlagen eingehalten werden müs- sen. Da die hier aufgeführten Spezifikationen keine neuen Anforde- rungen festlegen, wird diese RiL als nicht relevant für PV-Anla- gen eingestuft. Änderungen an dieser RiL sind ebenfalls nicht erforderlich.	-	-
800.0201	Ziel der Richtlinie ist es, Lokabstellgleise so zu planen und zu betreiben, dass gemäß den umweltrechtlichen Anforde- rungen nach Anhang 1 keine Verunreinigungen und Ein- wirkungen auf Boden und Gewässer entstehen und nach- teilige Veränderungen ihrer Eigenschaften vermieden wer- den.	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher An- wendung auf PV-Anlagen.	-	-
800.0230	Die Anleitung regelt die Erfassung der erforderlichen Be- standsdaten, um der rechtlichen Verpflichtung zur anfor- derungsgemäßen Eigenüberwachung der Abwasseranla- gen nachzukommen.	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher An- wendung auf PV-Anlagen.	-	-

## Anhang II.IV: DB RiL 804.xxxx - Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, DB RiL 805 – Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
804	Die RiL 804 gilt für den Neubau, die Erneuerung und den wesentlichen Umbau von Eisenbahnbrücken im Streckennetz der DB und ist anzuwenden für die Konstruktion vom Entwurf bis zur Bauausführung.	<p>Installation von PV-Modulen auf Brücken innerhalb dieser Studie ist vorgesehen für die Anwendungsklasse gleisintegriert und die Anwendungsklasse LSW.</p> <p>Daher enthält diese RiL prinzipiell Anforderung mit Bezug zu PV-Anlagen.</p> <p>Entsprechenden Regelungen gemäß der vorgesehenen Konstruktion und der Brückenbauweise sind anzuwenden.</p> <p>Jedoch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die zusätzliche Gewichtskraft der PV-Modules ist, im Vergleich mit der Eigenlast und Last durch Fahrzeuge, vernachlässigbar.</li> <li>- Die gleisintegrierte Anwendung (Montage auf den Schwellen) und die Anwendungsklasse LSW (Montage an oder auf der LSW) haben keinen direkten Einfluss auf die und keinen direkten Kontakt mit der Konstruktion der Brücke.</li> </ul> <p>Damit sind die RiL bzgl. der Brückenbauwerke für PV-Anlagen nicht anwendbar und enthalten keine Anforderungen bzgl. möglicher Anwendungen von PV-Anlagen.</p> <p>Ausnahme bildet die RiL 804.5501, die LSW behandelt, an oder auf denen PV-Module installiert werden können.</p>	-	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
804.5501	Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken	Falls PV-Anlagen auf LSW, die auf Brücken vorhanden sind, vorgesehen sind, ist Modul 804.5501 zu berücksichtigen. Anforderungen an die Inspizierbarkeit von LSW gemäß RiL 804.8001 und RiL 804.8004 sind zu berücksichtigen. Der Abstand der Pfosten für die Aufnahme der Lärmschutzelemente beträgt 5 m.	X	-
804.5501	Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken, - Türen mit lichter Öffnung 1 m x 2 m sind alle 500 m vorzusehen. - vor der Brücke ist eine Tür vorzusehen. - falls zum Einsetzen größerer Geräte, z. B. fahrbarer Leiter, Tore notwendig sind, sind Tore mit lichter Breite von 2,5 m auszuführen.	ist relevant, bei der Planung der PV-Anlagen zu berücksichtigen	X	-
804.5501	Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken, Falls planungsrechtlich oder vom Notfallmanagement und Brandschutz Rettungswege von der LSW unterbrochen sind, sind Türen mit min. 1,6 m x 2,2 m vorzusehen.	ist relevant, bei der Planung der PV-Anlagen zu berücksichtigen	X	-
804.5501	Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken, Windeinwirkungen sind zu berücksichtigen. Falls sich die Windlasten durch das Aufbringen der PV-Module ändern, ist dies vor Installation zu prüfen.	ist relevant, bei der Planung der PV-Anlagen zu berücksichtigen	X	-

## Anhänge

---

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
804.5501	Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken, Versätze im Bereich von Oberleitungsmasten	Werden LSW im Bereich von Oberleitungsmasten vorgesehen, sind entsprechende Versätze, Umfahrungen o. ä. in der LSW zu konstruieren. Dadurch entstehen Störungen für eine kontinuierliche Belegung der LSW mit PV-Modulen. Dies ist bei der Planung der PV-Anlage zu berücksichtigen. Eine Änderung dieser Regelung, sodass LSW ohne solche Störungen aufgebaut werden, scheint nicht sinnvoll.	X	-
804.5601	Spezifikation von Befestigungen und Verankerungen in Beton	Die Befestigungen und Verankerungen in Beton sind in dieser RiL spezifiziert. Die Vorgaben sind, je nach Konstruktion der PV-Anlage, zu beachten.	X	-
804.8001	Inspektion von Ingenieurbauwerken, Allgemeine Grundsätze, Ingenieurbauwerke sind bezüglich Ihrer Sicherheit (Betriebs-, Verkehrs-, Standsicherheit) regelmäßig und auf besondere Anordnung zu inspizieren.	Gem. Abs. 2 zählen LSW zu den zu inspizierenden Ingenieurbauwerken. Falls PV-Module auf den LSW aufgebracht sind, beeinflussen sie ggf. die Inspektion. Ggf. sind auch anderweitig aufgebaute PV-Module sowie deren Befestigung und Aufbau regelmäßig auf o. g. Sicherheitskriterien hin zu inspizieren. Notwendige Gebäude für die übrigen Teile der PV-Anlage sind ggf. ebenfalls regelmäßig zu inspizieren.	X	-
804.8004	Inspektion von Ingenieurbauwerken, sonstige Ingenieurbauwerke, Ergänzende Festlegungen zu RiL 804.8001 mit besonderer Berücksichtigung von LSW.	Falls PV-Module auf den LSW aufgebracht sind, beeinflussen sie die Tätigkeit der Inspektion. Hilfreich für die Inspektion wären besondere Regelungen bei vorhandenen PV-Modulen.	X	X

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
805	Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken	Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.	-	-

## Anhang II.V: DB RiL 807.04xx - • Ausgewählte Maßnahmen und Anforderungen an das Gesamtsystem Fahrweg/Fahrzeug: Aerodynamik/Seitenwind

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	An- wend- bar	Änderung erforderlich
807.0421	Aerodynamik/Seitenwind - Grundlagen Infrastruktur	<p>In dieser RiL wird das Konzept der Nachweisführung für die Infrastruktur beschrieben. Untersucht werden Abschnitte (Untersuchungsabschnitte) die eine Strecke oder Teil einer Strecke sein können. Die Richtlinie gilt für neue Strecken.</p> <p>Zur Nachweisführung werden die Untersuchungsabschnitte nach der örtlich zulässigen Geschwindigkeit kategorisiert. Je nach Fahrzeugkategorie und der ermittelten Überschreitenshäufigkeit erfolgt die streckenbezogene Fahrzeugfreigabe.</p>	-	-
807.0422	Aerodynamik/Seitenwind - Vorbewertung Infrastruktur	<p>In diesem Teil der RiL ist der Ablauf einer Vorbewertung von Abschnitten hinsichtlich geringem oder potenziell hohem Seitenwindaufkommen beschrieben. Ein Bezug zu ggf. vorhandenen PV-Anlagen oder ähnlichen Komponenten in der Umgebung werden in dieser RiL nicht genommen.</p>	-	-
807.0423	Aerodynamik/Seitenwind - Anforderungen an die Infrastruktur	<p>Dieser Teil der RiL benennt die seitenwindbedingten Anforderungen an den Untersuchungsabschnitt, der gemäß RiL 807.0422 als ein Abschnitt mit potenziell hohem Seitenwindaufkommen vorbewertet wurde. Ein Bezug zu ggf. vorhandenen PV-Anlagen oder ähnlichen Komponenten in der Umgebung werden in dieser RiL nicht genommen.</p>	-	-
807.0424	Aerodynamik/Seitenwind - Infrastrukturbewertung, Streckenänderung	<p>Für neue Streckenabschnitte, für die ein Planfeststellungsverfahren/-genehmigungsverfahren durchgeführt wird, wird ein Sicherheitsnachweis Seitenwind erstellt. Bei Änderungen an der Infrastruktur sind ggf. ergänzende Bewertungen des Seitenwindaufkommens erforderlich.</p> <p>Der Einbau von PV-Modulen ist nach Einschätzung der Autoren keine Änderung an der Infrastruktur, die nach dieser RiL eine ergänzende Bewertung erfordert.</p>	-	-

## Anhang II.VI: DB RiL 813.xxxx - Personenbahnhöfe planen und bauen

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
813.0101	Zweck und Geltungsbereich der RiL - Familie 813	Die RiL 813.0101 behandelt die Grundlagen und Grundsätze zu Planung und Bau, inkl. Änderungen von Personenbahnhöfen. Es werden eine Reihe von Hinweisen auf zu berücksichtigende Anforderungen, auch außerhalb des Eisenbahnbereichs, gegeben. Diese, sowie die gesamte RiL-Familie 813, gelten prinzipiell auch bei der Installation von PV-Anlagen an und auf bestehenden Gebäuden.	X	-
813.01xx	Grundlagen und Grundsätze, Projektbedarf mit dem Projektantrag festlegen, Planungsleistungen, Dokumentationsvorgaben, Brandschutz	Die RiL 813.01nn behandelt die Grundlagen und Grundsätze zu Planung und Bau, inkl. Änderungen von Personenbahnhöfen. Es werden eine Reihe von Hinweisen auf zu berücksichtigende Anforderungen, auch außerhalb des Eisenbahnbereichs, gegeben. Diese, sowie die gesamte RiL-Familie 813, gelten prinzipiell auch bei der Installation von PV-Anlagen an und auf bestehenden Gebäuden.	X	-
813.02xx	Bahnsteige und ihre Zugänge	Im Rahmen dieser Studie ist nicht vorgesehen, PV-Module oder andere Teile der PV-Anlage auf oder am Bahnsteig oder im Bereich der Zugänge zu installieren.	-	-
813.03xx	Wegeleit- und Informationssysteme	PV-Anlagen werden keine Änderung am Wegeleit- und Informationssystem hervorrufen.	-	-

## Anhänge

---

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
813.0400	<p>Planungshandbuch Bau und Technik für Personenbahnhöfe</p> <p>Es beinhaltet Vorgaben für die Erstellung von Planungs- und Bestandsunterlagen sowie grundlegende technische und brandschutztechnische Anforderungen an bau- und gebäudetechnischen Anlagen. Die Anforderungen orientieren sich an der Zielsetzung zur Errichtung betriebssicherer, funktioneller und wirtschaftlicher Anlagen.</p>	<p>Wenn PV-Module im Bereich von Personenbahnhöfen installiert werden, z. B. auf Dächern, sind die in dieser RiL beschriebenen Anforderungen zu berücksichtigen und die Richtlinie dahingehend zu ergänzen.</p>	X	X
813.0440	<p>Planungshandbuch Bau und Technik, Modul 440 Planungsvorgaben Starkstromanlagen</p>	<p>In dieser Potenzialstudie ist ebenfalls die Installation von PV-Modulen in Personenbahnhöfen berücksichtigt. Bevorzugt würde die PV-Leistung in das vorhandene 50-Hz-Netz eingespeist werden. Die festgelegten Planungsvorgaben sind zu berücksichtigen und einzuhalten. Das Modul ist bezüglich der Besonderheiten der PV-Anwendung zu ergänzen.</p>	X	X
813.0480	<p>Planungshandbuch Bau und Technik, Modul 480 Planungsvorgaben Gebäudeautomation</p>	<p>In diesem Modul sind neben Anforderungen und Vorgaben anderer Teilgewerke der Gebäudeautomation auch Festlegungen zu Gewerkeschaltsschränken, Verkabelung und Starkstromanlagen enthalten, die ebenfalls bei der Installation von PV-Modulen und Solarwechselrichtern zu berücksichtigen sind. Dieses Modul ist ebenfalls in Bezug auf die Besonderheiten der PV-Anwendung zu ergänzen.</p>	X	X

## Anhang II.VII: DB RiL 819.xxxx - LST-Anlagen planen

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
819.0801	Beeinflussung und Schutzmaßnahmen von LST- und TK-Technik, - Übersicht - Starkstrombeeinflussung - Beeinflussung und EMV allgemein	Das Kapitel 2 sollte um PV-Anlagen als beeinflussendes System ergänzt werden, denn diese Anlagen enthalten immer Solarwechselrichter, die Störaussendungen verursachen und andere benachbarte Anlagen, so auch der LST- und TK-Technik, beeinflussen können. Es ist zu klären, ob PV-Anlagen mit Direkteinpeisung in die Fahrleitung als Bahnstromanlagen im Sinn des Kap. 2 Abs. (1) gelten.	X	X
819.0802	Beeinflussung und Schutzmaßnahmen Starkstrombeeinflussung Induktive Beeinflussung - Übersicht, - Zusammenhänge - Nachweis - Vorgehensweise - Messung	Es ist zu prüfen, ob in den Zusammenhängen, dem Nachweis und der Vorgehensweise PV-Anlagen in unmittelbarer Nähe zu LST und TK-Anlagen hinreichend berücksichtigt sind.	X	X

## Anhänge

---

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
819.0803	<p>Beeinflussung und Schutzmaßnahmen Starkstrombeeinflussung durch das Bahnsystem Induktive Beeinflussung – Berechnung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Berechnungsgleichung</li> <li>- Ausgangsdaten (Gleichungsfaktoren)</li> <li>- Berechnung und Überschlagrechnung der ind. Beeinflussung</li> <li>- Beeinflussung durch mehrere beeinflussende Systeme</li> </ul>	<p>Die Berechnungsverfahren zur induktiven Beeinflussung sind hinsichtlich der Installation von PV-Anlagen zu prüfen, ob die Oberschwingungen (gestrahlte Größen) der Solarwechselrichter hinreichend berücksichtigt sind. Möglicherweise sind Anpassungen und Ergänzungen erforderlich, da auch die tageszeitlichen Schwankungen der Stromerzeugung zu berücksichtigen sind.</p>	X	X
819.0804	Beeinflussung und Schutzmaßnahmen, Grenzwerte der Beeinflussungsspannung, Grundsatzfestlegungen	Die Grenzwerte für die Beeinflussungsspannungen auf LST und TK-Anlagen gelten unverändert, unabhängig von der verursachenden Quelle.	-	-
819.0805	<p>Beeinflussung und Schutzmaßnahmen; Induktive Beeinflussung,</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusammenstellung der möglichen Schutzmaßnahmen</li> <li>- Verkürzung der Beeinflussungslänge</li> <li>- Kabel mit Induktionsschutz</li> <li>- Andere geerdete Leiter</li> <li>- Einsatz anderer Technik/Systeme</li> </ul>	<p>Wenn LST- und oder TK-Anlagen in unmittelbarer Nähe zu vorhandenen PV-Anlagen neu errichtet oder geändert werden, sollten abhängig von den ursächlich dadurch entstehenden Beeinflussungsspannungen Gegenmaßnahmen getroffen werden. Folgende Maßnahmen sind möglich:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- die Beeinflussungslänge kann verkürzt werden,</li> <li>- es können Kabeln mit angepasstem Induktionsschutz verwendet werden,</li> <li>- Anwendung spezieller Erdungsmaßnahmen,</li> <li>- Auswahl bestimmter LST/Tk-Kabeltypen und/oder</li> <li>- andere Techniken können in der LST/Tk-Anlagentechnik eingesetzt werden.</li> </ul>	X	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
819.0806	Beeinflussung und Schutzmaßnahmen Starkstrombeeinflussung durch das Bahnsystem Induktive Beeinflussung - Beispiel Ausgangssituation Überschlagrechnung Ausführliche Berechnung Vergleich mit den Grenzwerten Schutzmaßnahmen Kabel mit Induktionsschutz auf der Gesamtlänge Kabel mit Induktionsschutz auf einer Teillänge Galvanische Auftrennung der Verbindung	In diesem Teil der RiL wird ein exemplarisches Beispiel betrachtet.	-	-

## Anhang II.VIII: DB RiL 820.xxxx - Grundlagen des Oberbaus

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
820.001	Allgemeine Regelungen, Inhaltsverzeichnis der Regelwerksfamilie 820.	In dieser RiL ist das Inhaltsverzeichnis der sehr umfangreichen Regelwerksfamilie 820 wiedergegeben. Die einzelnen RiL's, ohne Nennung der zugehörigen Anhänge, werden im Folgenden gelistet. Aus diesem Inhaltsverzeichnis ist keine Anwendbarkeit auf PV-Anlagen erkennbar.	-	-
820.0101	In dieser RiL-Familie werden die Regelungen für Planung, Neubau und Instandhaltung des Oberbaus dargestellt und Begriffe definiert. Diese RiL-Familie ist anwendbar für Oberbauten, die bis 300 km/h befahren werden. Es gibt eine ganze Reihe von mitgeltenden RiL's.	nicht relevant	-	-
820.0110	Festlegungen für Angaben in den Zeichnungen.	In den Zeichnungen zum Oberbau wird die Oberbauart mit Schwellenart, Schienenform und Schienenbefestigung angegeben. Weiterhin wird die Oberbauanordnung mit Oberbauart, Schienenstoßart und Schwellenzahl angegeben sowie sind besondere Angaben zu Weichen und Kreuzungen enthalten. Bei der Anwendungsklasse gelaistintegriert sind diese Zeichnungen für die Planung der Anlage zu verwenden.	X	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
820.0120	Regelung der oberbautechnischen Freigabe	<p>Bei Änderungen am Oberbau sind entsprechende Freigaben notwendig.</p> <p>Änderungen am Oberbau finden statt durch Einbau der gleisintegrierten PV-Module.</p> <p>Ob und wie weit dies freigabepflichtig ist, müsste geklärt werden und eindeutig in dieser RiL festgelegt werden. Ebenso wären die Voraussetzungen und der Umfang der notwendigen Untersuchungen vor Erteilung der Freigabe notwendig. Hierzu wären entsprechende Anpassungen/Ergänzungen dieser RiL notwendig.</p>	X	X
820.0130	Regelung der oberbautechnischen Untersuchung bei Gleisverdrückung, Entgleisung, sonstigen gefährlichen Ereignissen, Gleisverwerfung.	<p>Bei fahrwegintegrierten PV-Anlagen könnten gefährliche Ereignisse entstehen, falls sich z. B. komplette PV-Module von der Schwelle lösen und z. B. aufgrund des Soges oder Druckes des Fahrzeugs in die Fahrzeuggrenzlinie hineinragen.</p>	X	-
820.0140	Organisatorische Regelungen zu Qualifizierung und Befähigung.	<p>Keine Anforderung enthalten mit Bezug oder möglicher Anwendung auf PV-Anlagen.</p>	-	-

## Anhang II.IX: DB RiL 836.xxxx - Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instandhalten

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
836.0101	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Allgemeine Anforderungen</li> <li>- Verzeichnis der zitierten Regelwerke</li> </ul>	<p>Die Richtlinie ist nicht nur bei Neuerstellungen oder Erneuerung von Bauwerken, sondern auch bei wesentlichen Änderungen an bestehenden Bauwerken sowie bei der Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke anzuwenden. Es ist grundsätzlich zu klären ob die Errichtung von PV-Anlagen auf vorhandenen Erdbauwerken (Erdkörper, Dämmen, Einschnitten, Böschungen und Felshängen) oder auf geotechnischen Bauwerken (Stützbauwerken, Rückhaltebecken (ausschließlich fester und beweglicher Verschlüsse, Rechen usw. am Aus- bzw. Überlauf), Durchlässe und Querungen) eine wesentliche Änderung an diesen bestehenden Bauwerken ist, da die Tragfähigkeit erneut zu prüfen ist.</p>	X	-
836.1001	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anwendung von Neubaukriterien</li> <li>- Anwendung von Verbesserungskriterien</li> <li>- Begutachtungen und Beratungen</li> <li>- Konstruktionsgrundsätze</li> <li>- Technische Planungs- und Vergabeabläufe</li> </ul>	<p>Es ist zu prüfen, ob durch die nachträgliche Errichtung von PV-Solaranlagen auf Erdbau- oder geotechnischen Bauwerken die Anwendung von Verbesserungskriterien zutrifft, da dies eine bauliche Anpassungsmaßnahme mit unveränderter Streckenbelastung ist. Dementsprechend sind die Konstruktionsgrundsätze anzuwenden.</p>	X	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
836.1002	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gutachter für Geotechnik</li> <li>- Allgemeine Anforderungen an geotechnische Untersuchungen</li> <li>- Spezielle Anforderungen bei bestimmten Maßnahmen</li> </ul>	Im Rahmen der Planung und Errichtung von PV-Anlagen auf vorhandenen erd- und geotechnischen Bauwerken muss der Umfang geotechnischer Untersuchungen so festgelegt werden, dass abhängig von den notwendigen Baumaßnahmen Baugrundrisiken minimiert und Baugrundschäden vermieden werden. In diesem Zusammenhang ist zu entscheiden, ob die Errichtung von PV-Anlagen als kleine oder untergeordnete Baumaßnahmen gelten, sodass auf Untersuchungen verzichtet werden kann.	X	-
836.2001	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ständige Einwirkungen</li> <li>- Veränderliche Einwirkungen aus Eisenbahnverkehr</li> <li>- Vereinfachtes Lastbild</li> <li>- Dynamische Beiwerte</li> <li>- Horizontale Einwirkungen</li> <li>- Sonstige veränderliche Einwirkungen</li> <li>- Außergewöhnliche Einwirkungen</li> <li>- Ausbreitung von Eisenbahnverkehrslasten im Boden</li> <li>- Erddrücke aus Eisenbahnverkehrslasten</li> </ul>	Die charakteristischen Einwirkungen und Beanspruchungen, die sich aus der geplanten Errichtung von PV-Anlagen auf vorhandenen erd- und geotechnischen Bauwerken ergeben, müssen als statische und dynamische Belastungen (z. B. Windeinwirkung) berücksichtigt werden.	X	-
836.3001	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tragfähigkeitsnachweise</li> <li>- Gebrauchstauglichkeitsnachweise und -untersuchungen</li> <li>- Verformungsnachweise und -untersuchungen</li> <li>- Nachweise und Untersuchungen zur dynamischen Stabilität des Unterbaus/Untergrundes</li> </ul>	Dieses Modul regelt die Führung von Nachweisen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit bei der Erstellung, Erneuerung oder bei wesentlichen Änderungen von geotechnischen Bauwerken, die in dieser Richtlinie erfasst sind. Sollten aufgrund der neu errichteten PV-Anlagen Nachweise erforderlich sein, sind diese gemäß diesem Modul zu erstellen. Die genannten Nachweise werden im Einzelnen festgelegt.	X	

## Anhang II.X: DB RiL 997.xxxx - Oberleitungsanlagen

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforder- lich
997.0100A0 1	Oberleitungen; Arbeitsanweisung 26. BImSchV §3 Vorsorgemaßnahmen, Grenzwerteinhaltung, Minimierungsmaßnahmen, Maßnahmenbewertung	Da die PV-Anlagen in der Nähe von Gleisen, der Fahrleitung und möglicherweise von Bauten stehen werden sind entsprechende Betrachtungen und ggf. Maßnahmen zu treffen und zu bewerten. Dies gilt insbesondere für PV-Anlagen, die in die Oberleitung einspeisen und somit mit ihr in Wechselwirkung stehen.	X	-
997.0110	- Regellichaum und Raumbedarf für Oberleitungsanlagen - Lichte Höhe und Weite von Bauwerken - Bahnübergänge	Am/im Gleisbereich zu installierende PV-Anlagen dürfen nicht in den Regellichaum und in den Oberleitungs- und Stromabnehmerbereich hineinragen	X	-
997.0112	- Statisches und dynamisches Verhalten - Profil des Stromabnehmers - Regeloberleitungen für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche - Parallelfelder/Nachspannungen - Weichen und Kreuzungen	Hier geht es um spezielle Festlegungen zu den Regeloberleitungen bei der DB	-	-
997.0114	- Arten von Bahnenergieleitungen - Bahnenergieleitungen (BEL)	Für PV-Anlagen, die ihre erzeugte Leistung/Energie direkt in die 15-kV-Fahrleitung einspeisen (sollen), ist diese RiL 997.0114 ebenfalls dafür anzuwenden und die festgeschriebenen Regeln einzuhalten.	X	-
997.0117	- Schutzmaßnahmen gegen direktes Berühren - Schutz durch Abstand - Schutz durch Hindernisse - Sonderregelungen	Da die spannungsführenden Speiseleitungen von der PV-Anlage, die direkt in die Oberleitung einspeist, Bestandteil der Oberleitungsanlage sind, sind dafür die Schutzmaßnahmen der RiL 997.0117 anzuwenden.	X	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforder- lich
97.0301	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planungen mit elektrischer Netzwirkung</li> <li>- Speisung der Oberleitung planen</li> <li>- Streckenspeisepläne</li> <li>- Schaltung der Oberleitung planen</li> </ul>	Für die PV-Anlagen, die direkt in die 15-kV-Fahrleitung einspeisen sollen (neue Erzeugeranlage), muss die Speisung und die Schaltung der Einspeisung geplant und in bestimmten vorgeschriebenen Dokumenten sichtbar dargestellt werden. Als netzwirksame neue Einspeisung sind auch die Schutzeinstellwerte, die Netzleit- und Stationsleittechnik und die elektrische Netzbetriebsführung betroffen und unbedingt zu berücksichtigen.	X	X
997.0202	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verantwortung für die Rückleitungs- und Bahnerdungsmaßnahmen</li> <li>- Allgemeines, Grundsätze</li> <li>- Rückleitungsanschlussleiter Unterwerke</li> </ul>	Die PV-Anlagen müssen als neue Erzeugeranlage mit der Rückleitung (Gleisen) verbunden werden. Deshalb sind die Regeln und Festlegungen in der RiL 997.0202 einzuhalten.	X	X
997.0204	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Allgemeines, Grundsätze</li> <li>- Maste</li> <li>- Weitere Festlegungen</li> </ul>	Falls sich PV-Anlagen teilweise im Oberleitungs- und/oder Stromabnehmerbereich befinden, sind Bahnerdungsmaßnahmen zu planen entsprechend der RiL 997.0204.	X	-
997.0205	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausführung</li> <li>- Verlegung</li> <li>- Anschluss an Gleise oder Schienen</li> <li>- weitere Festlegungen</li> </ul>	Zwischen den PV-Erzeugeranlagen und der Einspeisung in die Fahrleitung müssen Speiseleitungen bzw. Speisekabel bis zu Einspeisestelle geführt werden. Die Maste, die eventuelle Speiseleitungen tragen, müssen bahngeerdet werden. Dabei müssen die Festlegungen der RiL 997.0205 bei der Errichtung der Bahnerdung eingehalten werden.	X	-

## Anhang II.XI: DB RiL 954.xxxx – Elektrische Energieanlagen

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforder- lich
954.0101	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Allgemeines, geschäftsführende Stelle, mitgeltende Unterlagen</li> <li>- Qualifikationsanforderungen</li> <li>- Anforderungen an externe Unternehmen/Lieferanten</li> <li>- Strukturierung der stationären elektrischen Energieanlagen der DB AG</li> <li>- Versorgungsnetz, Verteilnetz, Verbraucheranlage</li> </ul>	<p>PV-Anlagen zur Direkteinspeisung in die Fahrleitung unterliegen als Erzeugeranlagen elektrischer Energie prinzipiell der RiL 954.0101.</p> <p>Weiterhin benötigen PV-Anlagen 50 Hz-Hilfsenergie (Eigenbedarf), deren Gestaltung ebenfalls der genannten Richtlinie unterliegt.</p>	X	-
954.0102	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Allgemeine Grundsätze, geschäftsführende Stelle, Beteiligungspflicht, Zuständigkeit EBA, Projektverantwortung</li> <li>- Anlagen planen</li> <li>- Planprüfung</li> <li>- Anlagen errichten</li> <li>- Anlagen abnehmen</li> <li>- Anlagen in Betrieb nehmen, dokumentieren und abschließen</li> </ul>	<p>PV-Anlagen sind elektrische Energieanlagen und fallen als solche in den Geltungsbereich der DB RiL 954.0102</p>	X	-
954.0102A0 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwurfsplanung</li> <li>- Ausführungsplanung</li> <li>- Formblätter "Prüfnachweise el. Energieanlagen bis 1 kV und über 1 kV"</li> <li>- Formblätter "Messprotokoll für el. Energieanlagen"</li> </ul>	<p>Da die PV-Anlagen el. Energieanlagen sind, gilt der Mindestumfang der erforderlichen Planungsunterlagen ebenfalls.</p>	X	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforder- lich
954.0106	- Systemauswahl und Systemeinführung	PV-Anlagen unterliegen als elektrische Energieanlagen ebenfalls den technischen Freigabeverfahren ebenso wie andere el. Systeme, die bei der DB zum Einsatz kommen sollen.	X	-
954.0107	- Grundsätze - Erder - Potenzialausgleich - Schutzmaßnahmen - Anwendung TN- und TT-Netzformen	PV Anlagen sind el. Energieanlagen, für die bestimmte bei der DB zugelassene Netzformen entsprechend der RiL 954.0107 anzuwenden sind. Im Zusammenhang dazu sind bestimmte Grundsätze zu berücksichtigen und einzuhalten.	X	-
954.0107A0 1	- Grundsatz, Beeinflussung - Öffentliches Netz TN-System - Öffentliches Netz TT-System - 16,7-Hz-Mittelspannungsstation - Unterwerke, Schaltposten - Weichenheizanlagen - Außenbeleuchtungsanlagen - Netzersatzanlagen	Da die PV-Anlagen sich im Bereich elektrifizierter Strecken befinden, sind die Grundsätze der RiL 954.0107A01 einzuhalten und anzuwenden.	X	-
954.0107A0 2	- Sonstige Räume und Bereiche mit leitfähiger Umgebung - Weichenheizanlagen - Außenbeleuchtungsanlagen - Netzersatzanlagen	PV Anlagen haben in Ihrer Umgebung Nahtstellen oder beinhalten eventuell auch die Versorgung von Nebenverbrauchern wie z. B. Weichenheizanlagen. Weiterhin ist ggf. auch eine Außenbeleuchtung für PV-Anlagen vorzusehen.	X	-

## Anhang II.XII: DB RiL 955.xxxx – Schaltanlagen für Bahnstrom

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforder- lich
955.0001	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Allgemeines, Anwendungsbereich, Module</li> <li>- Grundsätzliche Festlegungen, Ansprechstellen</li> <li>- Mitgeltende Gesetze, Verordnungen, Normen, Vorschriften und RiL</li> </ul>	PV-Anlagen dienen der Erzeugung von Bahnstrom, beinhalten eine Schaltanlage für Bahnstrom und fallen daher unter diese Richtlinie RiL 955.0001	X	-
955.0101+A nhänge	Die RiL 955.0101 beschreibt die verschiedenen Anlagen-technik für die unterschiedlichen Erzeuger von Bahnstrom	PV-Anlagen zur Direkteinspeisung in die Fahrleitung fallen mit ihrer Anlagentechnik (Primär- und Sekundärtechnik) direkt in den Geltungsbereich dieser RiL 955.0101. Die zugehörige neue Anlagentechnik muss in diese Richtlinie aufgenommen werden.	X	X
955.0101A0 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erdungs- und Potenzialausgleichspläne (EPOT)</li> <li>- Übersichtsschaltpläne (Üp)</li> </ul>	Das Plan- und Zeichnungswerk ist für den neuartigen Erzeuger-typ PV-Solarkraftwerk zu ergänzen.	X	X
955.0101A0 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mindestanforderungen an die EMV-Planung und deren Verifikation</li> <li>- Wirksamkeit der Maßnahmen, Verifikation und Messung</li> <li>- Werkstandard der DB Energie GmbH zur EN 50121-2</li> </ul>	Die PV-Anlage/-Kraftwerk enthält Leistungselektronische An-lagenteile, die Störaussendungen verursachen. Dementspre-chend sind die Planungsgrundsätze der RiL 955.0101A02 anzu-wenden und einzuhalten	X	-
955.0102	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Netzschutzkonzept</li> <li>- Fahrleitungsschutz</li> <li>- Transformatorschutz</li> <li>- Übergeordneter Schaltanlagenschutz</li> <li>- Maschinen- und Umrichterschutz</li> </ul>	PV-Anlagen, die Energie direkt in die Fahrleitung einspeisen, müssen selbst Schutzeinrichtungen für ihre Anlagenkomponen-ten gegen Überlastung und Kurzschlüsse beinhalten, aber auch die Fahrleitung diesbezüglich schützen. Diese Richtlinie RiL 955.0102 ist um die speziellen Anforderungen an die Schutz-einrichtungen im PV-Kraftwerk zu ergänzen.	X	X
955.0103	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Allgemeines SLT</li> <li>- Funktionen SLT</li> <li>- Energiemanagementkomponente EMK</li> <li>- Einrichtungen zur Netzregelung (RwSe und Pilotsignalre-gelung)</li> <li>- Funktionsprüfung und Inbetriebnahme</li> </ul>	PV-Anlagen als neuartige Erzeugereinheiten, müssen ebenfalls wie andere Erzeugereinheiten mit einer Stationsleittechnik zur Steuerung und Überwachung vor Ort und aus der Ferne ausge-rüstet sein. Die Richtlinie RiL 955.0103 ist dementsprechend um die spezifischen Besonderheiten der PV-Anlagen zu ergänzen. Der Netzregelung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.	X	X

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforder- lich
955.0104	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Allgemeines, VPN DB Energie</li> <li>- TK-Anschlüsse</li> <li>- Fernwartung</li> <li>- IT-Sicherheit</li> </ul>	PV-Anlagen sind ebenso wie andere Erzeugereinheiten einzubinden in die Netzführung und Netzregelung des Fahrleitungsnets, eventuell sogar in die Netzführung des übergeordneten 16,7 Hz 110 kV Bahnstromnetzes. Für die dazu notwendige Informations- und Kommunikationstechnik gelten die Festlegungen der Richtlinie RiL 955.0104.	X	-

## Anhang II.XIII: DB RiL 877.xxxx, 878.xxxx, 879.xxxx, – Kreuzungsrichtlinien für Gas-, Wasser-, Strom- und Telekommunikationsleitungen

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforder- lich
877.xxxx	<p>Gas- und Wasserleitungskreuzungsrichtlinien</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rechtliche Regelungen, Vergütungen, Geschäftsordnung der Einigungsstelle</li> <li>- Antrags- und Genehmigungsverfahren</li> <li>- Technische Grundlagen, anwendbare Regelwerke</li> <li>- Bautechnische Planung, Korrosionsschutz</li> <li>- Bauausführung bei Erstellung, Änderung und Beseitigung</li> <li>- Abnahme, Betrieb und Instandhaltung</li> <li>- Aufhebungen</li> </ul>	<p>Diese RiL behandeln umfänglich die Kreuzungen und Parallelführung von Gas- und Wasserleitungen, Stromleitungen und Telekommunikationsleitungen mit Bahnanlagen, insbesondere mit Bahnstrecken. Die verschiedenen rechtlichen Aspekte, das Antrags- und Genehmigungsverfahren, die technischen Anforderungen, die Bauausführung, die Abnahme sowie Betrieb und Instandhaltung bis hin zur Aufhebung werden festgelegt.</p> <p>Für in die Bahninfrastruktur integrierte PV-Anlagen konnten keine spezifischen Anforderungen identifiziert werden.</p>	-	-
878.xxxx	<p>Stromleitungskreuzungsrichtlinien</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rechtliche Regelungen, Vergütungen, Geschäftsordnung der Einigungsstelle</li> <li>- Bestimmungen und Vorschriften</li> <li>- Planungsgrundsätze</li> <li>- Antrags- und Zustimmungsverfahren</li> <li>- Bauausführung, Schutzmaßnahmen bei Herstellung, Änderung oder Beseitigung von Stromleitungskreuzungen</li> <li>- Betrieb und Instandhaltung</li> </ul>	<p>Es ist jedoch bei Planung und Aufbau der PV-Anlagen zu beachten, dass kreuzende oder parallel geführte Leitungen existieren können. Diese dürfen durch den Aufbau nicht beschädigt werden. Betrieb und Instandhaltung müssen weiterhin möglich sein. Bei der Stromführung, insbesondere der Führung des Gleichstroms der PV-Anlagen, ist besonders darauf zu achten, dass der Strom nicht durch das Erdreich geführt wird, um Korrosion zu vermeiden.</p>	-	-
879.xxxx	<p>Telekommunikationskreuzungsrichtlinie</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rechtliche Regelungen, Vergütungen, mitgeltende Regelwerke</li> <li>- Planungsgrundsätze</li> <li>- Antrags- und Zustimmungsverfahren</li> <li>- Bauausführung, Schutzmaßnahmen bei Herstellung, Änderung oder Beseitigung von Stromleitungskreuzungen</li> <li>- Betrieb und Instandhaltung</li> </ul>		-	-

RiL bzw. Teile davon	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforder- lich
	- Schutzmaßnahmen bei Herstellung, Änderung und Be- seitigung			

## Anhang II.XIV: EBA-Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an Planung, Bau und Betrieb von Schienenwegen nach AEG“

Kap. der Richtlinie	Wesentlicher Inhalt	Kommentar	Anwendbar	Änderung erforderlich
1	<p>Diese Richtlinie konkretisiert die sich aus dem Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG)<sup>1</sup> ergebenden Verpflichtungen der Eisenbahnen hinsichtlich des Brand- und Katastrophenschutzes.</p> <p>Sie gilt für öffentliche Schienenwege (außerhalb von Tunnels mit einer Länge &gt; 500 m), beschreibt die Gestaltung der Sicherheitsmaßnahmen und die organisatorischen Maßnahmen bzgl. Selbst- und Fremdrettung.</p> <p><b>Bauliche Anforderungen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Von jeder Stelle eines Schienenweges soll zur Selbstrettung der Fahrgäste und des Zugpersonals ein sicherer Bereich erreicht werden können.</li> <li>- Zufahrten für Straßenfahrzeuge von öffentlichen Straßen aus zu den Schienenwegen.</li> <li>- Zugänge von den Zufahrten bis zu den Schienenwegen und zu den Rettungswegen.</li> </ul> <p><b>Organisatorische Anforderungen:</b></p> <p>Es muss ein Notfallmanagementsystem eingerichtet werden mit folgenden wesentlichen Elementen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Unfallmeldewesen</li> <li>- Einrichtung einer Unfallmeldestelle</li> <li>- Planunterlagen bereitstellen</li> <li>- Übungen und Ausbildung der Fremdrettungskräfte</li> </ul>	<p>Die Installation von PV-Anlagen im Bereich der Schienenwege darf die vorhandenen Rettungswege und deren Zufahrten und Zuwege nicht über die Mindestanforderungen dieser Richtlinie hinaus einschränken. Diese Richtlinie ist daher bei Planung und Bau einer PV-Anlage zu berücksichtigen.</p> <p>Änderungen oder Ergänzungen dieser Richtlinie sind nicht erforderlich. Ggf. sind spezielle Maßnahmen bei einem Ereignis in der Nähe von PV-Anlagen zu treffen. Diese Maßnahmen sind in den Unterlagen des Notfallmanagements festzulegen. Siehe auch DB RiL 123.xxxx [119].</p>	X	-
2			X	-
3			X	-