



Bern, 27.10.2021

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

ZUSAMMENFASSUNG

In Beantwortung des Postulats Storni 20.3616 (Lärmschutzwände entlang von Autobahnen und Bahnlinien. Studie über ihr Potenzial für die Produktion von Sonnenenergie) wurde von November 2020 bis März 2021 eine Studie mit dem Ziel durchgeführt, die bestehenden Photovoltaik-Potenzialstudien zu aktualisieren und eine realistische Abschätzung des technisch und wirtschaftlich realisierbaren Potenzials auf Lärmschutzwänden (LSW¹) entlang von Nationalstrassen und Bahnstrecken vorzunehmen.

Die Erfahrungen mit Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) auf LSW in der Schweiz und im Ausland seit den 1980er-Jahren haben noch nicht zum flächendeckenden Bau dieser Anlagenart geführt. Die Haupteinschränkungen, die diesen Einsatz betreffen, sind die Mindestabstände, die aus Sicherheits- und Betriebsgründen zu Verkehrswegen oder Bahnstromleitungen eingehalten werden müssen, sowie die akustischen Auswirkungen des Vorhandenseins von reflektierenden PV-Modulen auf überwiegend absorbierenden Wänden. Die tatsächlichen Aufstellungsmöglichkeiten hängen auch von der landschaftlichen Einbindung, der Beschattung oder von Hindernissen beim Zugang zu den Wänden ab. Aus wirtschaftlicher Sicht profitieren Anlagen auf LSW zwar wie andere Anlagentypen von den niedrigeren Kosten der PV-Module, die erforderliche Investition ist jedoch oft höher als bei einer vergleichbaren Anlage auf Gebäudedächern. Dies liegt an den notwendigen Verfahren und Studien sowie an den 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.

Das in dieser Studie geschätzte Potenzial für die PV-Energieerzeugung auf LSW entlang von Nationalstrassen und Eisenbahnstrecken unterscheidet zwischen einem technischen Potenzial, das die identifizierten technischen Einschränkungen erfüllt (optimierte Konfigurationen für Wände unterschiedlicher Höhe), einem technisch-wirtschaftlichen Potenzial, das sich auf Anlagen mit vertretbaren Kosten beschränkt (Stromgestehungskosten unter 20 Rp./kWh, Einmalvergütung abgezogen) und einem nutzbaren Potenzial, das die Standortbeschränkungen berücksichtigt.

Potenzial	Nationalstrassen		Bahnstrecken		Gesamt	
	MWp	GWh	MWp	GWh	MWp	GWh
Technisch	371	322	128	116	499	438
Technisch-wirtschaftlich	232	207	101	93	333	300
Nutzbar	61	55	50	46	111	101

Das nutzbare Potenzial, das auf 101 GWh pro Jahr geschätzt wird (55 GWh entlang der Nationalstrassen und 46 GWh entlang von Bahnstrecken), entspricht 0,15 % des national nutzbaren Potenzials für die PV-Energieerzeugung (Dächer und Fassaden), das laut Bundesregister auf 67 TWh geschätzt wird. Selbst wenn man die Einschränkungen bei der Umsetzung für Gebäude berücksichtigt, leistet das Potenzial von LSW nur ein kleiner Beitrag zum nationalen Potenzial. Die durchschnittlichen Investitionskosten der Anlagen, die dieses realistische Potenzial bilden, liegen bei 1750 CHF/kWp.

Für das ASTRA und die SBB, die sich zu energetisch und klimapolitisch vorbildlichen Massnahmen verpflichtet haben, trägt das PV Potenzial auf LSW eine relevante zusätzliche Menge zum PV-Produktionsportfolio bei. Die LSW in der Nähe von Strassentunneln können das Äquivalent von 11 % (d. h. 4,5 GWh) des auf anderen ASTRA-Flächen identifizierten nutzbaren Potenzials produzieren, und das technische und wirtschaftliche Potenzial auf den LSW entlang von Bahnstrecken (101 MWp) ist vergleichbar mit demjenigen auf den Dächern von Bahnsteigen (100 MWp). Der Anteil des Eigenverbrauchs und der Preis, zu dem die Energie vor Ort verwertet werden kann, haben einen massgebenden Einfluss auf die Entscheidung zum Bau einer PV-Anlage auf LSW.

Laufende technologische Entwicklungen werden die Leistung von PV-Systemen weiter verbessern und ihre Kosten senken, auch für Installationen auf LSW. Die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der Installation auf LSW (Verfahren, akustische und landschaftliche Studien) werden aufgrund von Skaleneffekten eher sinken.

¹ Abkürzungen: Siehe Glossar auf Seite 7

SINTESI

In risposta al postulato Storni 20.3616 (“Studio sul potenziale di produzione di energia fotovoltaica realizzabile sulle pareti foniche lungo autostrade e linee ferroviarie”), tra novembre 2020 e marzo 2021 è stato realizzato uno studio con l'obiettivo di aggiornare gli studi esistenti sul potenziale fotovoltaico (PV) e di fare una stima realistica del potenziale tecnicamente ed economicamente sfruttabile sulle pareti antirumore lungo le strade e le ferrovie nazionali.

Le esperienze con installazioni fotovoltaiche su pareti antirumore dagli anni '80 in Svizzera e all'estero non hanno ancora portato alla costruzione generalizzata di questo tipo di installazioni. I principali vincoli che riguardano questa diffusione sono le distanze minime da rispettare dalle corsie di traffico o dalle linee elettriche ferroviarie per ragioni operative e di sicurezza, e le implicazioni acustiche della presenza di pannelli fotovoltaici riflettenti su pareti prevalentemente assorbenti. Le possibilità effettive di collocazione dipendono anche dall'integrazione del paesaggio, dall'ombreggiamento o dagli ostacoli per accedere alle pareti. Da un punto di vista economico, anche se le installazioni su pareti antirumore beneficiano, come altri tipi di installazioni, di costi più bassi dei moduli fotovoltaici, l'investimento necessario è spesso più alto che per un impianto su tetto. Ciò è dovuto alle procedure e agli studi necessari, così come al costo aggiuntivo per collegare l'impianto a un punto di connessione, sia esso un'infrastruttura dell'Ufficio federale delle strade (USTRA) o delle FFS o la rete pubblica più vicina.

Il potenziale di produzione di energia fotovoltaica sulle pareti antirumore lungo le strade nazionali e le ferrovie stimato da questo studio distingue tra un potenziale che soddisfa i vincoli tecnici identificati (configurazioni ottimizzate per pareti di diverse altezze), un potenziale tecnico-economico che è limitato alle installazioni con un costo ragionevole (costo energetico scontato inferiore a 20 ct./kWh, deducendo la remunerazione unica) e un potenziale sfruttabile che tiene conto dei vincoli di localizzazione.

Potenziale	Strade nazionali		Ferrovie		Totale	
	MWc	GWh	MWc	GWh	MWc	GWh
Tecnico	371	322	128	116	499	438
Tecnico-economico	232	207	101	93	333	300
Sfruttabile	61	55	50	46	111	101

Il potenziale sfruttabile stimato di 101 GWh all'anno (55 sulle strade e 46 sulle ferrovie) rappresenta lo 0,15% del potenziale nazionale sfruttabile per la produzione di energia fotovoltaica (tetti e facciate), che è stimato in 67 TWh secondo il catasto federale. Anche considerando i vincoli di attuazione sugli edifici, il potenziale delle pareti antirumore rimane un piccolo contributo al potenziale nazionale. Il costo medio di investimento degli impianti che formano questo potenziale realistico è di 1750 CHF/kWp.

Questo potenziale può contribuire significativamente al portfolio di produzione PV dell'USTRA e delle FFS, che sono impegnate in azioni legate all'energia e all'esemplarità climatica. Le pareti antirumore in prossimità delle gallerie stradali possono produrre l'equivalente dell'11% (cioè 4.5 GWh) del potenziale sfruttabile individuato sulle altre superfici dell'USTRA, e il potenziale tecnico ed economico sulle pareti antirumore delle ferrovie (101 MWc) è paragonabile a quello dei tetti delle piattaforme (100 MWc). La quota di consumo proprio e il prezzo al quale l'energia può essere utilizzata localmente avranno un'influenza decisiva sulla decisione di costruire un impianto fotovoltaico su parete antirumore.

I continui sviluppi tecnologici contribuiranno a migliorare le prestazioni dei sistemi fotovoltaici e ad abbassarne i costi, anche per le installazioni su parete antirumore. I costi aggiuntivi legati all'installazione su parete antirumore (procedure, studi acustici e paesaggistici) diminuiranno invece grazie a delle economie di scala.

SUMMARY

In response to postulate Storni 20.3616 (“Noise barriers along motorways and railways. Study on the potential for the production of photovoltaic energy”), a study was carried out between November 2020 and March 2021 with the aim of updating the existing photovoltaic (PV) potential studies and making a realistic estimate of the technically and economically feasible potential on noise barriers (NB) along national roads and railways.

Experiences with PV installations on noise barriers since the 1980s in Switzerland and abroad have not yet led to the widespread construction of this type of installation. The main constraints affecting this deployment are the minimum distances to be respected from traffic lanes or railway power lines for safety and operational reasons, and the acoustic implications of the presence of reflective PV panels on predominantly absorbent walls. The actual implementation possibilities also depend on landscape integration, shading or obstacles to access the walls. Economically, although PV installations on NB benefit, like other types of installations, from the lowering costs of PV modules, the investment required is often higher than for a rooftop plant. This is due to the necessary procedures and studies, as well as the additional cost of connecting the plant to a connection point, either to an infrastructure belonging to the Federal Office for Roads (FEDRO) or to the SBB, or the nearest public grid.

The potential for PV energy production on NB along national roads and railways estimated by this study distinguishes between a potential that meets the identified technical constraints (optimised configurations for walls of different heights), a techno-economic potential that is limited to installations with a reasonable cost (discounted energy cost below 20 ct./kWh, single remuneration deducted) and an exploitable potential that takes into account implementation constraints.

Potential	National roads		Railway		Total	
	MWp	GWh	MWp	GWh	MWp	GWh
Technic	371	322	128	116	499	438
Techno-economic	232	207	101	93	333	300
Exploitable	61	55	50	46	111	101

The estimated exploitable potential of 101 GWh per year (55 on the roads and 46 on the railways) represents 0.15% of the national exploitable potential for PV energy production (roofs and facades), which is estimated at 67 TWh according to the federal register. Even taking into account the implementation constraints on buildings, the potential of NB remains a small contribution to the national potential. The average investment cost of the installations forming this realistic potential is 1750 CHF/kWp.

Noise barriers can contribute significantly to the PV production portfolio of FEDRO and SBB, which are committed to energy and climate exemplarity. The NB near road tunnels can produce the equivalent of 11% (i.e., 4.5 GWh) of the realistic potential identified on other FEDRO surfaces, and the technical and economic potential on railway NB (101 MWp) is comparable to that on platform roofs (100 MWp). The share of own consumption and the price at which the energy can be recovered locally will have a decisive influence on the decision to build a PV installation on NB.

Ongoing technological developments will continue to improve the performance of PV systems and lower their costs, including for installations on NB. The additional costs of installation on NB (procedures, acoustic and landscape studies) will rather decrease due to economies of scale.

Glossar

ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAV	Bundesamt für Verkehr
BF	Bifazial
BFE	Bundesamt für Energie
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)
LSV	Lärmschutz-Verordnung
EBG	Eisenbahngesetz
EPFL	Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne
<i>FEDRO</i>	<i>Federal office for roads</i>
<i>FFS</i>	<i>Ferrovie federali svizzere</i>
GW	Gigawatt (elektrische Leistung)
GWh	Gigawattstunde (elektrische Energie)
GWp	Gigawatt Peak (elektrische Spitzenleistung)
Hz	Hertz
<i>kWc</i>	<i>Kilowatt creta</i>
kWh	Kilowattstunde (elektrische Energie)
kWp	Kilowatt Peak (elektrische Spitzenleistung)
LCOE	Levelised Cost of Electricity (Stromgestehungskosten)
LSW	Lärmschutzwand
MF	Monofazial
MW	Megawatt (elektrische Leistung)
<i>MWc</i>	<i>Megawatt creta</i>
MWh	Megawattstunde (elektrische Energie)
MWp	Megawatt Peak (elektrische Spitzenleistung)
<i>NB</i>	<i>Noise barrier</i>
NHG	Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz
NZV	Eisenbahn-Netzzugangsverordnung
OPEX	Operational Expenditures (Betriebskosten)
PV	Photovoltaik
Rp.	Rappen
RPG	Bundesgesetz über die Raumplanung
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
VPVE	Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für Eisenbahnanlagen

Inhalt

1	Postulat und Inhalt des Auftrags	7
2	Ausgangslage	8
2.1	Solarenergie in der Schweiz	8
2.2	Erkenntnisse aus bestehenden Anlagen	9
2.3	Bestehende Studien zum PV-Potenzial an Lärmschutzwänden	11
3	Beurteilung des Potenzials	12
3.1	Technische Parameter	12
3.2	Wirtschaftliche Parameter	16
3.3	Potenzialschätzung Strassen	18
3.4	Potenzialschätzung Schiene	20
4	Nutzung des Potenzials	23
4.1	Bedeutung und Wettbewerbsfähigkeit des PV-Potenzials an Lärmschutzwänden	23
4.2	Bewilligungs- und Genehmigungsverfahren	24
4.3	Bau und Erneuerung von Lärmschutzwänden	26
5	Schlussfolgerungen	28
6	Vorgeschlagene Massnahmen	30
	Bibliografie	31
	Anhang: Methodologische Details	31

1 Postulat und Inhalt des Auftrags

Das Postulat 20.3616 von Bruno Storni vom 15.06.2020 «Lärmschutzwände entlang von Autobahnen und Bahnstrecken. Studie über ihr Potenzial für die Produktion von Solarenergie» hat folgenden Wortlaut:

«Der Bundesrat wird beauftragt, eine umfassende Studie zu verfassen über das Potenzial, das Lärmschutzwände und andere Ad-hoc-Strukturen entlang von Autobahnen und Bahnstrecken für die Produktion von Solarenergie haben. Die Studie ist bis Ende 2020 vorzulegen. Die Ziele der Energiestrategie 2050 sehen einen erheblichen Ausbau der Produktion erneuerbarer Energien, und damit auch der Solarenergie, vor. Gemeinhin werden Photovoltaikanlagen auf Dächern oder Fassaden von Wohn- und Geschäftshäusern und öffentlichen Gebäuden angebracht. Neben diesen klassischen Örtlichkeiten können aber auch bestehende oder noch zu bauende Lärmschutzwände entlang von Autobahnen oder Bahnstrecken für mittlere und grosse Photovoltaikanlagen genutzt werden. Die Idee ist nicht neu. In Chur besteht eine solche Anlage an der A13 bereits seit über 30 Jahren. Andere Anlagen kamen später hinzu. Ein systematisches Vorgehen ist aber nicht auszumachen. Die technologische Entwicklung der letzten Jahrzehnte hat neue Photovoltaikzellen hervorgebracht, die sich für verschiedene Expositionen an Lärmschutzwänden und sogar für durchsichtige Wände eignen. Die fraglichen Bauten (Autobahn- und Eisenbahnnetz) sind im Eigentum des Bundes. Darum ist es von grundlegender Bedeutung, dass der Bund ihr Energiepotenzial genau kennt und sie aktiv nutzt. Und darum braucht es eine Potenzialstudie.»

Das vorliegende Dokument entspricht der im Postulat verlangten Studie. Sie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) vom Energie- und Umweltplanungsbüro Planair SA vom November 2020 bis März 2021 durchgeführt, in Zusammenarbeit mit Stellen des ASTRA, des Bundesamtes für Energie (BFE), des Bundesamtes für Verkehr (BAV) und der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB).

Tabelle 1: Methodik der Studie

Vorbereitung	<ul style="list-style-type: none">• Analyse der Erkenntnisse aus bestehenden Anlagen und der durchgeführten Potenzialstudien• Datenbankanalyse der Lärmschutzwände (LSW) entlang von Nationalstrassen und Bahnstrecken• Identifizierung der wichtigsten zu beachtenden Parameter und Einschränkungen
Studie	<ul style="list-style-type: none">• Analyse der verschiedenen Konfigurationsvorschläge für PV-Anlagen auf LSW an einem Workshop mit Experten für die Themen Akustik, Statik, Integration Landschaft/Umwelt• Zusätzliche akustische und statische Studien in Zusammenarbeit mit dem Büro Prona und der EPFL, um die zu berücksichtigenden Konfigurationsarten zu validieren• Visuelle Stichproben von Lärmschutzwänden für die Strasse zur Abschätzung der Umsetzungswahrscheinlichkeit• Berechnung der Kosten für die Realisierung von Musteranlagen
Potenzial-schätzung	<ul style="list-style-type: none">• Berechnung des technischen Potenzials• Berechnung des wirtschaftlichen und des realistischen Potenzials• Situierung des Vorhabens in den schweizerischen Kontext und in Bezug auf die Klimaziele von ASTRA und SBB

Die Studie befasst sich mit der Aktualisierung der bestehenden Potenzialstudien im Hinblick auf die jüngsten technologischen Fortschritte und hat eine vertiefte Evaluation der Kompatibilität der Photovoltaikanlagen mit der Lärmschutzfunktion und den Sicherheits- und Betriebseinschränkungen der Infrastruktur durchgeführt. Ziel war es, eine realistische Einschätzung des technisch und wirtschaftlich nutzbaren Potenzials zur Solarenergieerzeugung (nachfolgend «Potenzial») an den Lärmschutzwänden

entlang von Autobahnen und Bahnstrecken vorzulegen. Die angewandte Methodik wird in der Tabelle 1 dargelegt.

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut: Kapitel 2 stellt die Ausgangslage für die Studie vor, die Erkenntnisse aus bereits umgesetzten Anlagen und Studien; in Kapitel 3 werden Methodik und die Ergebnisse der Potenzialstudie präsentiert; Kapitel 4 beleuchtet das im Rahmen der Energiestrategie festgestellte Potenzial. Die Kapitel 5 und 6 stellen die Schlussfolgerungen und die vorgeschlagenen Massnahmen vor.

2 Ausgangslage

2.1 Solarenergie in der Schweiz

2.1.1 Energiestrategie, nationale PV-Ziele

Im Basisszenario der Energiestrategie 2050 stellt die Photovoltaik die erste Säule der Energieversorgung in der Schweiz dar. Die im November 2020 im Auftrag des Bundesamts für Energie veröffentlichten Energieperspektiven 2050+ sehen für diese Technologie daher bis 2050 [1] eine Jahresproduktion von 34 TWh vor, d. h. eine Steigerung um den Faktor 13 im Vergleich zu heute. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Verbreitung der Photovoltaik beträchtlich beschleunigt und das jährliche Installationsvolumen von 400 MWp auf 1000 MWp erhöht werden. Gleichzeitig wird das theoretische Potenzial auf Gebäudedächern vom BFE auf 50 TWh und für mittelmässig bis sehr gut geeigneten Fassaden auf 17 TWh geschätzt. [2]

Obwohl dieses Potenzial dem Anschein nach genügen könnte, um die Ziele zu erreichen, ist es sinnvoll zu prüfen, ob weitere Flächen zusätzliches Potenzial gewährleisten könnten, da ein Teil der Gebäude aus technischen, architektonischen oder wirtschaftlichen Gründen oder wegen des mangelnden Willens der Besitzer allenfalls nicht genutzt werden könnte. Die Infrastruktur ist insofern interessant, da sie eine doppelte Nutzung der Fläche ermöglicht und keine Industrialisierung natürlicher oder landwirtschaftlicher Flächen bedingt. Die Lärmschutzwände sind mit einer Gesamtlänge von 577 km entlang der Nationalstrassen und von 412 km entlang der Bahnstrecken ein geeigneter Kandidat. Die Autobahnränder, deren PV-Potenzial basierend auf ihrer Fläche auf 3,9 TWh [3] geschätzt wurde, werden hier nicht einbezogen wegen eines Interessenkonflikts mit der Biodiversität und dem Landschaftsschutz, im Einklang mit dem Positionspapier des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE), Umwelt (BAFU), Energie (BFE) und Landwirtschaft (BLW) über freistehende PV-Anlagen [4]. Im Gegensatz zu Deutschland gibt es im Schweizer Recht keine bevorzugten Flächen für die Energieerzeugung, die den «Solarfreiflächen» an den Rändern von Autobahnen und Bahnstrecken entsprechen.

Die Frage der Nutzung von LSW zur Erzeugung von Solarenergie war in der Vergangenheit schon Gegenstand parlamentarischer Vorstösse, etwa bei der Interpellation Baumgartner (96.3126) und beim Postulat Darbellay (11.4017). Die Pilotversuche, die in diesem Zusammenhang durchgeführt wurden, haben nicht zum flächendeckenden Bau dieser Anlagenart geführt: Sie sind auf den ersten Blick weniger rentabel und stellen ausserdem zusätzliche Hindernisse hinsichtlich Nutzungskonflikten und Raumplanung dar. Die LSW haben allerdings den Vorteil, dass sie sich seit 2008 im Besitz des Bundes befinden, was eine systematischere Umsetzung ermöglichen könnte, wenn sich die momentanen Bedingungen als günstiger erweisen würden.

Der Bund hat mehrere Massnahmenpakete beschlossen, um in der Energiestrategie 2050 eine Vorbildrolle einzunehmen. Das Klimamassnahmenpaket umfasst insbesondere die Nutzung aller angepassten Dachflächen von Bundesgebäuden (einschliesslich derjenigen des ASTRA) für die Erzeugung von Solarenergie. Das Programm Energie-Vorbild Bund umfasst auch die bundesnahen Betriebe, einschliesslich der SBB, und fördert die Produktion von Solarenergie. Das BAV entwickelt seit 2013 parallel ein Programm zur Umsetzung der Energiestrategie 2050, unter anderem im Bereich der Produktion erneuerbarer Energien, indem Strategien erarbeitet und innovative Projekte zusammen mit

der ÖV-Branche unterstützt werden. Das ASTRA und die SBB haben sich im Rahmen dieser Programme verpflichtet, bis im Jahr 2030 35 bzw. 30 GWh/Jahr an Solarenergie auf ihren eigenen Gebäuden und Anlagen zu erzeugen. Geeignete LSW könnten eine Ergänzung zum Objektportfolio für diese Massnahmen darstellen.

2.1.2 Technologischer Kontext

Das exponentielle Wachstum des Photovoltaikmarktes hat eine rasche Entwicklung der Technologie ermöglicht. Die Innovationsbestrebungen konzentrieren sich hauptsächlich auf Kostensenkung und die Leistungsverbesserung. Ziel ist es, die Gestehungskosten für PV-Energie, die laut der Internationalen Agentur für erneuerbare Energien in den letzten zehn Jahren um 80 Prozent gesunken sind, weiter zu senken. Die im Auftrag des BFE [5] durchgeführte Photovoltaikmarkt-Beobachtungsstudie 2019 hat gezeigt, dass die Kosten für Anlagen auf Dächern in der Schweiz zwischen CHF 800/kWp für Anlagen mit über 1 MWp und CHF 3160/kWp für Anlagen mit 2 bis 10 kWp betragen. Der vorliegende Bericht untersucht die Mehrkosten für die Installation an LSW und analysiert die Rentabilität von PV-Anlagen in diesem Zusammenhang.

Dank der technologischen Diversifizierung wurde übrigens eine doppelte Nutzung von PV-Anlagen möglich: Sie können zum Beispiel beim Gebäude Dichtheitsfunktionen übernehmen oder Landwirtschaftsflächen schützen. Der Lärmschutz stellt eine weitere Möglichkeit einer doppelten Nutzung dar, sofern die PV-Anlage die akustische Leistung der Wand nicht beeinträchtigt. Falls technisch umsetzbar, ist der Einsatz von bifazialen Modulen, die auf beiden Seiten Strom erzeugen, daher in Anbetracht der Kriterien Leistung, Ästhetik oder Kosten äusserst interessant. Der Marktanteil solcher Module könnte weltweit [6] von 8 % im Jahr 2019 auf 35 % im Jahr 2030 steigen, wobei die Kosten sinken dürften. Dieser Möglichkeit wird im Bericht auf den Grund gegangen.

Einen detaillierteren Überblick über den PV-Markt und über die Auswirkungen auf die PV-Anlagen auf LSW findet sich im Anhang zur Methodik (§ 1).

2.2 Erkenntnisse aus bestehenden Anlagen

Als die Schweiz 1989 in Chur an einer LSW erstmals eine PV-Anlage installierte, war das eine Pionierleistung. Seither sind andere Länder dem Beispiel der Schweiz gefolgt, und heute gibt es mindestens 50 solcher Anlagen weltweit sowie 10 in der Schweiz, entlang von Strassen und Bahnstrecken. Die Anlagen in der Schweiz wurden unter kantonaler Aufsicht, ohne systematische Vorgaben von BAV oder ASTRA, realisiert. Die folgenden Tabellen veranschaulichen die bestehenden Anlagen. Dass es sich dabei um eine ziemlich beschränkte Zahl von Anlagen handelt, zeigt, dass es gewisse Probleme bei der Umsetzung gibt. Darauf wird in diesem Bericht eingegangen.

Land	Erste Anlage	Anzahl (mind.)	Ort	Achse	Leistung (kWp)	Typ	Jahr	
Deutschland	1992	18	Chur	A13	103	MF	1989*	
Schweiz	1989	10	Gordola	Bahn	103	MF	1992	
Niederlande	1995	4	Giebenach	A2	100	MF	1995	
Österreich	1992	3	Zürich (Aubugg)	E41	10	BF	1997	
Vereinigtes Königreich	2006	3	Zürich (Wallisellen)	Bahn	10	MF	1998	
Australien	2007	2	Zürich (Brüttisellen)	A1	10	MF	1999	
Dänemark	1991	2	Safenwil	A1	80	MF	2001	
Frankreich	1999	2	Melide (Lugano)	A2/Bahn	123	MF	2007	
Italien	2006	2	Münsingen	Bahn	13	BF	2008	
Kroatien	2010	1	Zumikon	A52*±	89	MF	2014	
Slowenien	2012	1	* 2017 konnte eine Leistungssteigerung auf 260 kWp vorgenommen werden [7]					
Schweden	2014	1						

Tabelle 2: PV-Anlagen auf LSW weltweit, Stand 2017 [8]

Tabelle 3: PV-Anlagen auf LSW in der Schweiz mit Art der Moduls (monofazial oder bifazial) [9]

Element	Erkenntnisse
Modultyp und -ausrichtung	Die meisten bestehenden Anlagen nutzen monofaziale Module, die nach Süden ausgerichtet (140–220°, wobei Süden 180° entspricht) und horizontal um 30 bis 50° geneigt sind. Die sinkenden Preise für bifaziale Module dürfte diese Tendenz beeinflussen.
Verhalten der Strassenbenutzer	Gemäss einer Studie der englischen Stelle «Highway England», die am Anfang und am Ende einer PV-LSW Kameras aufgestellt hatte, kann kein verändertes Verhalten der Strassenbenutzer/-innen beobachtet werden (Bremsen, Beschleunigen, Spurwechsel).
Blendung	Da die PV-Module mit einer Glasschicht versehen sind, können Personen geblendet werden. Sie haben jedoch kein signifikant höheres Blendpotenzial als Glas-LSW.
Reinigung	Tests zufolge, die im Rahmen des Projekts «Solar Highways» in den Niederlanden durchgeführt wurden und bei denen unterschiedliche Reinigungsverfahren an PV-Testanlagen an LSW eingesetzt wurden, war kein Einfluss auf die Erträge messbar. Die Nähe der Strasse scheint die Leistung also nicht zu beeinträchtigen. Die deutschen Behörden geben weiter an, dass die Mehrkosten für die Reinigung nicht von den möglichen Produktivitätsgewinnen im Zusammenhang mit einer natürlichen Reinigung durch Niederschläge wettgemacht werden.
Eigentum und Zuständigkeiten	Je nach Eigentumsstruktur (öffentliches oder privates Eigentum) gibt es verschiedene Fälle zu beachten. In Münsingen ist die SBB Eigentümerin der LSW, doch die PV-Anlage gehört der Gemeinde, die den erzeugten Strom nutzt. In anderen Fällen besitzt und nutzt eine private Einrichtung die PV-Anlage. Bei den neuen LSW bedingt eine solche Konstellation eine vollständige Trennung der Zuständigkeiten, und zwar ab der Ausschreibung.
Akzeptanz	Bei neuen LSW ist die Akzeptanz grösser, wenn der erzeugte Strom bestimmten öffentlichen Verbrauchern zugutekommt (z. B. Beleuchtung eines Parkhauses). Allgemein wird empfohlen, die Anwohner ab Projektbeginn einzubinden und ästhetische Aspekte einzubeziehen.
Diebstähle	Diebstähle sind zu melden, insbesondere wenn es um Module und Kabel geht (nicht um Wechselrichter). Standardmodule werden häufiger gestohlen, da vollständig in die LSW integrierte Module schwierig zu demontieren sind. Es gilt, einen Kompromiss zwischen der Sicherheit und der einfachen Nutzung zu finden. Die ständig sinkenden Kosten für PV-Module sollten Diebstähle jedoch immer unattraktiver machen.
Vandalismus	Es wurden mehrmals Graffiti festgestellt. Obwohl sich diese auf der Glasoberfläche der PV-Module leicht entfernen lassen, beeinträchtigen sie die Produktion. Graffiti waren insbesondere der Grund für den Rückbau des Systems in Brütisellen in der Nähe von Zürich.
Monitoring	Ein Echtzeitmonitoring der Anlagen ist notwendig, um Defekte und Störungen vorherzusehen, präventive Reparaturen vorzunehmen und optimale Erträge während der gesamten Lebensdauer einer Anlage zu gewährleisten.
Wirtschaftliche Aspekte	Die wichtigsten Faktoren, die sich auf die Rentabilität auswirken, sind die Grösse der PV-Anlage an der LSW, die unterhaltsbezogenen Einschränkungen der Anlage, die Anreizmassnahmen für erneuerbare Energien und die Stromkosten am Standort. Da die heutigen Systeme nicht grossräumig entwickelt wurden, fallen hohe Kosten an. Das Projekt «Solar Highways» in den Niederlanden, bei dem eine bifaziale PV-Anlage auf einer Länge von 400 m in eine neue LSW integriert wurde (250 kW plus 175 kW durch die bifaziale Auslegung), kommt auf einen CAPEX von 4200 Euro/kWp.

Tabelle 4: Angaben zu PV-Installationen auf bestehenden LSW ([8], [9], [10], [11])

Aus den bestehenden Anlagen konnten verschiedene Erkenntnisse gewonnen werden. Die wichtigsten gehen aus der Tabelle 4 hervor.

2.3 Bestehende Studien zum PV-Potenzial an Lärmschutzwänden

Das PV-Potenzial an LSW entlang der Nationalstrassen wurde 2012 vom Büro TNC untersucht [12]. Die Studie unterscheidet ein technisches Potenzial, das messbaren Kriterien entspricht, und ein realisierbares Potenzial, das anhand von allgemeinen Hypothesen zu den Umsetzungswahrscheinlichkeiten berechnet wird, insbesondere unter Berücksichtigung der Akzeptanz von Anlagen wegen ihrer landschaftlichen Einbindung oder der Belastung. Um optimistische und pessimistische Szenarien abzudecken, werden Potenzialspannen verwendet. Das technische Potenzial wird auf 200 bis 230 GWh/Jahr geschätzt und das realisierbare Potenzial auf 100 bis 160 GWh/Jahr.

Die Studie Amstein + Walthert identifiziert für bifaziale Anlagen auf LSW entlang von Bahnstrecken ein technisches Potenzial von 8,2 GWh/Jahr [13]. 2020 wurde im Auftrag der SBB eine grössere Potenzialstudie durchgeführt, die auf ein technisches Potenzial von 17 bis 29 GWh/Jahr kommt, je nach Art der angestrebten Konfiguration (vertikal, geneigt mit einer oder zwei PV-Reihen). Eine kurze Stichprobe von 21 Standorten, an denen Anlagen mit einer Leistung von über 350 kWp möglich wären, hat gezeigt, dass 50 % dieser Standorte nur teilweise oder kaum geeignet sind (Schatten, Nähe zu Gebäuden usw.).

Die vorliegende Studie soll diese technischen Potenziale verfeinern und präzisiert die Kriterien, um unter Einbezug der wirtschaftlichen Aspekte und der jüngsten technologischen Entwicklungen, sowie durch Vorschlägen einer vergleichbaren Methode für Strasse und Schiene, ein nutzbares Potenzial zu erzielen.



Abbildung 1: Anlage an der A96 in Ammersee, Deutschland, auf der Seite der Autobahn [12]



Abbildung 2: Anlage an der A2 in Giebenach, Schweiz, Aussenseite der LSW [12]

3 Beurteilung des Potenzials

3.1 Technische Parameter

Um ein technisch umsetzbares Potenzial von PV-Anlagen auf LSW zu ermitteln, wurde eine Studie zu sämtlichen Parametern durchgeführt, die sich auf die Installationsmöglichkeiten auswirken. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln dieses Kapitels diskutiert. Für die Berechnung des Potenzials für Strasse und Schiene wurden Installationskonfigurationen bestimmt, die diese Einschränkungen nach einem realistischen Szenario berücksichtigen. Sie werden im Folgenden vorgestellt.

Die Konfigurationen entlang der Nationalstrassen variieren je nach Standort:





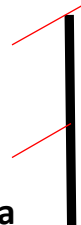

Ort	Strassenseite	Aussenseite	Oberhalb der Wand
Konfiguration	Neigung 60°, quer, monofazial	Neigung 30°, quer oder hoch, monofazial	Vertikal, bifazial
Hauptmerkmale	Horizontale Distanz und beschränkte akustische Reflexion	Besserer Ertrag, Möglichkeit, über die LSW-Oberkante herauszuragen	Relevanter Zusatzertrag
Mindesthöhe der LSW	2,8 m (1 Modul) 3,9 m (2 Module)	1,6 m (1 Modul) 2,9 m (2 Module quer) 3,9 m (Oberes Modul hoch)	2 m
Anordnung	 3a  3b	 5a  9b  9a	 7

Tabelle 5: berücksichtigte Konfigurationen für das Potenzial entlang der Nationalstrassen

Entlang der Bahnstrecken sind nur Konfigurationen auf der Seite, die der Schienenanlage abgewandt ist, möglich (siehe 3.1.2). Die folgenden Konfigurationen maximieren den Ertrag pro Höhenkategorie und weisen eine 30°-Neigung auf.


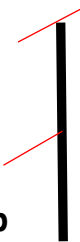

Höhe der LSW	1,5–2,8 m	2,9–3,9 m	>3,9 m
Konfiguration	Oberhalb der LSW, quer	Zwei Module quer	Oberes Modul hoch, unteres Modul quer
Anordnung	 6	 9b	 9a

Tabelle 6: Konfigurationen für das Potenzial entlang der Bahnstrecken

3.1.1 Allgemeine Parameter (Strasse und Schiene)

PV-Konfigurationen und Ertrag

Auf der Basis der Erfahrungen und der durchgeführten Studien wurde eine Reihe von PV-Anlagenkonfigurationen auf LSW geprüft (sie werden in § 2.1 im Anhang vorgestellt).

Um die pro Laufmeter LSW installierte PV-Leistung zu steigern, werden Varianten mit mehreren Modulreihen vorgeschlagen. Bei Konfigurationen mit geneigten Modulen führt dies zu einem Schattenwurf. Es wurden Konfigurationen geprüft, die diesen Schatteneffekt minimieren, indem der in der Schweiz maximal erreichte Winkel der Sonneneinstrahlung berücksichtigt wurde. Das bedingt jedoch, dass das obere Modul über die LSW herausragt (Abbildung 3).

Für jede Höhe wurde nach der Konfiguration gesucht, die eine optimale Energieproduktion ermöglicht. Um eine vorzeitige Leistungsminderung zu verhindern (Vandalismus, Vegetation), wurde eine Mindesthöhe zwischen dem Boden und dem unteren Teil des unteren Moduls von 1,10 m für Strasse und Schiene festgelegt. Bei Anlagen auf der Strassenseite wird diese Distanz aus betrieblichen Gründen auf 1,80 m angehoben (siehe Kapitel Strasse).

Der Ertrag wird anhand der Kombination der Leistung pro Laufmeter mit der Länge und der Ausrichtung der LSW berechnet. Wie aus der untenstehenden Grafik hervorgeht (wo Süden mit 180° angegeben ist), verringert sich die Leistung der monofazialen Module stark, wenn sich ihre Ausrichtung von Süden abweicht und wenn sie stark geneigt sind. Die bifazialen Module haben den besten Ertrag, wenn ihre beiden Seiten eine Ost-West-Ausrichtung aufweisen. Der in der Studie effektiv berücksichtigte Ertrag trägt der mittleren Sonneneinstrahlung des Standortkantons der LSW Rechnung sowie einem mittleren Schattenwurf, der den Ertrag um 5 % verringert. Die Details werden im Anhang zur Methodik (§ 2.2) aufgeführt.

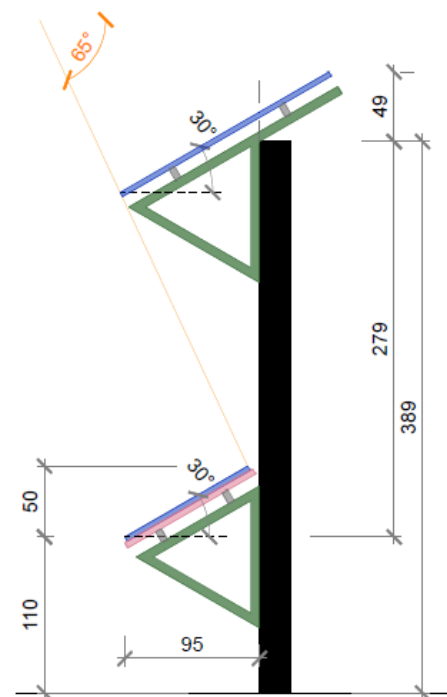


Abbildung 3: Konfiguration mit zwei Modulen mit einer 30°-Neigung mit Überlappung der Oberkante der LSW durch das Modul

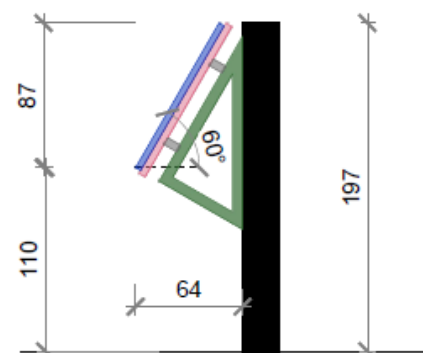


Abbildung 4: Konfiguration quer mit 60°-Neigung

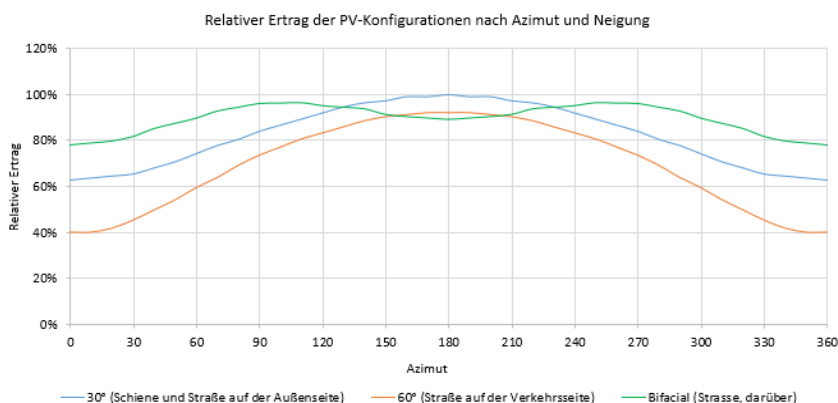


Abbildung 1: relativer Ertrag der PV-Konfigurationen nach Azimut und Neigung

Es sei ausserdem darauf hingewiesen, dass die Verteilung der Produktion im Jahresverlauf bei den Konfigurationen nicht identisch ist. Eine bifaziale Anlage mit Nord-Süd-Ausrichtung hat ein glatteres

Produktionsprofil als eine nach Süden ausgerichtete Anlage mit 30° Neigung. Diese Unterschiede wirken sich insbesondere auf den Ertrag im Winter aus.

Statik

Die Montage von PV-Modulen auf LSW darf deren statische Integrität (Widerstandsfähigkeit der verschiedenen Elemente und insbesondere der Fundamente) nicht gefährden. Je nach Grösse und Zustand der LSW muss eine fallweise Beurteilung durchgeführt werden. Das Anbringen von Modulen dürfte jedoch auf den meisten für LSW verwendeten Materialien möglich sein. Im Allgemeinen gibt es dank dem relativ geringen Gewicht der PV-Module (20 kg) und deren Befestigungssystem keine signifikante Beeinträchtigung der Stabilität. Allerdings kann eine allfällige Erhöhung der LSW durch die Installation von PV-Modulen, die die LSW-Oberkante überragen (siehe Abbildung 3 weiter oben), oder durch die vertikale Installation bifazialer Module oberhalb der LSW einen höheren Winddruck bewirken. Eine Untersuchung bestehender Wände (siehe Anhang zur Methodik, § 2.3) zeigt, dass im Allgemeinen genügend Reserven in der Bemessung vorliegen, um eine Erhöhung der Wand um 50 cm ohne weitere Verstärkung der Struktur vorzunehmen. Allerdings würde die Installation bifazialer Module in der Hälfte der Fälle eine Verstärkung bedingen. Dazu braucht es in der Regel einschränkende und kostspielige Tiefbauarbeiten; diese Anlagen werden vom Potenzial ausgeschlossen.

Landschaft

Lärmschutzwände bilden häufig den Übergang zwischen der (Strassen- und Bahn-) Infrastruktur und bebauten Flächen. Sie stellen also wichtige Elemente für die Integration und die Landschaft dar. Beim Bau von Lärmschutzwänden wird diesem Aspekt besondere Beachtung geschenkt, etwa hinsichtlich optischer Einheit sowie der Übergänge zwischen verschiedenen Arten von Wänden (z. B. bei bestehenden und neuen Wänden), insbesondere in Gebieten, die im Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler aufgeführt sind. Um die optischen Auswirkungen zu begrenzen, wurde zudem eine maximale Höhe für LSW festgelegt. Aus demselben Grund wird hinter den Wänden häufig eine Begrünung in Form einer Hecke angebracht. In einigen Fällen wird die Sicht auf die Landschaft für die Anwohnerinnen und Anwohner oder die Helligkeit bewahrt, indem durchsichtige Wände eingesetzt werden. In den meisten Fällen wird die Installation von PV-Modulen die Integration der Lärmschutzwand beeinträchtigen. Die Auswirkungen der Photovoltaikanlagen auf das Landschaftsbild sind daher im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens detailliert zu prüfen, insbesondere im Bereich von Objekten, die im Bundesinventar der Landschaften, Ortsbilder und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung aufgeführt sind.

Artenvielfalt

An der Aussenseite von Lärmschutzwänden werden oft Hecken oder Gehölze gepflanzt, damit sie sich in die Landschaft einfügen. Diese Biotope spielen eine wichtige Rolle im Naturhaushalt und sind deshalb als schützenswert im Sinne von Artikel 18 Absatz 1bis des Bundesgesetzes vom 1. Juli 1966 über den Natur- und Heimatschutz (NHG; SR 451) anerkannt. Es ist daher rechtlich nicht möglich, sie für den Bau einer PV-Anlage zu zerstören.

3.1.2 Spezifische Parameter für die Schiene

Die vorliegende Studie beschränkt sich auf die LSW, die sich im Eigentum der SBB befinden und die 90 % sämtlicher LSW in der Schweiz ausmachen. Die restlichen LSW gehören regionalen Transportunternehmen. Die 4084 LSW der SBB weisen eine Länge von 412 Laufkilometern auf mit einer Medianlänge von 60 m. 80 % weisen eine Höhe von 1,5 bis 3,5 m auf. Sie bestehen mehrheitlich aus Beton (62 %), Holz (15 %) oder Metall (15 %).

Bei den Anlagen entlang der Bahnstrecken wird wegen der technischen, betrieblichen und sicherheitstechnischen Einschränkungen bei der Installation und beim Betrieb von PV-Modulen nur die schienenabgewandte Seite berücksichtigt. Ein Schlüsselement ist das Vorhandensein von Fahrleitungen für das Bahnstromnetz (16,7 Hz), bei denen eine Annäherung bis maximal 2,25 m horizontaler Distanz möglich ist. Bifaziale Anlagen an der Wand werden daher ebenfalls nicht in Betracht gezogen. Um die Stärke der Befestigungen zu gewährleisten, wurde zudem festgelegt, dass die

Anlagen nur auf LSW möglich sind, deren Lärmschutzelemente auf Stahlstützen angebracht sind. Diese Stahlstützen machen 80 % der Stützen aus (die restlichen bestehen aus Holz, Beton oder Kunststoff).

3.1.3 Spezifische Parameter für die Strasse

Die Studie befasst sich ausschliesslich mit den LSW entlang der Nationalstrassen. Es gibt einzelne LSW entlang von Kantonsstrassen. 2151 Lärmschutzbauten befinden sich entlang von Nationalstrassen, davon sind 90 % Wände und 10 % Dämme. Diese Anlagen haben eine Länge von insgesamt 533 km bei einer Medianlänge von 187 m. 80 % weisen eine Höhe über Boden von 1,5 bis 4,5 m auf. Über 70 % der Wände haben lärmabsorbierende Eigenschaften (typischerweise Wände mit Lavabeton, perforiertem Alu/Blech). Die anderen sind reflektierend (z. B. Plexiglaswände). Anlagen entlang der Nationalstrassen werden als umsetzbar eingestuft sowohl auf der Strassenseite, als auch auf der Aussenseite, sowie für bifaziale PV oberhalb der LSW. In diesem Kapitel werden die relevanten analysierten Kriterien vorgestellt, die teilweise den Strassenverkehr betreffen.

Art der betrachteten Wände

Das Fachhandbuch Trasse/Umwelt des ASTRA [14] unterscheidet verschiedene Lärmschutzarten. Die Studie befasst sich nur mit den Lärmschutzwänden. So werden insbesondere die Lärmschutzdämme ausgeschlossen (diese Grünflächen werden als Böschungen betrachtet). Einige begrünte LSW werden wegen offensichtlicher Komplikationen bei Installation und Instandhaltung einer PV-Anlage ebenfalls ausgeschlossen.

Akustik

Die Installation von PV-Modulen auf einer Lärmschutzwand darf die Akustik im betreffenden Abschnitt nicht beeinträchtigen. Insbesondere die Auswirkungen auf der Seite, die der Fahrbahn gegenüberliegt (von der Wand nicht geschützter Bereich) sind zu berücksichtigen. Im Allgemeinen wird eine absorbierende Lärmschutzwand errichtet, wenn die Auswirkungen der Schallreflexion auf der gegenüberliegenden Seite minimiert werden müssen. Ein PV-Modul ist mit einer Glasschicht versehen und reflektiert Schallwellen. Werden PV-Module auf einer absorbierenden Lärmschutzwand installiert, kann dies für die Anwohner auf der gegenüberliegenden Seite zu mehr Lärm führen. Nur Konfigurationen, die die Lärmemissionen nicht spürbar erhöhen, sind in diesem Fall zulässig. Es sei zudem darauf hingewiesen, dass eine Steigerung der Lärmemissionen um über 1 dB(A) für das ASTRA rechtliche Folgen haben könnte (wesentliche Änderung einer ortsfesten Anlage, Art. 8 Lärmschutz-Verordnung vom 15. Dezember 1986 [LSV; SR 814.41]).

Um die Konfigurationen auszuwählen, die die Akustik im betroffenen Bereich nicht beeinträchtigen, wurde eine akustische Simulation durchgeführt (siehe Anhang § 2.4). Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass die Konfigurationen mit einer Neigung von 60° auf der Strassenseite den Lärm in den Himmel reflektieren und daher keine negativen Auswirkungen haben. Auf der Strassenseite kommen bei der Potenzialschätzung daher diese Konfigurationen zum Zug. Nach einer detaillierten Analyse könnten in günstigen Fällen vorteilhaftere Konfigurationen in Betracht gezogen werden (insbesondere unter Einbezug der geografischen Situation), jedoch mit den folgenden Vorbehalten: Konfigurationen, die die LSW überragen, können zu einem Beugungseffekt in die Richtung der Aussenseite der Wand führen. Vertikale Konfigurationen bewirken Schallreflexionen zur gegenüberliegenden Seite der Fahrbahn. Für bifaziale Konfigurationen, die oberhalb der LSW angebracht werden, braucht es eine Detailanalyse, je nachdem ob eine andere Lärmquelle hinter der LSW vorhanden ist (andere Strasse, Bahnlinie, Industrie usw.). Für die Berechnung des nutzbaren Potenzials wurde diese Einschränkung berücksichtigt.

Horizontaler Sicherheitsabstand

Es ist ein horizontaler Abstand zwischen dem Rand der PV-Anlage, die der Strasse am nächsten ist, und der Sicherheitseinrichtung vorzusehen (z. B. Leitplanke), um die Nutzung des Standstreifens insbesondere durch hohe Fahrzeuge nicht zu behindern, aber auch um Fahrzeuge bei einem Aufprall zu schützen. Es ist sicherzustellen, dass sich Fahrzeugsrückhaltesysteme bei einem Aufprall deformieren können, um die kinetische Energie eines verunfallten Fahrzeugs zu absorbieren (siehe Details im

Anhang zur Methodik, § 2.5). Ein Zusammenstoss mit der Trägerstruktur oder mit den Modulen stellt für den Fahrzeuglenker ein Risiko dar, auch wenn die Module eine Abdeckung aus Einscheiben-Sicherheitsglas haben, die beim Bruch in kleine Stücke zerfällt. Eine PV-Anlage ist daher nur realisierbar, wenn zwischen dem Sicherheitssystem für Fahrzeuge (Leitplanke) und dem Träger des Photovoltaikmoduls ein Mindestabstand von 1 bis 1,5 m vorhanden ist. Wegen der besonderen Einschränkungen für Kunstbauten sind nur Anlagen denkbar, die keine Bodenfläche beanspruchen, d. h. bifaziale Module oben auf einer LSW.

Blendung

Die PV-Module reflektieren das Licht und könnten daher ein Blendrisiko für die Fahrzeuglenker darstellen. Der Reflexionskoeffizient der momentan auf dem Markt erhältlichen PV-Module ist jedoch schwach: Er variiert zwischen 5,5 % (mit Antireflexionsfilm) und 8,5 % (ohne Antireflexionsfilm); die Blendung ist weniger stark als bei einem Standardglas, weil das Modul die Reflexion streut. Eine Studie der niederländischen Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung (TNO), die im Bahnbereich durchgeführt wurde, erwähnt, dass eine zusätzliche Reflexion nicht unbedingt eine Störung zur Reflexion des Sonnenlichts darstellt [15]. Daher wird die Blendung im Rahmen der vorliegenden Studie nicht als potenzialmindernder Faktor angesehen.

Betrieb

Der Unterhalt der Grünflächen am Fusse der LSW (auf beiden Seiten) erfordert einen Mindestabstand von 1 m zwischen der Unterkante des PV-Moduls und dem Boden. Auf der Strassenseite werden durch den Winterunterhalt Schneehaufen von bis zu 2 m Höhe geschaffen, damit sie über die Sicherheitsleitplanke hinweg geschoben werden können. Unter Berücksichtigung dieses Parameters verfügen die Konfigurationen, die bei der Potenzialschätzung auf der Strassenseite verwendet werden, über einen Mindestabstand von 1,8 m unterhalb des PV-Moduls, was eine Mindesthöhe der LSW von 2,8 m bedingt.

3.2 Wirtschaftliche Parameter

Die Investitionskosten hängen stark von der Grösse der jeweiligen PV-Anlage ab. Die Grundkosten wurden anhand der Leistungsbereiche festgelegt, die in der Photovoltaikmarkt-Beobachtungsstudie 2019 verwendet wurden. Für jeden Leistungsbereich wurden drei Arten von Investitionskosten für die PV-Anlagen an LSW unterschieden: variable Kosten, die proportional zur Anlagengrösse sind, Fixkosten im Zusammenhang mit den Spezifitäten der PV-Anlagen an LSW und Kosten für die Verbindung zwischen der Anlage und einem Anschlusspunkt. Die Stromgestehungskosten werden anschliessend auf dieser Basis berechnet. Die Details zu den berücksichtigten Kosten finden sich im Anhang (§ 3).

Variable Kosten

Um die Kosten für PV-Anlagen an bestehenden LSW zu schätzen, wurden die aktuellen Kosten für PV-Anlagen auf Gebäudedächern als Grundlage verwendet, und je nach Ausführung der LSW-Anlagen wurde ein Multiplikator angewandt. Dieser Ansatz wird für alle Kosten verwendet, ausser für diejenigen bezüglich der Baustellsicherheit, für die eine andere Basis verwendet wird, insbesondere für die Kosten im Zusammenhang mit der Verwendung einer Hebebühne. Die variablen Kosten betragen somit zwischen CHF 1940/kWp für kleine Anlagen und CHF 1283/kWp für Anlagen mit über 300 kWp. Die Kosten für bereits realisierte PV-Anlagen auf LSW wurden nicht berücksichtigt, da sich der Markt rasch weiterentwickelt hat und die Stichprobe nicht repräsentativ wäre. Die vom BFE für angebaute Anlagen gewährte Einmalvergütung (Anwendungsdaten seit dem 1. April 2021) wird von diesen ebenfalls grössenabhängigen variablen Kosten abgezogen.

Kostenart	Faktor	Erläuterung
Module	1	Einsatz von Standardmodulen ohne Mehrkosten ausser für bifaziale Module, für die ein Faktor 1,2 angewandt wird
Wechselrichter	1,2	Komplexere Installation wegen der Platzierung innerhalb der LSW

Kostenart	Faktor	Erläuterung
Struktur	1,2/2	Monofazial (1,2): robustere und teurere Schienen, Verwendung angepasster Befestigungssysteme. Bifazial (2): angepasste Struktur.
Arbeitskräfte	1,5	Langsamere Arbeitsfortschritt als bei einer Anlage auf Gebäudedächer wegen der Durchführung, die teurer ist, da sie nachts zu erfolgen hat für Anlagen auf der Strassenseite oder auf der Schiene, oder länger dauert, weil die Elemente entlang der LSW befördert werden müssen, wenn Anlagen auf der Aussenseite montiert werden und kein Zugangsweg existiert.
Elektrik	1,3	Längere Verkabelung innerhalb der Anlage
Logistik	3	Mehrkosten für die Berücksichtigung grosser logistischer Anforderungen im Vergleich zu einer Anlage auf Gebäudedächer, bei der das Material einmalig auf das Dach befördert wird: Manchmal muss das Material jeden Arbeitstag zur Baustelle mitgenommen werden.

Tabelle 7: Begründung der verwendeten Kostenfaktoren

Spezifische Fixkosten

Es wird davon ausgegangen, dass jede PV-Anlage an einer LSW Mehrkosten von CHF 30 000/Anlage generiert. Diese Kosten resultieren aus den Bewilligungsverfahren und der Behandlung von Einsprachen sowie aus spezifischen Studien im Zusammenhang mit der Art der Anlage an der LSW, insbesondere hinsichtlich Akustik und Statik. Im Rahmen eines grossangelegten Installationsprogramms werden diese Kosten, die anfangs wahrscheinlich höher sein werden, mit der gewonnenen Erfahrung wohl sinken. Es handelt sich hier also um einen durchschnittlichen Schätzwert. Für Anlagen, die auf der Verkehrsseite Bodenfläche beanspruchen, werden die Mehrkosten infolge Nachtarbeit und Sicherheit bei der Installation auf CHF 15 000 bis CHF 35 000 für den Strassenbereich und auf CHF 20 000 bis CHF 40 000 im Bahnbereich geschätzt, je nach Grösse der Anlage.

Anschlusskosten und Energienutzung

Im Vergleich zu Anlagen auf Gebäudedächern verursachen die PV-Anlagen an LSW Mehrkosten für den Stromanschluss, die anhand der Distanz zum Anschlusspunkt für jede LSW sowie anhand der Kosten pro Laufmeter berechnet werden, die von der Leistung der Anlage abhängen. Die Investition variiert zwischen CHF 100/m für Kleinanlagen und CHF 535/m für Anlagen mit über 300 kWp.

Die Wahl des Anschlusspunkts hängt von der Nutzung der Energie ab. Je nachdem kann die Energie vom ASTRA in einem nahegelegenen Tunnel verbraucht und der Überschuss in das öffentliche Netz eingespeist werden, der anschliessend in einer Bilanzgruppe verbucht wird. Die SBB kann die Produktion für ihr 16,7-Hz-Bahnstromnetz oder für ein Gebäude in ihrem Besitz verwenden, der Überschuss wird an ein lokales Stromunternehmen weiterverkauft. Hinsichtlich der Einspeisung in das Bahnstromnetz der SBB mit 16,7 Hz sei angemerkt, dass es keinen Standardwechselrichter für die Umwandlung des Gleichstroms aus der PV-Anlage für einen solchen Gebrauch gibt. Es wurden für einen solchen Anschluss im Rahmen eines Projekts der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) [16] jedoch technische Möglichkeiten entwickelt, die für die SBB ebenfalls eingesetzt werden könnten. Wenn die SBB oder das ASTRA die Energie nicht verwerten können, bestünde die Möglichkeit, dass sie die LSW einem externen Investor zur Verfügung stellen, der die PV-Anlage auf eigene Rechnung installiert und die Energie für den Eigengebrauch nutzt oder in das öffentliche Netz einspeist. In diesem Fall wäre der Anschlusspunkt die nächstgelegene Wohnzone.

Stromgestehungskosten

Um die Kosten der von den PV-Anlagen an LSW erzeugten Energie mit anderen Energien zu vergleichen, wurden die Stromgestehungskosten «LCOE» (vom Englischen «Levelised Cost of

Electricity») für eine Lebensdauer von 25 Jahren und unter Berücksichtigung der Kostenverteilung im zeitlichen Verlauf und mit einem Diskontsatz zwischen 2 % und 3 % berechnet.

3.3 Potenzialschätzung Strassen

3.3.1 Technisch-wirtschaftliches Potenzial

Das **technische** Potenzial wird unter Einbezug der ausgewählten Anlagen an sämtlichen LSW, die den Mindesthöhen entsprechen, ausschliesslich der Lärmschutzdämme, berechnet. Details zur Berechnungsmethode finden sich im Anhang, § 4.1 und 4.2.

		Kapazität MWp	Energie GWh	Ertrag kWh/kWp	CAPEX CHF/kWp	Anz. Anlagen
Technisches Potenzial	Strasse	107	77	718	1863	1014
	Aussen	185	167	900	1629	1541
	Bifazial	79	79	992	2218	1296
	Gesamt	371	322	867	1822	3851
Technisch-wirtschaftliches Potenzial	Strasse	59	49	822	1550	333
	Aussen	146	132	903	1420	761
	Bifazial	26	26	997	1800	238
	Gesamt	232	207	893	1496	1332

Tabelle 8: technisches und technisch-wirtschaftliches Potenzial von PV-Anlagen an LSW entlang der Nationalstrassen

Für das technisch-wirtschaftliche Potenzial werden nur die LSW verwendet, deren Ausrichtung eine minimale Leistung von 60 % des theoretischen Maximums bei einer vollständigen Südausrichtung gewährleistet, die eine minimale Leistung von 50 kWp aufweisen und höchstens 200 m von einem Anschlusspunkt entfernt sind. Die Anlagen mit Stromgestehungskosten über 20 Rp./kWh wurden ebenfalls ausgeschlossen. Das so berechnete technisch-wirtschaftliche Potenzial entspricht einer Leistung von 232 MWp und einer jährlichen Energieproduktion von 207 GWh.

3.3.2 Nutzbares Potenzial

Anhand des technisch-wirtschaftlichen Potenzials wird unter Berücksichtigung der während des Expertenworkshops ermittelten Anforderungen ein nutzbares Potenzial errechnet. Die Daten wurden anhand einer Stichprobe und einer virtuellen visuellen Inspektion von insgesamt 20 % der Lärmschutzwände erhoben. Die Ergebnisse: Eine Photovoltaikanlage wäre in 20 % der Fälle auf der Strassenseite, bei 30 % auf der Aussenseite und bei 20 % in bifazialer Ausführung realisierbar. Die folgende Tabelle veranschaulicht die grössten festgestellten Hindernisse und deren Vorkommen bei allen analysierten Fällen (sie schliessen sich nicht gegenseitig aus).

Grund	Bemerkung	Strasse	Aussenseite	Bifazial
Schattenwurf	Gebäude/Bäume	29 %	55 %	21 %
Sicherheit	Kein Standstreifen / Keine Leitplanke	63 %	-	-
Art der LSW	Begrünte oder mit Steinen bedeckte LSW	6 %	8 %	-
Schwer zugänglich	Installation unmöglich	-	32 %	-
Visuelle Akzeptanz	Die Erhöhung verdeckt das Blickfeld	-	-	17 %
Akustik	Reflexion auf die gegenüberliegenden Wohnungen	-	-	41 %
Andere		6 %	3 %	0 %
Resultat	Anlage ist auf dieser Wand nicht realisierbar	80 %	70 %	80 %

Tabelle 9: Gründe, weshalb eine PV-Anlage an einer Stichprobe von LSW entlang der Nationalstrassen nicht umgesetzt werden kann. An einer Wand können mehrere Hindernisse vorliegen.

Die Details zur Stichprobe gehen aus § 4.3 des Anhangs hervor. Die Umsetzungswahrscheinlichkeiten aus der Stichprobe werden auf das technisch-wirtschaftliche Potenzial angewandt. Daraus ergibt sich das folgende nutzbare Potenzial. Das nutzbare PV-Potenzial an LSW entlang der Nationalstrassen wird auf 61 MWp / 55GWh jährlicher Energie geschätzt, was 342 Anlagen mit einer gesamten Wandlänge von 261 km entspricht.

	Wahrscheinlichkeit		Spitzenleistung MWp	Energie GWh	spezifischer Ertrag kWh/kWp	CAPEX CHF/kWp	Anz. Anlagen
Nutzbares Potenzial	20 %	Strasse Aussen	12	10	822	1550	67
	30 %	seite	44	40	903	1420	228
	20 %	Bifazial	5	5	997	1800	48
		Total	61	55	896	1478	342

Tabelle 10: nutzbares Potenzial von PV-Anlagen an LSW entlang der Nationalstrassen

Abbildung 6 schlüsselt dieses nutzbare Potenzial je nach Energiekosten auf. Anhand der Farben lassen sich die Anlagentypen unterscheiden (Strassenseite, Aussenseite und bifazial auf der LSW). Unter Einbezug der Anforderungen der Strassenseite, die eine 60°-Neigung der Module erfordern, wird dort weniger Energie erzeugt als auf der Aussenseite, die den grössten Beitrag zum Potenzial leistet.

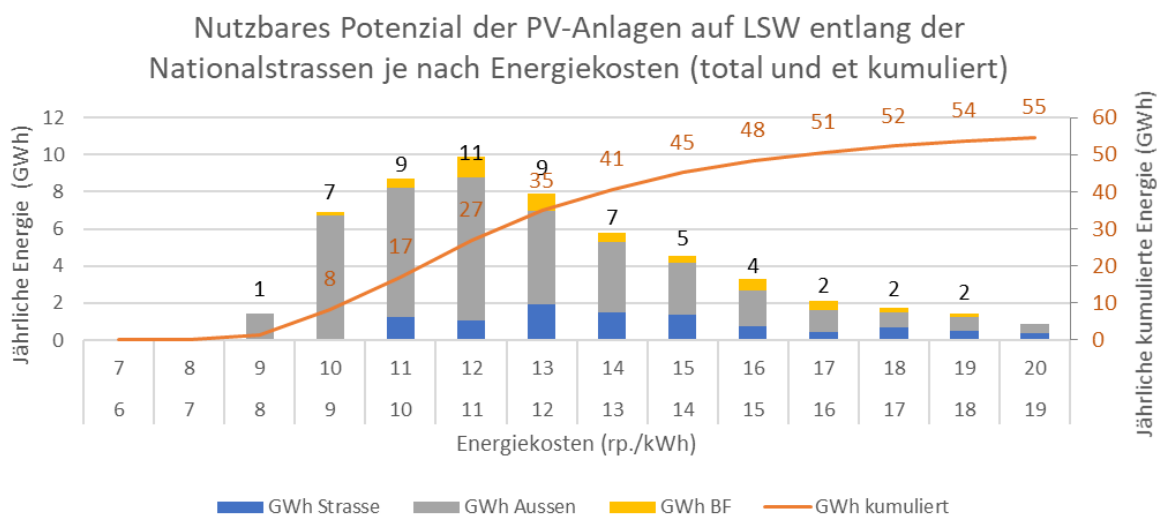


Abbildung 6: Nutzbares Potenzial der PV-Anlagen auf LSW entlang der Nationalstrassen je nach Energiekosten

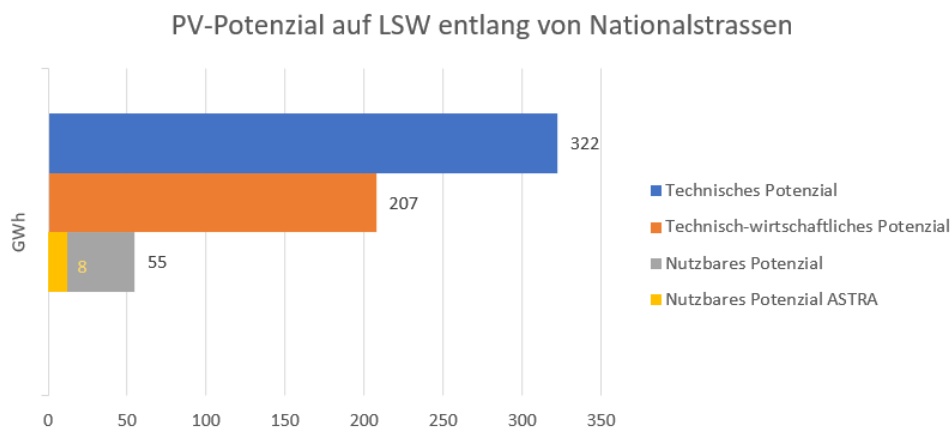


Abbildung 2: technisches, technisch-wirtschaftliches und nutzbares Potenzial von PV-Anlagen entlang der Nationalstrassen. Das nutzbare Potenzial des ASTRA entspricht hier dem Anteil des nutzbaren Potenzials, weniger als 500 m von einem ASTRA-Tunnel entfernt, ohne zusätzlichen Filter in Bezug auf die LCOE.

Ein Teil dieses Potenzials kann vom ASTRA für den Eigenverbrauch in Tunneln genutzt werden. Wenn nur die Anlagen berücksichtigt werden, die sich weniger als 500 m von einem Tunnel entfernt befinden, beträgt das nutzbare Potenzial für den Eigenverbrauch des ASTRA 8,9 MWp oder 8 GWh jährlicher Energie. Von diesen 8 GWh könnten 4,5 GWh zu LCOE unter 15 Rp./kWh gebaut werden. Abbildung 7 vergleicht die verschiedenen genannten Potenziale.

3.4 Potenzialschätzung Schiene

3.4.1 Technisch-wirtschaftliches Potenzial

Viele der 4084 LSW aus der SBB-Datenbank befinden sich effektiv nahe beieinander. Da die Fixkosten und die Anschlusskosten pro Installation beträchtlich sind, wurden die LSW, die höchstens 10 m auseinanderliegen, zu einer LSW zusammengefasst. Die methodischen Details finden sich im Anhang (Kap. 5). Das **technische** Potenzial wird für Wände mit einer Mindesthöhe von 1,5 m und mit Stahlstützen beurteilt.

Das **technisch-wirtschaftliche** Potenzial wird berechnet, indem nur die Anlagen berücksichtigt werden, die sich höchstens 200 m von einem Anschlusspunkt befinden, die eine minimale Leistung von 50 kWp haben und die Energie mit Stromgestehungskosten unter 20 Rp./kWh erzeugen. Diese Kosten stellen eine Schwelle für die beim Potenzial einbezogenen Anlagen dar, jedoch kein Kriterium für den Investitionsentscheid der SBB. Wie in den untenstehenden Parametern angegeben, werden die wichtigsten Anlagen für den Eigenverbrauch der SBB berücksichtigt (Bahnstrom 16,7 Hz oder Verbrauch in den Gebäuden), wenn sie sich nicht zu weit von den Anschlusspunkten entfernt befinden. Die anderen Anlagen können für Drittinvestoren in Betracht gezogen werden.

Parameter	SBB 16,7 Hz	SBB 50 Hz	Investor
Minimale Leistung	300 kWp	200 kWp	50 kWp
Maximale Distanz zum Anschlusspunkt	500 m	300 m	200 m

Tabelle 11: Parameter für die Berechnung des technisch-wirtschaftlichen Potenzials Schiene

Das technische Potenzial wird auf 128 MWp/116 GWh für 1397 LSW geschätzt und das technisch-wirtschaftliche Potenzial auf 101 MWp/93 GWh für 582 LSW, die in unterschiedliche Nutzungsarten aufgeteilt werden. Das Potenzial für den Bahnstrom ist aus wirtschaftlicher Sicht am interessantesten, da es die Installationen mit der grössten Leistung enthält.

	Spitzenleistung MWp	Energie GWh	spezifischer Ertrag kWh/kWp	CAPEX CHF/kWp	Anz. Anlagen
Technisches Potenzial	128	116	907	3515	1397
Technisch-wirtschaftliches Potenzial	101	93	922	1749	582
16 Hz SBB	15	13	875	1375	35
50 Hz SBB	29	26	913	1953	109
50 Hz Investor	57	53	939	1745	438

Tabelle 22: technisches und technisch-wirtschaftliches Potenzial Schiene

3.4.2 Nutzbares Potenzial

Die Berechnung des nutzbaren Potenzials entlang der Bahnstrecken basiert auf der Stichprobe der Anlagen entlang der Strassen, da für den Bahnbereich vergleichbare Bildgebungsverfahren fehlen. Der Vergleich erfolgt mit den Anlagen auf der strassenabgewandten Seite, da bei den Schienenanlagen nur die Konfigurationen auf der abgewandten LSW-Seite denkbar sind. Ein wichtiger Unterschied besteht darin, dass wegen der vorhandenen Oberleitungen weniger Bäume entlang des Trassees stehen. Der

Schattenwurf von Bäumen stellt bei den Anlagen auf der Aussenseite von LSW an den Strassen die grösste Einschränkung dar.

	Spitzenleistung MWp	Energie GWh	spezifischer Ertrag kWh/kWp	CAPEX CHF/kWp	Anz. Anlagen Gesamt
Nutzbares Potenzial	50	46	922	1743	291
16 Hz SBB	8	7	875	1375	18
50 Hz SBB	14	13	913	1953	55
50 Hz Investor	28	27	939	1745	219

Tabelle 3: nutzbares Potenzial der PV-Anlagen auf LSW für den Schienenbereich

Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung der wichtigsten Hindernisse bei der Integration in die Landschaft wird geschätzt, dass 50 % der Anlagen realisierbar wären. Dieser Faktor wird daher auf das technisch-wirtschaftliche Potenzial angewandt, um das nutzbare Potenzial gemäss untenstehender Tabelle zu berechnen.

Das nutzbare Potenzial beträgt insgesamt 50 MWp Spitzenleistung und 46 GWh jährlicher Energieertrag mit Installationskosten, die je nach vorgesehener Nutzung des erzeugten Stroms variieren. Abbildung 8 zeigt das gesamte und kumulierte nutzbare Potenzial für die LSW entlang der Bahnstrecken.

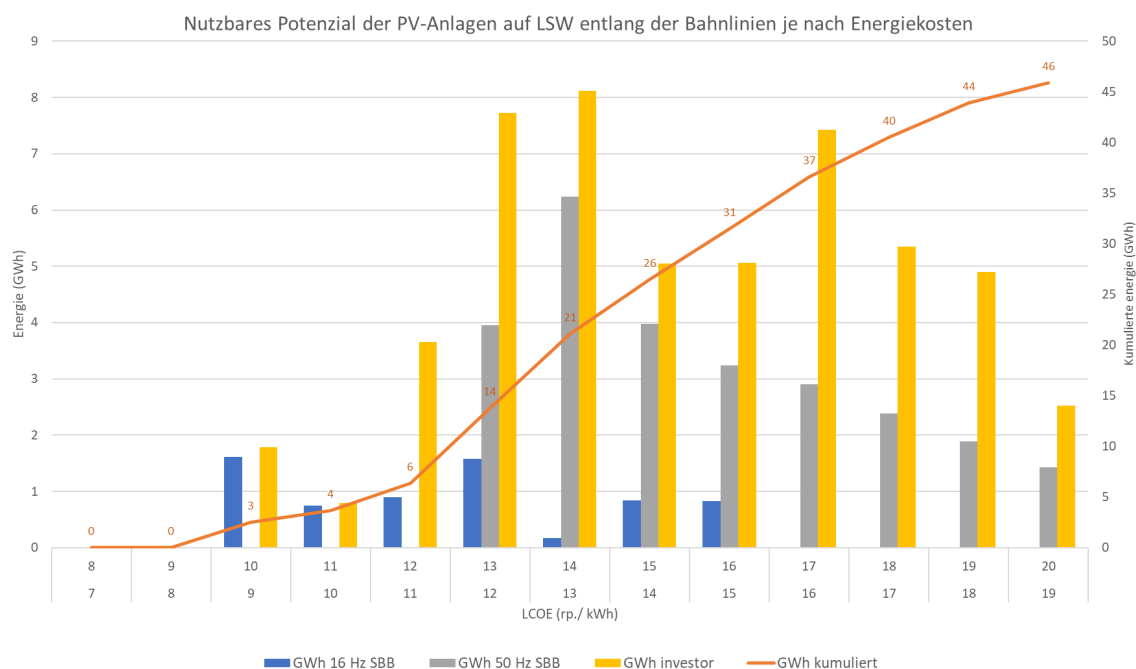


Abbildung 8: nutzbares Potenzial der PV-Anlagen auf LSW entlang der Bahnstrecken je nach Energiekosten

Der Anteil dieses Potenzials, der von der SBB für Bahnstrom oder für die Versorgung von Gebäuden genutzt werden könnte, wird auf 20 GWh geschätzt. Die verschiedenen Potenziale werden in der folgenden Grafik veranschaulicht.

PV-Potenzial auf LSW entlang der Bahnschienen

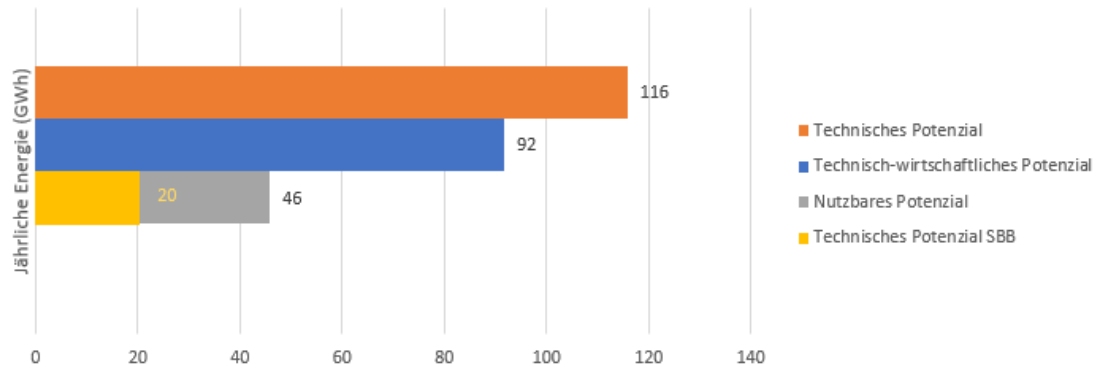


Abbildung 9: technisches, technisch-wirtschaftliches und nutzbares Potenzial von PV-Anlagen entlang der Bahnstrecken.

4 Nutzung des Potenzials

4.1 Bedeutung und Wettbewerbsfähigkeit des PV-Potenzials an Lärmschutzwänden

In diesem Kapitel wird das PV-Potenzial an LSW mit dem nationalen PV-Potenzial und den anderen Möglichkeiten für PV-Anlagen für ASTRA und BAV verglichen.

4.1.1 PV-Potenzial auf nationaler Ebene

Das nutzbare Potenzial der Lärmschutzwände entlang von Nationalstrassen und Bahnstrecken beträgt 0,1 TWh/Jahr, d. h. es entspricht 0,2 % des Schweizerischen Stromverbrauchs. Es deckt 0,3 % des in den Energieperspektiven festgelegten Ziels ab. Im Vergleich zum in der Schweiz nutzbaren Potenzial auf Dächern und Fassaden von 67 TWh/Jahr [2] ist das nutzbare Potenzial der LSW gering. Es ist schwierig, die Potenziale zahlenmässig direkt zu vergleichen, da jede Studie unterschiedliche Parameter und unterschiedliche Anforderungen berücksichtigt und auch die Genauigkeit der verfügbaren Daten variiert. Die Wahl der Methoden hat einen grossen Einfluss auf die Grösse des erhaltenen Potenzials. Die vorliegende Studie berücksichtigt insbesondere die nutzungsbezogenen Parameter und geht daher weiter als andere grösser angelegte Studien.

Das nutzbare Potenzial der LSW hat eine deutlich geringere wirtschaftliche Rentabilität als eine optimierte grosse PV-Anlage auf einem Gebäudedach, deren Stromgestehungskosten 5 bis 6 Rp./kWh (mit Einmalvergütung) betragen können. Das ist – abgesehen von den technischen und logistischen Anforderungen – auf die Distanz zum Netzanschlusspunkt zurückzuführen (der bei LSW im Durchschnitt zwischen 50 und 130 m entfernt ist). Mittelfristig könnten jedoch die am besten geeigneten LSW im Vergleich zu bestimmten Anlagen auf Gebäuden interessant werden, die eine geringere Rentabilität aufweisen (geringe Grösse, geringer Eigenverbrauch, bauliche Anpassungen erforderlich). Die LSW mit einem LCOE unter 10 Rp. verfügen beispielsweise über ein Potenzial von 10 GWh im Strassen- und von 2 GWh im Bahnbereich. Die Wettbewerbsfähigkeit hängt jedoch von der Möglichkeit, die erzeugte Energie lokal zu nutzen, und vom geltenden Subventionsregime ab. Die Kosten der PV-Anlagen können durch Skaleneffekte sinken, insbesondere durch die Konzeption von Standardkonfigurationen, die als Grundlage für die Projektentwicklung dienen.

4.1.2 Vom ASTRA nutzbares Potenzial

Die folgende Tabelle stellt das für die ASTRA-Anlagen ohne LSW geschätzte PV-Potenzial mit einem LCOE unter 13 Rp./kWh vor. Es beträgt 36 GWh/Jahr. Die Dächer der Werkhöfe bieten das höchste Potenzial und werden in den meisten Fällen mit einem Leistungsbereich von 6 bis 828 kWp als geeignet erachtet. Das Potenzial an LSW in Tunnelnähe unter 15 Rp./kWh wird in dieser Studie auf 4,8 MWp geschätzt, mit 4,5 GWh Jahresproduktion, unter Einbezug der Umsetzungswahrscheinlichkeiten. Das entspricht 11 % des Gesamtpotenzials ohne LSW, das für diese Kosten als umsetzbar identifiziert wurde.

PV-Potenzial ASTRA (GWh)	
Werkhöfe	24
Galerien in Tunnelnähe	6
Galerien	3
Tunnelportale	2
Tunnelkraftwerke	0,6
Andere Kraftwerke	0,2
Gesamt	36

Tabelle 4: PV-Potenzial an ASTRA-Anlagen ohne LSW

4.1.3 Von der SBB nutzbares Potenzial

Für die SBB wird das technisch-wirtschaftliche Potenzial auf Anlagen ohne LSW auf 450 MWp unter 20 Rp./kWh und auf 258 MWp unter 10 Rp./kWh geschätzt.

Im Rahmen der Initiative «Vorbild Energie und Klima» (VBE) hat sich die SBB verpflichtet, neue erneuerbare Energien zu fördern. Bis 2030 müssen 30 GWh der jährlichen Stromproduktion aus diesen Energiequellen stammen (hauptsächlich aus Photovoltaik). Im Rahmen dieser Verpflichtung prüft die SBB die Eignung aller neuen Gebäude für die Installation einer Photovoltaikanlage. Momentan beurteilt die SBB das Photovoltaikpotenzial der bestehenden Gebäude und Anlagen (Tabelle 15). Zudem prüft die SBB die Möglichkeit, Photovoltaiksysteme auf den freien Flächen zu installieren, die ihr gehören. Mit einem geschätzten Potenzial von 430 MWp und Produktionskosten von rund 10 Rp./kWh bieten sie mit Abstand das grösste Potenzial. Im Vergleich dazu beträgt das technisch-wirtschaftliche Potenzial (LCOE < 20 Rp./kWh) an den LSW der SBB 101 MWp und 93 GWh/Jahr, was vergleichbar mit dem Potenzial auf den Dächern von Bahnsteigen ist. Der Eigenverbrauchsanteil in der Nähe von Transformatoranlagen oder Gebäuden beträgt 44 MWp/39 GhW.

PV-Potenzial von SBB-Anlagen (MWp) je nach Energiekosten		
LCOE	<10 Rp.	<20 Rp.
Immobilien	204	341
Dächer von Bahnsteigen	47	100
Kraftwerke	6	8
Bahntechnik	1	2
Gesamt	258	451

Tabelle 5: PV-Potenzial an SBB Anlagen ohne LSW. Quelle: SBB-Daten.

Als Systemführerin für die Versorgung mit Bahnstrom obliegt es der SBB, die Bahnstromversorgung (16,7 Hz) für das Normalspur- und das Meterspurnetz sicherzustellen. Dazu wird der von SBB Energie gelieferte Strom den anderen Infrastrukturbetreibern zum Fixpreis bereitgestellt. Es handelt sich also nicht um einen freien Markt. Der Strompreis soll die Produktionskosten des von SBB Energie vermarkteten Stroms decken und eine gesunde Finanzierung der geplanten Investitionen gewährleisten. Der Strompreis wird im Rahmen der Revision der Trasseepreise alle vier Jahre vom BAV geprüft. Momentan beträgt der Strompreis im Durchschnitt 11,5 Rp./kWh. Das nutzbare Potenzial zu diesem Preis an den LSW wird auf 3 GWh/Jahr geschätzt.

In der heutigen rechtlichen Situation ist die Finanzierung der Photovoltaiksysteme durch den Bahninfrastrukturfonds (BIF) nur möglich, wenn das System zur Erzeugung von Industrie- und/oder Haushaltsstrom (50 Hz) für den Eigenverbrauch genutzt wird. In diesem Fall muss das System auf oder in der Nähe eines Besitzguts oder eines Terrains installiert werden, das zur Infrastruktur gehört gemäss Artikel 62 Absatz 1 des Eisenbahngesetzes vom 20. Dezember 1957 (EBG; SR 742.101).

Gemäss der heutigen Rechtslage ist hingegen die Finanzierung der PV-Anlagen für die Bahnstromproduktion (16,7 Hz), die an LSW kein bedeutendes technisch-wirtschaftliches Potenzial aufweisen, über den BIF nicht möglich. Die Kraftwerke (und damit auch die PV-Kraftwerke) gehören zur Infrastruktur im Sinne von Artikel 62 Absatz 2 EBG. Daher können sie nicht gemäss der Verordnung vom 14. Oktober 2015 über die Konzessionierung, Planung und Finanzierung der Bahninfrastruktur finanziert werden (KPFV; SR 742.120).

4.2 Bewilligungs- und Genehmigungsverfahren

4.2.1 Lärmschutzwände entlang der Nationalstrassen

Die Wahrung der Interessen im Zusammenhang mit dem Betrieb von Infrastrukturen, dem Lärmschutz und der Raumplanung ist bei der Realisierung von Photovoltaikanlagen an Lärmschutzwänden zu berücksichtigen. Dieser Absatz beschreibt die geltenden gesetzlichen Grundlagen. Neben den nachfolgend analysierten allgemeinen Faktoren beim Bau von Anlagen ausserhalb von Bauzonen, wie

sie in der Studie «Raumplanung und Photovoltaik» [7] beschrieben werden, stellen die Schallreflexion, die Integration in die Landschaft sowie die Auswirkungen auf die Sicherheit der Infrastruktur und des Verkehrs die wichtigsten Hindernisse dar. Bei kantonalen Verfahren innerhalb der Bauzonen kann bei der PV-Installation auf Gebäuden von einem vereinfachten Verfahren gemäss Artikel 18a des Raumplanungsgesetzes vom 22. Juni 1979 (RPG; SR 700) [17] Gebrauch gemacht werden. Für die Installation von Lärmschutzwänden, insbesondere ausserhalb der Bauzonen, braucht es jedoch Untersuchungen im Rahmen des Baubewilligungs- oder Plangenehmigungsverfahrens, welche Mehrkosten und zusätzlichen administrativen Aufwand im Vergleich zu einer herkömmlichen Anlage auf einem Gebäude mit sich bringen.

Das UVEK bereitet zurzeit eine Revision der Raumplanungsverordnung vom 28. Juni 2000 (RPV; SR 700.1) vor, mit welcher kantonale Baubewilligungen für Photovoltaikanlagen auf Infrastrukturanlagen ausserhalb der Bauzone vereinfacht werden sollen.

Bei den Nationalstrassen ist der Bauherr entscheidend für das Verfahren beim Bau einer PV-Anlage an einer Lärmschutzwand:

Wenn das ASTRA selbst eine PV-Anlage als Bestandteil der Nationalstrasse errichtet (der generierte Strom dient ganz oder überwiegend dem Betrieb der Nationalstrasse), kommt ein Plangenehmigungsverfahren gemäss Nationalstrassengesetz zur Anwendung. Dies ist auch der Fall, wenn die PV-Module eine Lärmschutzfunktion haben (unabhängig von der Bauherrschaft, da die Anlage einen Bestandteil der Nationalstrasse bildet). In diesen Fällen ist die Integration der PV-Anlage in ein Ausbau- oder Unterhaltsverfahren zu untersuchen, damit nur ein einmaliges Plangenehmigungsverfahren durchgeführt werden muss. Für den Bau von Photovoltaikanlagen, die von anderen Bauwerken unabhängig sind, wird zur Verkürzung der Bewilligungsphase ein vereinfachtes Plangenehmigungsverfahren gemäss Art. 28a NSG ermöglicht, falls die erforderlichen Bedingungen erfüllt sind.

Eine PV-Anlage eines Dritten an einer bestehenden LSW ist nach kantonalem Recht zu bewilligen. Der private Bauherr muss zudem beim ASTRA eine Bewilligung nach Art. 44 NSG i.V.m. Art. 30 NSV sowie Art. 29 NSV einholen, da es sich um eine Installation im Bereich der Nationalstrassen handelt.

Ausserdem braucht es für Anlagen von Dritten die mit einem Mittelspannungsverteilstromnetz verbunden sind, gemäss Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für elektrische Anlagen vom 2. Februar 2020, revidiert am 1. Juli 2021 (VPeA; SR 734.25) je nach Leistung der Anlage, eine Plangenehmigung des ESTI.

4.2.2 Lärmschutzwände entlang der Bahnstrecken

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Installation von Photovoltaikanlagen an Bahninfrastrukturen werden im Detail im BAV-Leitfaden «Photovoltaik und Eigenverbrauch im öffentlichen Verkehr» [16] sowie im Artikel über Photovoltaikanlagen an Lärmschutzwänden [7] beschrieben. Die wichtigsten Aspekte werden nachfolgend zusammengefasst:

Die Photovoltaikanlagen an bestehenden Bahninfrastrukturen erfordern eine Plangenehmigung des BAV. Das gilt unabhängig davon, ob es sich beim Gesuchsteller um ein Eisenbahnunternehmen handelt (Art. 18 Abs. 1 EBG) oder um eine Drittperson (Art. 18 Abs. 1^{bis} EBG). Lärmschutzwände sind Teil der Bahnanlagen.

Photovoltaikanlagen, die zu einem neuen Bauvorhaben gehören, werden im Rahmen des Plangenehmigungsverfahrens der entsprechenden Pläne mitgenehmigt. Mit der Plangenehmigung liefert das BAV alle nach Bundesrecht erforderlichen Bewilligungen; kantonale Bewilligungen sind nicht unbedingt erforderlich.

Im Allgemeinen können Photovoltaiksysteme, die auf bestehenden Bahngebäuden installiert werden, im Rahmen eines vereinfachten Verfahrens nach Artikel 18i Absatz 1 EBG genehmigt werden. Inwiefern dies auch für Anlagen entlang der Lärmschutzwände gilt, ist fallweise zu prüfen.

Die Versorgung des öffentlichen 50-Hz-Netzes untersteht in der Regel der Verordnung vom 7. November 2001 über elektrische Niederspannungs-Installationen (NIV; SR 734.27). Gemäss Buchstabe p des Anhangs zur Verordnung vom 2. Februar 2000 über das Plangenehmigungsverfahren für Eisenbahnanlagen (VPVE; SR 742.142.1) ist dafür keine Plangenehmigung erforderlich, sofern die Anlage keine schutzwürdigen Interessen der Raumplanung, des Umweltschutzes, des Natur- und Heimatschutzes oder Dritten berührt und wenn sie keine Bewilligungen oder Genehmigungen nach den Bestimmungen des übrigen Bundesrechts erfordert (Art. 1a Abs. 1). Allerdings bedingen die Photovoltaikanlagen entlang der Lärmschutzwände wegen ihrer Nähe zu den Oberleitungen (Bahnstrom) besondere Erdungsmassnahmen, sodass sie nicht unter Buchstabe p des VPVE-Anhangs fallen. In diesem Fall braucht es folglich eine Plangenehmigung.

4.3 Bau und Erneuerung von Lärmschutzwänden

Der Baufortschritt beim LSW-Bestand des ASTRA ist mit über 93 % sehr hoch [18]. Die SBB haben den Bau ihres Bestands gemäss den bestehenden Normen bereits abgeschlossen. Sofern es also keine drastische Änderung der Lärmschutzgesetzgebung gibt, ist das Potenzial beim Bau von weiteren LSW also äusserst beschränkt und wird nicht in die quantitative Analyse einbezogen.

Bei den bestehenden Wänden ist der Lebenszyklus der LSW für die Nutzung des PV-Potenzials einzubeziehen. Die Installation von Photovoltaikmodulen hat an LSW mit einer ausreichenden Restlebensdauer zu erfolgen, um eine genügend lange Amortisationsdauer für die Photovoltaikanlage (die in dieser Studie mit 25 Jahren beziffert wird) zu gewährleisten. Die geschätzte Lebensdauer von LSW beträgt zwischen 30 und 80 Jahren, je nach Material und lokalen Bedingungen (Verschmutzung, insbesondere durch Salz). 89 % der LSW entlang der Bahnstrecken sind weniger als 20 Jahre alt und haben eine geschätzte Lebensdauer von 40 bis 80 Jahren: Sie eignen sich also in der Regel für eine PV-Anlage. Entlang der Nationalstrassen hingegen sind gemäss der vorhandenen Datenlage über 50 % der Wände über 20 Jahre alt und weisen eine geschätzte Lebensdauer zwischen 30 und 50 Jahren auf. Für eine PV-Anlage verfügen sie also unter Umständen über eine zu geringe Restlebensdauer. Ein beträchtlicher Teil des in dieser Studie ermittelten Potenzials wäre daher aus wirtschaftlicher Sicht erst nach Erneuerung dieser Wände nutzbar.

Im Rahmen einer grossangelegten Renovation oder beim Bau von LSW könnten sich einige Wände, die im momentanen wirtschaftlichen und nutzbaren Potenzial nicht eingeschlossen sind, für die Installation einer PV-Anlage eignen (Höhe, Material, mögliche Anpassung des Abstands zur Fahrbahn im Strassenbereich, Begrünung). Der Bau einer PV-Anlage bei der Erneuerung oder beim Bau einer Lärmschutzwand kann auch finanziell attraktiv sein, wenn das ASTRA oder die SBB selbst in die Photovoltaikanlage investieren: Es könnten tiefere Kosten anfallen, da die Baustelleneinrichtung sowohl für die LSW als auch für das PV-Anlage genutzt werden könnte und Synergien bei Untersuchungen und Bewilligungen entstehen.

Lärmschutzwände, die keine absorbierenden Eigenschaften benötigen, da es keine transparenten Bauten braucht, können mit bifazialen Photovoltaikmodulen ausgerüstet werden (siehe Abbildung 10). Die Wände, die eine absorbierende Funktion brauchen, können je nach vorhandenem Platz so ausgelegt werden, dass die Platzierung von PV-Modulen optimiert und die Produktion, insbesondere im Winter, maximiert wird. Ausserdem könnte die Erhöhung einer Lärmschutzwand mit einer bifazialen Anlage, falls dies im Rahmen der maximalen Höhen der LSW zulässig ist und dadurch keine schädlichen Reflexionen entstehen, eine zusätzliche Lärmschutzleistung erbringen, was in diesem Rahmen eine wirtschaftlich interessante Synergie darstellen würde.

Allerdings hängt die Möglichkeit, PV-Anlagen zu installieren, nicht nur von der Konzeption der Wand selbst ab: Auch Interessenkonflikte mit anderen Nutzungsarten des Bodens wie Fruchtfolgeflächen oder die Integration in die Landschaft spielen eine Rolle. Momentan erlauben es diese Konflikte nicht, die Installation von Modulen zu systematisieren, nicht einmal auf neuen Bauten.



Abbildung 3: LSW mit bifazialen Solarmodulen entlang der A50 in Uden, Niederlande, im Rahmen des Projekts Solar Highways [10]

5 Schlussfolgerungen

Die Energiestrategie 2050+ sieht bis 2050 eine Jahresproduktion von 34 TWh an Solarenergie vor, was eine Steigerung um den Faktor 13 im Vergleich zu heute darstellt. Obwohl das Potenzial auf den Schweizer Dächern auf 50 TWh geschätzt wird, kann ein Teil aus technischen, architektonischen oder wirtschaftlichen Gründen oder wegen des mangelnden Willens der Besitzer allenfalls nicht genutzt werden. Die Nutzung anderer bestehender Infrastrukturen, z. B. von LSW, ist interessant, da sie eine doppelte Nutzung der Flächen erlaubt.

Die Erfahrungen mit PV-Anlagen auf LSW in der Schweiz und im Ausland seit den 1980er-Jahren haben noch nicht zum flächendeckenden Bau dieser Anlagenart geführt, und zwar aus technischen und aus wirtschaftlichen Gründen. Die Haupteinschränkungen, die die zu berücksichtigenden PV-Anlagentypen festlegen, sind insbesondere die Mindestabstände, die aus Sicherheits- und Betriebsgründen zu Verkehrswegen oder Bahnstromleitungen eingehalten werden müssen, sowie die akustischen Auswirkungen des Vorhandenseins von reflektierenden PV-Modulen auf überwiegend absorbierenden LSW. Auf dieser Grundlage werden bei den SBB nur die Anlagen auf der Aussenseite der Bahnanlagen in Betracht gezogen. Bei den Nationalstrassen bestehen Möglichkeiten – unter bestimmten Anforderungen – auf der Verkehrsseite, auf der abgewandten Seite und oberhalb der LSW. Die tatsächlichen Aufstellungsmöglichkeiten hängen jedoch auch von der landschaftlichen Einbindung, der Beschattung oder von Hindernissen beim Zugang zu den Wänden ab. Auf der Grundlage einer visuellen und virtuellen Stichprobe, die entlang der Nationalstrassen vorgenommen worden war, wird geschätzt, dass 20 % der berücksichtigten Anlagen auf der Strassenseite, 30 % auf der Aussenseite und 20 % oberhalb der LSW möglich wären. Im Bahnbereich wird diese Wahrscheinlichkeit auf 50 % geschätzt.

Aus wirtschaftlicher Sicht profitieren Anlagen auf LSW zwar wie andere Anlagentypen von den niedrigeren Kosten der PV-Module, die erforderliche Investition ist jedoch oft höher als bei einer vergleichbaren Anlage auf einem Gebäudedach. Dies liegt an den notwendigen Verfahren und Studien sowie an den zusätzlichen Kosten für den Anschluss der Anlage an einen Anschlusspunkt, sei es eine Infrastruktur des ASTRA / der SBB oder das nächstgelegene öffentliche Netz.

Die folgende Tabelle stellt das Potenzial von PV-Anlagen an LSW entlang von Nationalstrassen und Bahnstrecken gemäss dieser Studie dar. Dabei wird unterschieden zwischen einem Potenzial, das den festgestellten technischen Einschränkungen entspricht, einem technisch-wirtschaftlichen Potenzial, das sich auf Anlagen mit Stromgestehungskosten unter 20 Rp./kWh (abzüglich der Einmalvergütung) beschränkt, und einem nutzbaren Potenzial, das die Umsetzungswahrscheinlichkeit auf der Grundlage der festgestellten Einschränkungen berücksichtigt.

Potenzial	Nationalstrassen		Bahnstrecken		Gesamt	
	MWp	GWh	MWp	GWh	MWp	GWh
Technisch	371	322	128	116	499	438
Technisch-wirtschaftlich	232	207	101	93	333	300
Nutzbar	61	55	50	46	111	101

Tabelle 16: PV-Potenziale an LSW) entlang von Nationalstrassen und Bahnstrecken

Das nutzbare Potenzial (101 GWh pro Jahr) und das technisch-wirtschaftliche Potenzial (300 GWh pro Jahr) machen 0,15 % bzw. 0,45 % des landesweiten PV-Potenzials aus (Dächer und Fassaden), das auf 67 TWh geschätzt wird. Selbst wenn man die Umsetzungsbeschränkungen für dieses Potenzial an Gebäuden (Dächer und Fassaden) berücksichtigt, bleibt das Potenzial von LSW gering. Die Kosten von PV-Anlagen an LSW sind zudem höher als bei vergleichbaren Anlagen auf Gebäudedächern. Abbildung 11 veranschaulicht das kumulierte nutzbare Potenzial je nach Stromgestehungskosten; sie zeigt, dass sich die Hälfte des Potenzials aus Anlagen zusammensetzt, die Stromgestehungskosten von über 12 bis 13 Rp./kWh aufweisen, sowie das Vorhandensein einer starken Sensibilität gegenüber den Energiekosten. Eine Spannweite von ± 2 Rp./kWh kann das Potenzial nämlich verdoppeln.

PV-Potenzial an LSW entlang von Nationalstrassen und Bahnlinien je nach Energiekosten

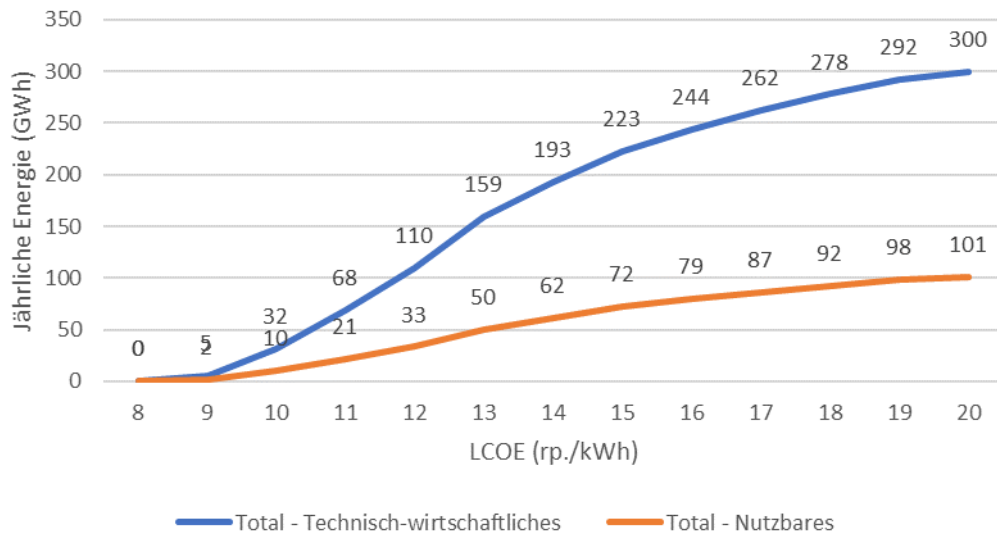


Abbildung 4: PV-Potenzial an LSW entlang von Nationalstrassen und Bahnstrecken je nach Energiekosten

Der Verkaufspreis der erzeugten Energie, der Anteil des Eigenverbrauchs sowie das Subventionsregime haben daher einen massgeblichen Einfluss auf die Wahl, ob eine PV-Anlage an LSW errichtet wird, und Änderungen bei den Kostenfaktoren können die Rentabilität einer Anlage beträchtlich beeinflussen. Laufende technologische Entwicklungen werden die Leistung von PV-Systemen weiter verbessern und ihre Kosten senken, auch für Installationen auf LSW. Die Mehrkosten im Zusammenhang mit Anlagen auf LSW (Verfahren, akustische und landschaftliche Studien) sind unabhängig von der PV-Technologie und werden aufgrund von Skaleneffekten eher sinken. Bei der Aufwertung dieses Potenzials wird auch die Nutzung von Synergien bei der Erneuerung von LSW oder bei anderen Bauvorhaben aus der Perspektive der Verfahren oder der Kosten interessant sein.

Der Bahnstrommarkt (16,7 Hz) ist kein offener Markt. Als Systemführerin muss die SBB den Bahnstrom den anderen Transportunternehmen zur Verfügung stellen. Der Preis, den «SBB Energie» dazu verrechnen kann, wird vom BAV festgelegt (Art. 20a der Eisenbahn-Netzzugangsverordnung vom 25. November 1998 [NZV; SR 742.122]) und beträgt durchschnittlich 11,5 Rp./kWh. Nur ein kleiner Teil des vorhandenen Potenzials (3 GWh/Jahr) beim Bahnstrom kann zu diesem Preis genutzt werden. Um die Nutzung dieses Potenzials zu maximieren, ohne den Strompreis zu beeinflussen, sollte die Möglichkeit geprüft werden, die PV-Anlagen für die Erzeugung von Bahnstrom über den Bahninfrastrukturfonds (BIF) zu finanzieren.

6 Vorgeschlagene Massnahmen

- 1) Im Rahmen von Energie-Vorbild Bund (VBE, *Klimapaket Bundesverwaltung*) werden ASTRA und SBB ermutigt, die geeigneten Lärmschutzwände in ihre Priorisierung ihres Portfolios für die Realisierung von Photovoltaikanlagen einzubeziehen. Synergien betreffend die Eigenverbrauchsmöglichkeiten zwischen ASTRA und SBB sind zu prüfen.
- 2) Das ASTRA stellt Dritten auf Anfrage geeignete Lärmschutzwände für die Installation von Photovoltaikanlagen bereit, wenn das ASTRA diese Wände nicht selbst für die Errichtung solcher Anlagen für den Eigenbedarf benötigt.
- 3) Um den Bau von PV-Anlagen an LSW der Nationalstrasse durch Dritte zu fördern, sollen die benötigten Flächen vom ASTRA kostenlos zur Verfügung gestellt werden können. Dies erfordert eine Revision von Artikel 29 NSV, da solche Nutzungen des Areals im Eigentum der Nationalstrasse durch Dritte heute in der Regel zum Marktpreis zu entgelten sind.
- 4) In Anbetracht der momentanen Lage (geschlossener und regulierter Markt) wird überprüft, ob eine Finanzierung der Photovoltaikanlagen für die Produktion von Bahnstrom (16,7 Hz) über den Bahninfrastrukturfonds möglich ist, um die Nutzung des für diese Verwendung vorhandenen Potenzials zu fördern.

Bibliografie

- [1] BFE, «Energieperspektiven 2050+,» 2020.
- [2] BFE, «Schweizer Hausdächer und -fassaden könnten jährlich 67 TWh Solarstrom produzieren,» 2020. [En ligne]. Available: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/actualites-et-medias/communiqués-de-presse/mm-test.msg-id-74641.html>.
- [3] Meteotest, «Das Schweizer PV-Potenzial basierend auf jedem Gebäude,» 2019.
- [4] ARE - Office fédéral du développement territorial, «Positionspapier freistehende Photovoltaik-Anlagen,» 2012.
- [5] EnergieSchweiz, «Photovoltaikmarkt-Beobachtungsstudie 2019,» 2020.
- [6] VDMA Photovoltaic Equipment, «International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - Results 2019 including maturity report 2020,» 2020.
- [7] DIKE, «Schriften zum Energierecht 18 - Photovoltaik-Anlagen auf Lärmschutzwänden,» 2021.
- [8] US Department of Transportation, «Highway renewable energy: Photovoltaic Noise Barriers,» 2017.
- [9] SEAC, «Solar Highways Benchmark Study,» 2015.
- [10] Minne de Jong, «Solar Highways - Layman's report,» 2020.
- [11] World Road Association, «Positive Energy Roads,» 2019.
- [12] TNC, «Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang von Nationalstrassen,» 2012.
- [13] Amstein + Walthert, «Potenziale zur Produktion erneuerbarer Energien bei Transportunternehmen,» 2017.
- [14] ASTRA, «Fachhandbuch Trasse/Umwelt,» 2020.
- [15] TNO, «Existence of visible solar reflections due to solar panels on the train track near America, Limburg,» 2020.
- [16] BAV, «Photovoltaik und Eigenverbrauch im öffentlichen Verkehr – Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr – ESöV 2050,» 2020.
- [17] EnergieSchweiz, «Leitfaden zum Melde- und Bewilligungsverfahren für Solaranlagen,» 2021.
- [18] ASTRA, «Teilprogramm Lärmschutz – Zwischenbilanz Juni 2020,» 2020.

Anhang: Methodologische Details

Siehe separates Dokument (nur auf Französisch verfügbar).