
Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Verkehrstechnik Heft V 382

Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

von

Dorothea Ludwig, Anja Tegeler, Daniel Schmedes, Luca Tomhave
IP SYSCON GmbH, Hannover

Andreas Hensel, Jacob Forster, Alexander Kleinhans, Martin Heinrich,
Robert John, Christian Schill

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Verkehrstechnik Heft V 382

bast 
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 01.0206
Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

Fachbetreuung:
Markus Auerbach

Referat:
Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck und Verlag:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53 | Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-797-6 | <https://doi.org/10.60850/bericht-v382>

Bergisch Gladbach, Oktober 2024

Kurzfassung – Abstract

Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Werkzeugs zur Berechnung der Photovoltaik Potenziale an Bundesfernstraßen. Im Fokus standen Photovoltaikpotenziale an Lärmschutzwänden, Lärmschutzwällen, Dachflächen von Bauwerken, Parkflächen und Straßenbegleitflächen entlang von Bundesfernstraßen. Das Werkzeug ist auf allen Ebenen einsetzbar, von der Einzelobjektebene bis zur bundesweiten Analyse. Hierzu wurde innerhalb umfangreicher Simulationen ein entsprechender Geodatenatz, basierend auf BISSTRA-Daten aber auch DOM- und DLM- sowie Open Streetmap-Daten erzeugt. Dieser kann Anwendung finden, um relevante Standorte zu identifizieren, zu priorisieren und als Entscheidungshilfe für die Erschließung der zur Verfügung stehenden Potenziale dienen. Für jede Fläche sind die wesentlichen Eigenschaften installierbare Leistung sowie der spezifische Jahresertrag ausgewiesen. Grundsätzlich ist das Werkzeug sowohl für alle Straßen als auch für andere Verkehrsträger (Schiene, Wasserstraße) einsetzbar.

Der Datensatz umfasst 250.000 Flächen. Aufgrund dieses Umfangs ist die Analyse der Flächen automatisiert und erfüllt nicht den Anspruch einer detaillierten Machbarkeitsstudie. Um solche Machbarkeitsstudien auf Objektebene durchführen zu können, werden entsprechende Daten z. B. zu Naturschutz/Ausgleichsflächen aber sinnvollerweise auch zu den Eigentumsverhältnissen benötigt. Diese sollten auf den niedrigeren Aggregationsebenen vorhanden sein, standen aber für die bundesweite Analyse, also die höchste Aggregationsebene, zumindest im Rahmen dieses Projekts nicht zur Verfügung. Innerhalb der Studie wurden daher pauschale Abschlagsfaktoren für die Simulationsergebnisse ermittelt, um die Größenordnung des bundesweiten, erschließbaren Potenzials zu bestimmen. Bei diesen Abschlagsfaktoren handelt es sich um geschätzte Abschlagsfaktoren, die zusätzlich mit einer entsprechenden Unsicherheit beaufschlagt wurden. Die hier dargestellten Ergebnisse stellen daher keine Bewertung einzelner Flächen, sondern eine Abschätzung auf nationaler Ebene dar. Hier ist insbesondere zu erwähnen, dass die Eigentumsverhältnisse der Flächen und damit einhergehende Zuständigkeiten nicht berücksichtigt worden sind.

Die durchgeführten Berechnungen und damit verknüpften Ergebnisse stellen bereits eine systematische Abschichtung vom reinen technischen Potenzial dar, da weitere in der Methodik dargestellte Einschränkungen wie z. B. die vorhandene Vegetation, der minimale spezifische Jahresertrag sowie weitere Kriterien berücksichtigt worden sind.

Zusammenfassend ergeben sich mit der dargestellten Methodik inklusive der geschätzten Abschläge auf nationaler Ebene erschließbare Gesamtpotenziale im zweistelligen Gigawatt-Bereich. Der größte Anteil entfällt dabei auf die Straßenbegleitflächen (24 – 48 GWp) gefolgt von den Lärmschutzwällen (3,2 – 4,2 GWp) und den Parkflächen (1,0 – 1,2 GWp). Das Potenzial der Lärmschutzwände ist mit 0,5 – 0,6 GWp ermittelt worden. Auf den Dachflächen der untersuchten Gebäude ergeben sich ca. 0,13 – 0,14 GWp installierbare Photovoltaikleistung. Die Straßenflächen selbst, die z. B. durch Überdachungen erschlossen werden könnten, wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Obwohl die Leistungspotenziale der Lärmschutzwände und der untersuchten Gebäude geringer ausfallen, kann die Erschließung dieser Potenziale äußerst attraktiv sein.

Darüber hinaus wurde bei der Belegung der Lärmschutzwände ein eher konservativer Ansatz mit Aufsätzen gewählt, um Beeinträchtigungen der Schallschutzwirkung zu vermeiden. Bei einem Teil der Lärmschutzwände könnten auch an den Seiten angebaute Konstruktionen in Betracht gezogen werden. Dies würde eine Erhöhung der installierbaren Leistung

pro Meter Lärmschutzwand bedeuten, kann aber sinnvollerweise nur bei einer objektbezogenen Analyse untersucht werden.

Bei Einbeziehung der ermittelten Leistungspotenziale entlang der Bundesfernstraßen in den Kontext der Energiewende ergeben sich unter Berücksichtigung der geschätzten Abschlagsfaktoren relevante Anteile am gesamten Zubaubedarf in Deutschland von 430 GWp bis 2045 [1].

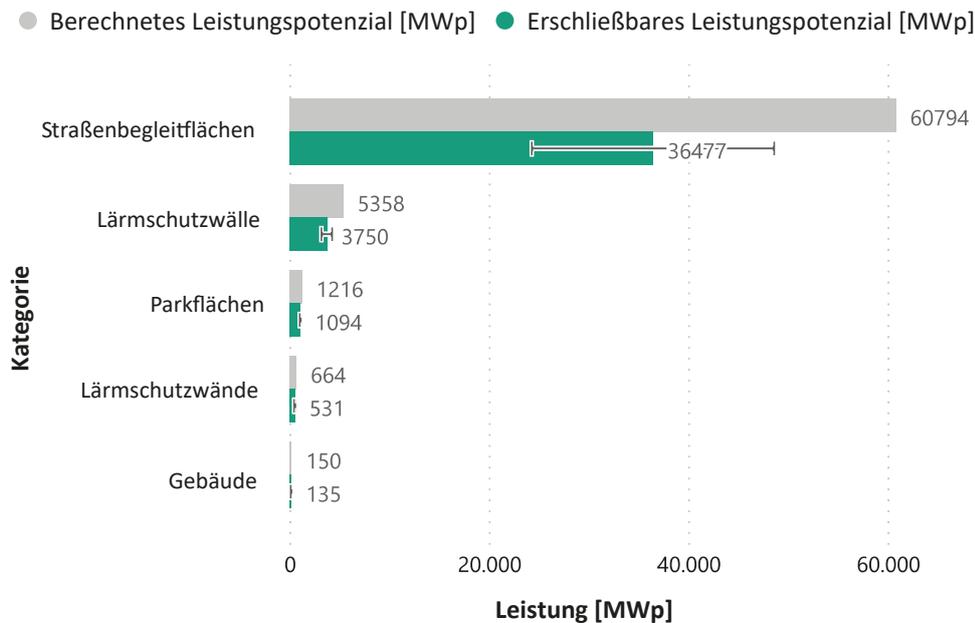


Bild 1: Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der untersuchten Flächenarten

Literatur

- [1] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE: Fraunhofer ISE Studie 2021, Installierte Leistung fluktuierender Erneuerbarer Energien (fEE) zur Stromerzeugung, Szenario Referenz in energy-charts.info, 2023, https://www.energy-charts.info/charts/remod_installed_power/chart.htm?l=de&c=DE (abgerufen am 19.07.2023)

Potential for photovoltaics on federal highways

In the presented study, a calculation of the photovoltaic potential on noise barriers, noise protection walls, defined structures and at parking lots and roadside areas along federal highways was performed and a corresponding geodata dataset was generated. The compiled locations of the potential areas contained therein can be used to identify and prioritize relevant sites and thus develop the available potential. Based on extensive simulations using the methodology outlined in detail in the final report, this dataset was generated and submitted to the contractor. In addition to the main relevant characteristics of the locations, such as installable capacity and specific annual yield, each area is provided with further attributes that allow a more detailed evaluation. In particular, the distance and allocation of the nearest grid connection is to be considered important information. Due to this scale and the need to automate the analysis on a national level, the results of the simulation do not meet the requirements of a detailed feasibility study for each location. Therefore, in the final part of the study, generalised reduction factors were applied to the simulation results to determine the order of magnitude of the potential that could be exploited and thus actually used. The results presented therefore do not represent an assessment of individual locations and sites, but rather an estimate at the national level. In particular, it should be noted that the ownership structure of the areas and the associated responsibilities have not been taken into account.

The calculations performed and the associated results obtained already represent a stratification from the pure technical potential, since further constraints such as existing vegetation, minimum specific annual yield and others have been taken into account. Nevertheless, the conducted study does not fulfill the claim of a feasibility study for each of the investigated areas. Therefore, for the presentation of the total potentials in Germany, shown in Figure 1, reasonable general reduction factors were estimated to determine the existing developable potential from today's point of view based on the current framework conditions. However, since these estimates can only be made roughly, the results also have a corresponding degree of uncertainty. In summary, the methodology presented, including the estimated deductions at national level, results in total potentials of 29.2 – 54.8 GWp that can be developed. The largest share is accounted for by roadside areas (23.3 – 48.6 GWp) followed by noise barriers (~ 3.2 – 4.2 GWp) and parking lots (~ 1.0 – 1.2 GWp). The potential of the noise barriers was determined to be 0.5 – 0.6 GWp. On the roof surfaces of the buildings investigated, there is approx. 0.13 – 0.14 GWp of installable photovoltaic capacity. The street areas itself, which can be accessed through canopies, for example, were not considered in this study. Even if installations on noise barriers and buildings play a smaller role in terms of absolute numbers with ~ 0.6 GWp and 0.1 GWp, the development of these two potentials can be extremely attractive due to added advantages: For example, integrating PV on existing noise barriers can save construction and land costs and there is a need for self-consumption in the immediate vicinity.

This aspect of self-consumption nearby was qualitatively investigated for fast-charging stations, tunnels and road maintenance depots. The development of this potential is regarded as extremely attractive, since there was a very good temporal match between generation and consumption in most of the cases investigated

If the identified potentials along the federal highways are placed in the context of the energy transition, their relative share can be considered as relevant of the PV expansion demand in Germany (430 GWp by 2045) [1].

For details on the methodology, please refer to the full report of the study.

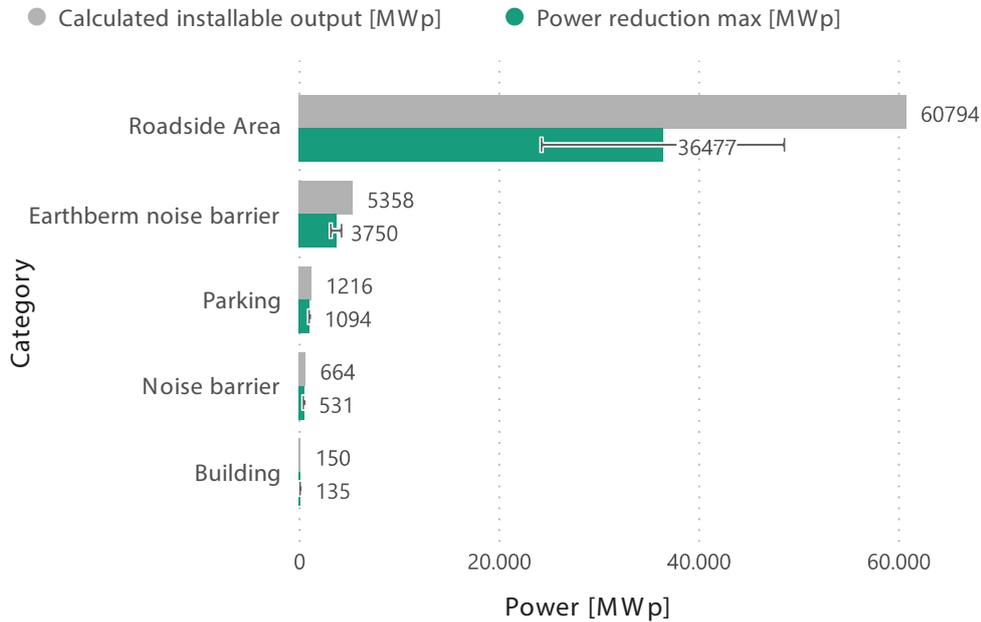


Fig. 1: Total calculated potential of installable PV power (grey) and the estimated developable potential (green) and uncertainty range for the minimum and maximum reduction factors for the analysed location types

Literature

- [1] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE: Fraunhofer ISE Studie 2021, Installierte Leistung fluktuierender Erneuerbarer Energien (fEE) zur Stromerzeugung, Szenario Referenz in energy-charts.info, 2023, https://www.energy-charts.info/charts/remod_installed_power/chart.htm?l=de&c=DE (Accessed on 19/07/2023)

Summary

Potential for photovoltaics on federal highways

Abstract

The study presented here calculates the photovoltaic potential on various structures along federal highways, such as noise barriers, noise protection walls, defined structures, parking areas, and roadside areas. A corresponding geodata set is generated, which identifies and prioritizes relevant locations. The location of the potential areas contained therein can be used to identify and prioritize relevant locations and thus facilitate the development of the available potential. The geodataset was generated based on extensive simulations using the methodology described in detail in the final report and handed over to the client. The dataset includes information on installable capacity, specific annual yield, and other attributes for detailed evaluation. The report focuses on the simulated and developable power potential. For a detailed methodology and more information, please refer to the final report.

1 Introduction

This study uses the following potential terminology, which are briefly defined below:

Theoretical potential

Total radiation reaching the ground surface, specified as an annual energy potential.

Technical potential

This is based on a specific technology in order to determine which part of the theoretical potential can be utilized. To this end, the efficiencies are taken into account, but also other technical boundary conditions such as the fill factor of the modules, as well as the fill factor of the surface due to the type of mounting. The corresponding assumptions are described in detail in the methodology section of the final report.

Ecological potential

Potential where all ecological conditions and constraints are met for installing a photovoltaic system.

Economic potential

Areas where the secondary conditions for economic viability are fulfilled, including construction and operating costs and the monetary value of the energy generated. This potential includes only plants that are economically viable are built. However, the economic potential is highly dependent on market situation at a given time, location and technology options and can not be considered in detail in this study.

Legal potential

This refers to restrictions from a legal perspective. There is not always a clear demarcation from other potentials, as there is a separate legal basis for nature conservation issues, for example. Further examples exist as soon as compliance with legal requirements results in significant additional costs and the associated economic viability of the plant is no longer given.

Simulated potential

Simulated potential refers to the potential that has been calculated using the methodology described in the final report. It is a subset of the technical potential.

Developable potential

This refers to the potential that can actually be realized in practice. It can only be determined on a case-by-case basis. In this study, the flat-rate deductions listed in Chapter 3.3 were applied in order to estimate the order of magnitude on a national level. A detailed feasibility study of individual areas or an exact calculation of the developable potential is not possible on a national scale due to the available of corresponding data.

Figure 1 illustrates the different potential definitions and how they can be understood as sets and subsets. Basically, the graphic is to be understood as a quantity graphic. The subsets are color-coded. It is important to note that this is a qualitative representation. The quantities are therefore not to be understood as true to scale. The technical potential is a clear subset of the theoretical potential and is therefore fully included in the theoretical potential. If additional constraints are taken into account, further subsets, such as the ecological potential, are created by exclusion within the technical potential. However, since the different constraints do not or only partially correlate with each other, they are subsets within the technical potential, but not necessarily unique subsets of each other. What is therefore relevant is the intersection of all subsets, which is then referred to as developable potential, as all conditions are fulfilled within this set. This is illustrated qualitatively in Figure 1.

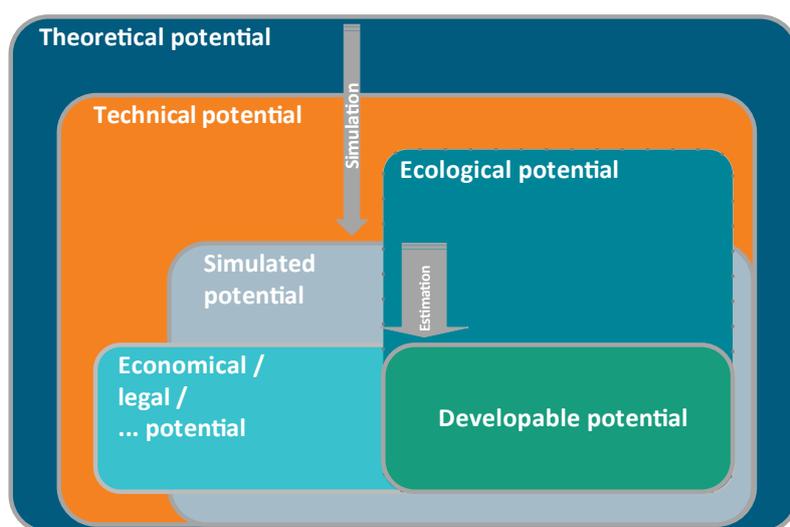


Fig. 1: Levels of potential definitions and their mutual proportions

1.1 Used physical parameters

Parameter	Linked statement
Area potential in m ²	Available area for a PV generator
Power potential in kWp resp. MWp	What PV power can be installed on the corresponding area?
Energy potential in kWh/a	What is the average amount of energy that can be generated per year?
Specific energy yield in kWh/kWp/a	What average energy can be generated per year per installed capacity? (Quotient of annual energy potential and power potential)

Table 1: Physical parameters used in this study to quantify the PV potential

The results section includes both the simulated power potential and the estimated developable power potential, taking into account uncertainties. The calculated power potential represents the result of the simulations performed, which are accurate within the context of the methodology presented. The developable power potential is estimated using generalized reduction factors.

1.2 Applied reduction factors

To provide an estimate of the potential that is likely to be developable based on the simulated power potential, generalized reduction factors have been determined. These reduction factors are illustrated in the table below. Table 2 provides an overview of the aspects and constraints that have been taken into account in the simulation, as well as those that have not. The reduction on the purely technical potential, which has already been implemented through the methodology, is calculated and displayed in the first row. The roadside areas have the largest reduction, approximately 62%. The additional discounts were obtained by the project team through a review of aerial photographs of a few sample areas. As a result, these results do not meet the criteria of scientific accuracy and should be regarded with a high degree of uncertainty due to the variations in data sources.

	Noise barriers	Earth berm noise barrier	Road side areas	Parking areas	Buildings	
Reduction that is implemented in the simulation (Simulated potential)	10%	17%	62%	43%	38%	
Environmental + landscape planning restrictions						
Glare effects due to module reflections						
Visibility restrictions with regard to road safety						
Legal aspects regarding various aspects of marketing and development aspects						
Constructional and legal restrictions						
Yield reduction due to near shading						
Distance to grid connection point						
Cost-effectiveness in relation to installation costs						
Additional reduction	Total minimum reduction	10%	20%	20%	5%	5%
	Total medium reduction	20%	30%	40%	10%	10%
	Total maximum reduction	30%	40%	60%	15%	15%
	high 50 – 90%	medium 30 – 50%	low 10 – 30%	Implemented in simulation		

Table 2: Estimation of the reduction factors applied to the simulated potential

2 Results

This chapter provides a summary of the results obtained from the potential simulations. The installable PV output power, given in MWp or GWp (output potential), serves as the reference value. Each analyzed potential area within the available result datasets for the various use cases includes the specific annual energy yield. Over 250,000 areas have been identified in terms of their suitability for solar energy generation. It is important to note that these results do not constitute a feasibility study for each individual location but rather provide an estimation at a national level. Furthermore, it should be emphasized that the ownership structure of the areas and associated responsibilities have not been taken into account. The reduction factors shown in Table 2 were applied to the simulated power potential (shown in grey) to obtain the developable power potential (shown in green). As these reduction factors were estimated using generalized values, the complete range of potential values, including associated uncertainties, is also depicted in the graphs.

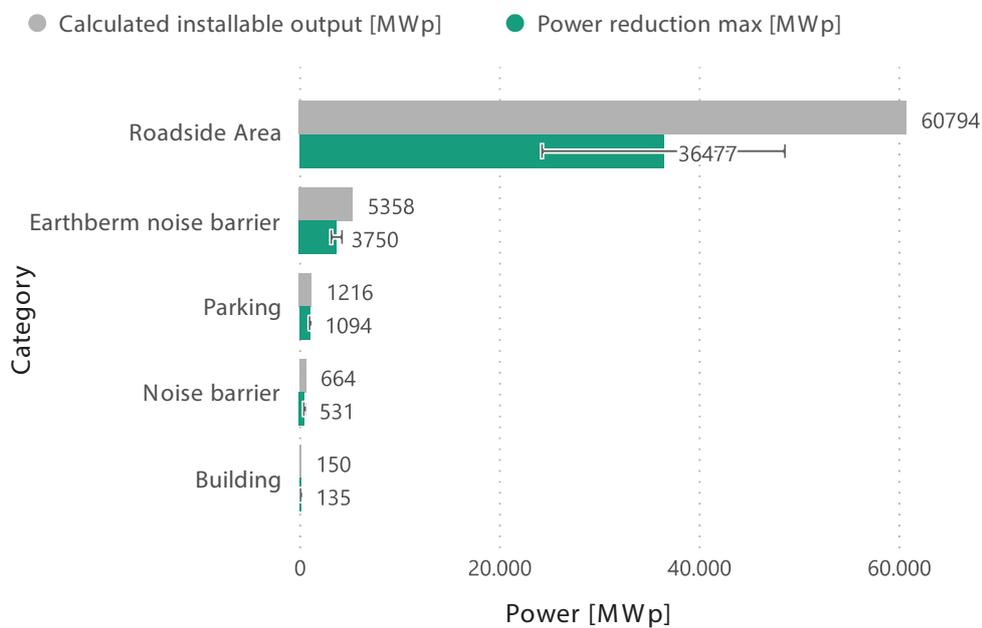


Fig. 2: Total calculated potential of installable PV power (grey) and the estimated developable potential (green) and uncertainty range for the minimum and maximum reduction factors for the analysed location types

3 Summary

The study presented addressed various objectives. The first was to calculate the potential of different areas and generate a corresponding geodata set. The location of the potential areas contained therein can be used to identify and prioritize relevant locations and thus facilitate the development of the available potential. This data set was generated based on extensive simulations using the methodology described in the final report that was submitted to the Federal Highway Research Institute. In addition to the main relevant properties such as the installable capacity and the specific annual yield, each area is provided with further attributes that allow a more detailed evaluation. Among other things, the data set contains the simulated value of the specific yield of the potential areas. This can be used for prioritizations.

The calculations carried out and the associated results already represent a reduction of the pure technical potential, as further restrictions outlined in the methodology, such as the existing vegetation, the minimum specific annual yield, and other criteria, have been taken into account. However, the study carried out does not fulfil the requirements of a feasibility study for each of the areas examined. Therefore, reasonable general reduction factors were estimated for the presentation of the total output potential in Germany presented in chapter 2, which should enable an assessment of the potential available from today's perspective, i.e. with the current framework conditions. These reduction factors are estimated with corresponding uncertainty.

In summary, using the methodology and estimated reduction factors at a national level, the study indicates a total developable power potential in the double-digit GW range. Roadside areas have the largest share (~24-48 GWp), followed by noise barriers (~3.2-4.2 GWp) and parking areas (~1.0-1.2 GWp). The potential of noise barriers alone was determined to be ~0.5-0.6 GWp. The study does not include the development potential of street areas themselves, which could be achieved through roofing, for example.

While noise barriers and buildings play a smaller role in absolute figures, developing their potential can be highly attractive due to potential cost savings in construction and land expenses, especially if existing noise barriers are utilized or self-consumption is needed in the immediate vicinity. The study adopted a conservative approach to noise barriers to maintain their noise protection effectiveness, but alternative constructions could increase the installable power per meter of noise barrier. Vertical PV installations could also be considered for some of the noise barriers. This would mean an increase in the installable power per meter of noise barrier, since more area can be covered.

Considering the identified power potential along federal highways in the context of the energy transition, taking into account the estimated reduction factors, it contributes significantly to Germany's total expansion targets of 430 GWp by 2045 [1]. Technological advancements and efficiency improvements in photovoltaic modules suggest even greater potential in the future, with average annual increases in crystalline silicon cell efficiency of 0.3-0.5 percentage points observed in recent years [2].

4 Outlook

When developing the identified potentials, the created data set with georeferencing of the potential areas can help to establish meaningful prioritizations. Although final statements on each area can only be made by a corresponding detailed planning by a plant planner, the data set can be used to make sensible preselection, spatial clustering or prioritization. Potential areas that are spatially close to electrical consumers are highly relevant here, regardless of the area type. Areas in close proximity to electrical consumers are particularly relevant, regardless of the area type. Road maintenance depots, highway maintenance depots, and tunnels are noteworthy in this regard. Considering the increasing number of electrified vehicle fleets, charging stations are expected to have growing energy demands in the future, which should be taken into account in planning.

Qualitatively, the self-consumption potential for fast-charging stations, tunnels and master stations was examined as part of the study. Developing the potentials in these areas is highly attractive as there is a strong temporal correlation between generation and consumption in most cases examined. With very low electricity generation costs for photovoltaic systems in Germany (3.1-5.7 cents/kWh for groundmounted systems [3]), there is significant economic potential in these areas.

The aim of this study is to record and present the scale of PV potential nationwide. It would have been far beyond the scope of this study to record the ownership structures and thus the responsibilities for each individual parcel of land. Therefore, the results can only provide information for the various players such as the federal government, the federal highway company, the federal states, but also local authorities and, if applicable, private owners. These stakeholders can then plan the development either independently or in collaboration with partners such as citizen energy cooperatives.

Literature

- [1] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE: Fraunhofer ISE Studie 2021, Installierte Leistung fluktuierender Erneuerbarer Energien (fEE) zur Stromerzeugung, Szenario Referenz in energy-charts.info, 2023, https://www.energy-charts.info/charts/remod_installed_power/chart.html?l=de&c=DE (accessed on 19/07/2023)
- [2] HARRY WIRTH, 27. September 2023. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html> (accessed on 19/07/2023)
- [3] PHILIPPS et al.: Photovoltaics Report in ise.fraunhofer.de, 2023, https://www.energy-charts.info/charts/installed_power/chart.html?l=de&c=DE&chartColumnSorting=default&year=2022&stacking=stacked_absolute (accessed on 19/07/2023)

Inhalt

1	Überblick zum Projekt	16
1.1	Ausgangslage	16
1.2	Ziele des Projektes	17
1.3	Definition des Potenzialbegriffes	18
1.3.1	Potenzialbegriffe in dieser Studie	18
1.3.2	Verwendete physikalische Größen	21
2	Methodik	22
2.1	Aufbau der zu untersuchenden Flächenkulisse	22
2.1.1	Lärmschutzeinrichtungen	22
2.1.2	Gebäude	26
2.1.3	Parkflächen	27
2.1.4	Straßenbegleitflächen	28
2.2	Ermittlung der solaren Einstrahlung	29
2.3	Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials zur PV-Nutzung	32
2.3.1	Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Lärmschutzwänden	32
2.3.2	Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Lärmschutzwällen	33
2.3.3	Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Dachflächen	33
2.3.4	Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Parkflächen	34
2.3.5	Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Straßenbegleitflächen	36
2.4	Implementierung von Netzverknüpfungspunkten	36
2.4.1	Abschätzung Netzanschlusskosten	36
2.5	Clusterbildung	37
2.6	Rechtliche Rahmenbedingungen bei der Belegung mit PV-Modulen	38
2.7	Validierung der PV-Ertragsprognosen	39
2.8	Ermittlung der angewendeten Abschläge	42

3	Photovoltaik Lärmschutzeinrichtungen- und Straßenüberdachungen	45
3.1	PV-Lärmschutzwände	45
3.1.1	Vorangehende Potenzialabschätzungen	45
3.1.2	Historische Pilotprojekte	45
3.1.3	Kategorisierung von Umsetzungsarten	46
3.1.4	Anforderungen an Lärmschutzwände	47
3.2	PV-Lärmschutzwälle	52
3.2.1	Gestaltung von Lärmschutzwällen	52
3.2.2	Statistik von Lärmschutzwällen	52
3.2.3	PV-Lärmschutzwälle	53
3.2.4	Referenzprojekte von PV-Lärmschutzwällen	53
3.2.5	Annahmen für die Belegung von PV-Lärmschutzwällen	54
3.3	PV-Straßenüberdachung für Tunnelenergiebedarf	55
3.3.1	Referenzprojekte von PV-Straßenüberdachungen	56
3.3.2	Belegungskonzept für PV-Überdachungen	56
4	Eigenverbrauchspotenziale	57
4.1	Schnelladestationen entlang von Bundesfernstraßen	57
4.1.1	Datenbeschaffung der Eigenverbrauchsprofile	57
4.1.2	Simulation des Eigenverbrauchs	58
4.1.3	Ergebnisse zum Eigenverbrauch	59
4.1.4	Wirtschaftliche Betrachtungen	61
4.2	Tunnel an Bundesfernstraßen	62
4.2.1	Datenbeschaffung der Eigenverbrauchsprofile	62
4.2.2	Simulation des Eigenverbrauchs	66
4.2.3	Ergebnisse zum Eigenverbrauch	68
4.2.4	Wirtschaftliche Betrachtungen	71
4.2.5	Allgemeine Schlussfolgerungen und nationale Analyse	71
4.3	PV-Aufdachanlagen an Meistereigehöften	72
4.3.1	Simulation des PV-Eigenverbrauchs	72
4.3.2	Simulation des Eigenverbrauchs	76
4.3.3	Ergebnisse zum Eigenverbrauch ohne elektrifizierte Flotte	77
4.3.4	Ergebnisse zum Eigenverbrauch mit elektrifizierter Flotte (Szenario A)	79
4.3.5	Ergebnisse zum Eigenverbrauch mit elektrifizierter Flotte (Szenario B)	81

5	Ergebnisse	83
5.1	Gebäude	84
5.2	Lärmschutzwände	85
5.3	Parkflächen	87
5.4	Lärmschutzwälle	88
5.5	Straßenbegleitflächen	90
5.6	Verteilung auf Anwendungsfälle	92
5.7	Aufteilung auf Bundesländer	94
6	Zusammenfassung	97
7	Ausblick	99
	Literatur	100
	Bilder	103
	Tabellen	107
	Anhang	109

1 Überblick zum Projekt

Im Rahmen von dieser Studie wurde eine Berechnung der Photovoltaikpotenziale an Lärmschutzwänden, Lärmschutzwällen, definierten Bauwerken bzw. deren Dachflächen, Parkplätzen und Straßenbegleitflächen entlang von Bundesfernstraßen durchgeführt und ein entsprechender Geodatensatz erzeugt. Diese Studie wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt.

1.1 Ausgangslage

Die erste deutschlandweite Abschätzung des PV-Potenzials entlang von Bundesfernstraßen (BFStr) wurde 2015 als „Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen“ von der Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht. Durchgeführt wurde diese durch die geomer GmbH zusammen mit der Universität Heidelberg (GÜNDRA, 2015). Dieses genannte Forschungsvorhaben stellt die Vorgängerstudie zur aktuellen Studie „Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen“ dar und soll im Hinblick auf die Methodik und GIS-Analytik überarbeitet, sowie bezüglich zugrundeliegender Daten vervollständigt werden. Abseits des PV-Potenzials hatte die Studie außerdem den Aufbau eines Katasters für Wildbarrieren zum Ziel. Eine derartige Betrachtung findet im Zuge der neuerlichen Studie nicht statt.

Das Forschungsvorhaben „Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen sowie Wildbarrieren“, welches bereits im Jahr 2013 durchgeführt wurde, hatte beträchtliche Potenziale von Photovoltaikanwendungen (PV) an Bundesfernstraßen aufgezeigt. Seit der Erstellung dieses Katasters in einem Geoinformationssystem (GIS) hat sich sowohl im technischen Bereich als auch bei den regulatorischen Rahmenbedingungen einiges geändert.

Zu den geänderten Rahmenbedingungen zählen zum einen der Preisverfall der PV-Module. Hier sind die Nettosystempreise von 2013 bis 2018 um 23 % bei Aufdachanlagen gefallen (STATISTA, 2022). Bei Freiflächenanlagen sanken die Anschaffungskosten sogar um fast 70 % (SOLARANLAGEN-ABC, 2022). Zudem sind die rechtlichen Rahmenbedingungen seit 2013 mehrfach geändert worden. Das 2022 in Kraft getretene Osterpaket und weitere Novellierungen des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) müssen in der Potenzialanalyse berücksichtigt werden. Überdies haben sich auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen geändert. Der Eigenverbrauch von Photovoltaik-Strom ist bis zu einer Anlagengröße von 30 kWp von der Zahlung der EEG-Umlage befreit. Dadurch können neben der Deckung des Eigenbedarfs von Gebäuden und Infrastruktur auch Elektrofahrzeuge kostengünstig geladen werden. Mit dem seit dem 01.01.2021 aktiven, neuen Infrastrukturbetreiber für die Bundesfernstraßen – der Autobahn GmbH des Bundes – ergeben sich neue Möglichkeiten, die Flächenpotenziale auszuschöpfen. Durch Sektorenkopplung und der Zunahme der Elektrifizierung im Verkehrssektor wird der Bedarf an nachhaltiger, elektrischer Energie in den nächsten Jahren weiter steigen. Damit einhergehend ist ein gezielter Ausbau von Schnellladestationen an Rastanlagen erforderlich. Eine Deckung des damit verbundenen Energiebedarfs durch erneuerbare Energien ist essenziell, um die Klimaschutzziele der Bundesregierung für 2030 bzw. 2050 zu erreichen.

1.2 Ziele des Projektes

Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, aufgrund der geänderten Rahmenbedingungen eine Aktualisierung, Erweiterung und Validierung des Standortkatasters für Lärmschutzanlagen aus dem Jahr 2013 vorzunehmen. Für die aktualisierten Standorte für Lärmschutzeinrichtungen sowie auf genau definierten Bauwerken, Frei- und Parkflächen entlang von Bundesfernstraßen soll weiterhin das heutige technische Photovoltaikpotenzial über verschiedene technische Installationslösungen räumlich konkret beziffert werden und unter Berücksichtigung von Netzverknüpfungspunkten sowie hinsichtlich rechtlicher Rahmenbedingungen bewertet werden. Eine Clusterung von Eignungsflächen liefert der BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) bereits vermarktungsfähige Flächenpakete. Dabei sind die Grundlagen- und Ergebnisdaten aus dem Vorhaben 2013 Ausgangslage und werden hinsichtlich Aktualisierung, Erweiterung und Validierung im ersten Schritt bewertet und ausgewertet.

Somit lassen sich folgende Zielsetzungen benennen:

- Räumlich konkrete Ausgabe des PV-Potenzials auf definierten Flächen und Bauwerken entlang von Bundesfernstraßen mit hoher Aktualität und Genauigkeit
- PV-Potenzialberechnung für PV-Aufsätze durch Nachrüstung von Lärmschutzwänden
- Erzeugung von Clustern mit PV-Potenzialflächen, die durch zu entwickelnde Faktoren definiert und abgeleitet sind
- Implementierung von Netzverknüpfungspunkten unter Berücksichtigung des PV-Potenzials je Cluster
- Berechnung des Potenzials unter Berücksichtigung von verschiedenen technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen
- Abschätzung von Abschlagsfaktoren zur Ermittlung des erschließbaren Potenzials auf den untersuchten Potenzialflächen

Im Projekt werden insbesondere folgende Potenzialflächen adressiert:

- Lärmschutzwände
- Lärmschutzwälle
- Gebäude (Rastanlagen, Straßen- und Autobahnmeistereien, Salzhallen)
- Überdachung von zugehörigen Parkflächen
- Straßenbegleitflächen entlang der Bundesfernstraßen

Durch dieses Forschungsprojekt wird ein wichtiger Beitrag dazu geleistet, die Photovoltaik-Potenziale an den Bundesfernstraßen zu bestimmen. Die Aufführung dieser Potenziale stellt einen wichtigen Schritt dar, um die Potenziale in Zukunft heben zu können. Die Validierung der Prognosen verschafft den Flächeninhabern und möglichen Projektierern eine Abschätzung hinsichtlich der durchgeführten Ertragsanalyse und damit zu erwartender Wirtschaftlichkeit. Der Inputdatensatz für die durchgeführte Potenzialstudie enthält 250.000 Flächen. Aufgrund dieses Umfangs und der daher notwendigen Automatisierung der flächendeckenden Analyse erfüllen die Ergebnisse der Simulation nicht den Anspruch einer detaillierten Machbarkeitsstudie. Im letzten Teil der Studie wurden daher pauschal abgeschätzte Abschlagsfaktoren auf die Simulationsergebnisse angewendet, um die Größenordnung der erschließbaren und damit real nutzbaren Potenziale zu ermitteln.

Die im Ergebnisteil gezeigten Ergebnisse stellen also keine Bewertung einzelner Flächen, sondern eine Abschätzung auf nationaler Ebene dar. Insbesondere ist hier noch einmal zu erwähnen, dass insbesondere die Eigentumsverhältnisse der Flächen und damit einhergehende Zuständigkeiten nicht berücksichtigt worden sind. Zum einen war diese Betrachtung nicht Teil der ausgeschriebenen Leistung dieser Studie. Zum anderen wäre die hierfür notwendige Datenbeschaffung auf nationaler Ebene mit erheblichem Aufwand verbunden, der innerhalb des verfügbaren Kostenrahmens nicht abbildbar ist.

1.3 Definition des Potenzialbegriffes

In diesem Kapitel werden zunächst die verschiedenen Potenzialbegriffe eingeführt und erläutert. Im ersten Unterkapitel sind diese bewusst dimensionslos dargestellt, um die Zusammenhänge darzustellen. Im Anschluss daran erfolgt dann die Erläuterung anhand welcher Einheiten und Dimensionen die genannten Photovoltaikpotenziale quantifiziert werden können. Diese Quantifizierung ist prinzipiell auf jeden der Potenzialbegriffe anwendbar. In dieser Studie wurde dies durch ein entsprechendes Attribut kenntlich gemacht (vgl. Tabelle 1).

1.3.1 Potenzialbegriffe in dieser Studie

Um die zu berechnenden PV-Potenziale besser einordnen zu können, wird zunächst aufgezeigt, welche Stufen verschiedener Potenzialbegriffe als Unterscheidung herangezogen werden können. Hierfür wurde die grundsätzliche Definition gemäß (KALTSCHMITT, 2003) zu Grunde gelegt. Bei der Photovoltaik wird in der Literatur zunächst vom theoretischen Potenzial ausgegangen. Dieses entspricht der auf einer Fläche einwirkenden Solarstrahlung über ein durchschnittliches Jahr. In Deutschland liegt diese zwischen 950 und 1.200 kWh/m² (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2023). In der ersten Reduktionsstufe wird in der Literatur meist von technischem Potenzial gesprochen. Hierfür werden technologiebedingte Verluste berücksichtigt. In dieser Studie wurden dafür Abschläge beim Einsatz von kristallinen Si-Modulen berücksichtigt (Wirkungsgrad, Systemverluste, etc.). Weitere Effekte wie z. B. rechtliche, wirtschaftliche, ökologisch oder weitere Restriktionen werden bei der Betrachtung des technischen Potenzials nicht berücksichtigt. Um sich dem interessanten Wert – dem erschließbaren Potenzial – anzunähern, können weitere Nebenbedingungen mitberücksichtigt werden.

Generell nimmt das verfügbare Potenzial mit Zunahme an zu berücksichtigenden Nebenbedingungen ab, denn jede neue zu berücksichtigende Nebenbedingung kann zum Ausschluss von Installationsorten von PV-Modulen innerhalb der theoretischen Menge an Flächen führen. Dies gilt für das Potenzial in jeder miteinander verknüpften Einheit, unabhängig ob die Fläche, Leistung oder Energie betrachtet wird. Zugleich steigt der Aufwand einer Potenzialstudie nichtlinear an je mehr Nebenbedingungen berücksichtigt werden sollen. Manche Nebenbedingungen lassen sich auch deshalb schwer oder nur mit enormem Aufwand mit einbinden, da sie nicht quantifizierbar sind, oder falls quantifizierbar, keine Daten hierzu vorliegen. Wiederum andere Bedingungen, wie z. B. die Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit, sind zeitlich und örtlich sehr variabel und müssen mit lokal sinnvollen Annahmen im Einzelfall geprüft werden. Diese verändern sich auch über die Zeit, so können durch technologische Fortschritte, mögliche Kostensenkungen oder Wirkungsgradsteigerungen zukünftig Potenziale sichtbar werden, die aktuell als nicht relevant oder als nicht wirtschaftlich ausgeschlossen werden würden. Grundsätzlich kann eine endgültige Aussage über die Realisierungsmöglichkeit einer PV-Anlage auf einer gegebenen Fläche nur durch eine detaillierte Machbarkeitsstudie mit Berücksichtigung aller lokalen

Randbedingungen getroffen werden. Die im Ergebnisteil gezeigten Ergebnisse stellen also keine Bewertung einzelner Flächen, sondern eine Abschätzung auf nationaler Ebene dar. Es ist zu erwähnen, dass insbesondere die Eigentumsverhältnisse der Flächen und damit einhergehende Zuständigkeiten nicht berücksichtigt worden sind. Zum einen war diese Betrachtung nicht Teil der ausgeschriebenen Leistung dieser Studie. Zum anderen wäre die hierfür notwendige Datenbeschaffung auf nationaler Ebene mit erheblichem Aufwand verbunden, der innerhalb des verfügbaren Kostenrahmens nicht abbildbar ist. In der folgenden Tabelle sind die verwendeten Potenzialbegriffe noch einmal tabellarisch dargestellt und kurz erläutert.

Begriff	Kurzerläuterung
Theoretisches Potenzial	Hiermit wird die auf eine Fläche einwirkende Gesamtstrahlung gemeint. Dafür wird das gesamte Wellenspektrum des auf die Oberfläche eintreffenden Lichtes betrachtet. Die Angabe erfolgt meist energiebezogen als Jahresenergiepotenzial.
Technisches Potenzial	Hierfür wird eine bestimmte Technologie zu Grunde gelegt, um zu betrachten welcher Teil des theoretischen Potenzials nutzbar gemacht werden kann. Dafür werden die Wirkungsgrade berücksichtigt, aber auch andere technische Randbedingungen wie der Füllfaktor der Module selbst der Füllfaktor der Fläche durch die Art der Aufständigung. Im Methodikteil sind die entsprechenden Annahmen ausführlich dargestellt.
Ökologisches Potenzial	Hiermit ist das Potenzial gemeint, bei dem alle ökologischen Randbedingungen erfüllt sind und aus ökologischer Sicht kein Hinderungsgrund für die Errichtung der Anlage auf der Fläche besteht.
Ökonomisches Potenzial	Da im Allgemeinen nur Anlagen gebaut werden, für die eine Wirtschaftlichkeit besteht, sind hiermit die Flächen gemeint, für die diese Nebenbedingung erfüllt ist. Neben den Errichtungs- und Betriebskosten ist hierfür notwendigerweise auch der monetäre Wert der erzeugten Energie zu betrachten.
Rechtliches Potenzial	Hiermit werden Restriktionen aus rechtlicher Sicht gemeint. Eine klare, eindeutige Abgrenzung zu anderen Potenzialen ist nicht immer gegeben, da z. B. für Naturschutz auch eine entsprechende rechtliche Grundlage besteht. Ein weiteres Beispiel ist z. B. wenn zur Einhaltung von rechtlichen Gesetzmäßigkeiten ein deutlicher Mehraufwand entsteht und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlage nicht mehr gegeben ist.
Berechnetes Potenzial	Dies bezeichnet das anhand der dargestellten Methodik simulierte Potenzial. In der dargestellten Definition handelt es sich um eine Teilmenge des technischen Potenzials.
Erschließbares Potenzial	Damit ist das tatsächlich erschließbare und in der Praxis realisierbare Potenzial gemeint. Die Ermittlung ist nur im Einzelfall möglich. In dieser Studie wurden die in Kapitel 2.8 aufgeführten, pauschalen Abschläge angewendet, um eine Abschätzung der Größenordnung auf nationaler Ebene überhaupt zu ermöglichen. Eine detaillierte Machbarkeitsbetrachtung von Einzelflächen bzw. eine exakte Berechnung des erschließbaren Potenzials sind im Maßstab einer nationalen Betrachtung aufgrund der verfügbaren Datenlage nicht möglich.

Tab. 1: In dieser Studie verwendete Potenzialbegriffe

Um den Zusammenhang der unterschiedlichen Potenzialbegriffe zu verdeutlichen, kann die in Bild 1 dargestellte Grafik herangezogen werden. Grundsätzlich ist dabei die Grafik als Mengengrafik zu verstehen. Die Teilmengen sind farblich gekennzeichnet. Wichtig ist dabei, dass es sich um eine qualitative Darstellung handelt. Die Größen sind daher nicht maßstabsgetreu zu verstehen. Das technische Potenzial ist eine eindeutige Teilmenge des theoretischen Potenzials und daher vollständig im theoretischen Potenzial erhalten. Bei Berücksichtigung von weiteren Nebenbedingungen entstehen durch Ausschluss innerhalb des technischen Potenzials weitere Teiluntermengen wie z. B. das ökologische Potenzial. Da die unterschiedlichen Nebenbedingungen jedoch nicht oder nur teilweise miteinander korrelieren, sind diese zwar Teilmengen innerhalb des technischen Potenzials, aber nicht zwingend eindeutige Teilmengen voneinander. Relevant ist daher die Schnittmenge aller Unter-

mengen, die dann als erschließbares Potenzial bezeichnet wird, da innerhalb dieser Menge alle Bedingungen erfüllt sind. Dies wurde qualitativ in der Grafik dargestellt.

In dieser Studie wurden ausgehend vom reinen technischen Potenzial, sofern es die Datelage erlaubt hat und der Aufwand ressourcentechnisch innerhalb des Projektes abbildbar war, weitere Bedingungen methodisch berücksichtigt. Dazu gehören bspw. der Ausschluss von Flächen, die aufgrund von Nahverschattungseffekten einen minimalen spezifischen Ertrag nicht erreichen. Der durch Simulationen mit der in Kapitel 2 dargestellten Datensatz ist daher eine Teilmenge des theoretischen Potenzials und hat Schnittmengen mit dem ökologischen bzw. wirtschaftlichen Potenzialen, schließt aber manche Flächen auch bereits methodisch aus. Zur weiteren Verdeutlichung soll an dieser Stelle ein Beispiel genannt werden, das innerhalb der Mengengrafik verortet ist.

Eine Lärmschutzwand befindet sich in einem ökologisch unkritischen Gebiet. Der Eingriff in das ohnehin schon durch die Lärmschutzwand veränderte Ökosystem durch eine Anbringung eines Moduls oben an der Lärmschutzwand ist daher aus ökologischen Gesichtspunkten gerechtfertigt. Auch die rechtlichen Restriktionen aufgrund der Schallschutzfunktion bleiben hiervon unbeeinflusst. Um die Lärmschutzwand herum befindet sich jedoch starker und hoher Bewuchs, sodass der spezifische Jahresertrag deutlich unterhalb von 650 kWh/kWp liegt. Methodisch wird diese Fläche damit nicht berücksichtigt und liegt entsprechend außerhalb des berechneten Potenzials. Sie liegt innerhalb des ökologischen Potenzials, aber außerhalb des wirtschaftlichen Potenzials.

Die in Bild 1 verwendete Farbkodierung wurde entsprechend auch in den Grafiken des Ergebnisteils umgesetzt. Das berechnete Potenzial ist dort in grau dargestellt, das geschätzte erschließbare Potenzial in grün.

Um die aus den oben dargelegten Gründen, nicht in der Simulation berücksichtigten Einschränkungen zu beachten, wurden im Anschluss noch pauschale Abschläge geschätzt, um die Größenordnung der erschließbaren Potenziale abzuschätzen (vgl. Kapitel 2.8).

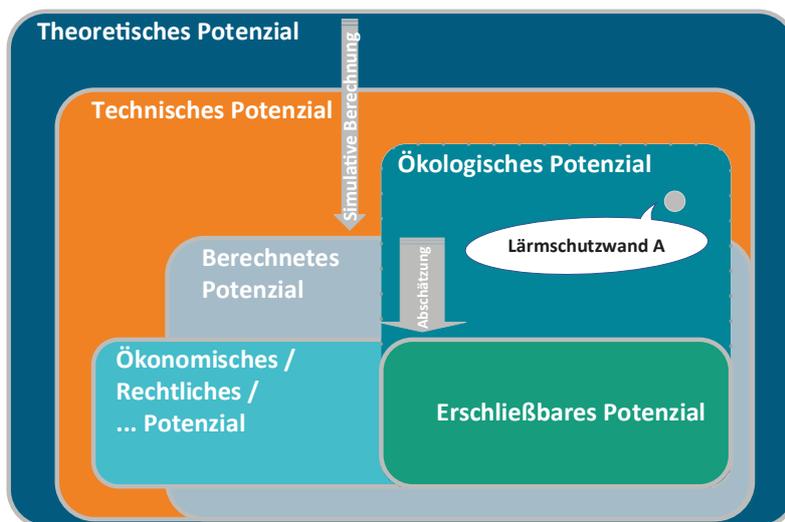


Bild 1: Stufen der Potenzialbegriffe und ihre Nebenbedingungen inkl. Verortung des Beispiels Lärmschutzwand A

1.3.2 Verwendete physikalische Größen

Bei der Quantifizierung des photovoltaischen Potenzials wird zwischen dem leistungsbezogenen Potenzial (Leistungspotenzial) und dem energetischen Potenzial (Jahresenergiepotenzial) unterschieden. Als Leistungspotenzial wird die auf einer untersuchten Fläche installierbare photovoltaische Generatorleistung bezeichnet. Bei den verwendeten Einheiten kWp und MWp wird durch den Zusatz „p“ verdeutlicht, dass es sich nicht um eine dauerhaft verfügbare Nennleistung handelt, sondern die unter normativ festgelegten Standardtestbedingungen (STC) erzeugbare Leistung. Diese Bedingungen sind festgelegt auf 1.000 W/m² Einstrahlung mit Licht, entsprechend dem Sonnenspektrum an der Erdoberfläche und bei 25 °C Zelltemperatur.

Abgeleitet aus der installierbaren Leistung kann die durchschnittlich erzeugbare jährliche elektrische Energie durch Einstrahlungssimulationen mit Wetterdaten angegeben werden. Die entsprechenden Einheiten sind kWh oder MWh. Wenn die Größe im Verhältnis zur installierten Leistung betrachtet wird, ergibt sich der spezifische Ertrag in kWh/kWp. Dieser kann als Indikator für Wirtschaftlichkeit einer Anlage herangezogen werden. Für alle untersuchten Potenzialflächen wurden diese Werte ermittelt und sind als Attribut in dem erstellten Geodatensatz enthalten.

Der Fokus bei den im Abschlussbericht gezeigten Grafiken liegt auf dem Leistungspotenzial, da hierzu aus Sicht der Autoren eine direktere Zuordnung zu anderen auf nationaler Ebene diskutierten Größen wie z. B. den benötigten Zubauzahlen oder den von der Bundesnetzagentur durchgeführten Ausschreibungen für EEG-Anlagen hergestellt werden kann.

In allen Darstellungen im Ergebnisteil werden jeweils das berechnete Leistungspotenzial und das abgeschätzte erschließbare Leistungspotenzial inklusive Unsicherheiten angegeben. Das berechnete Leistungspotenzial stellt dabei das Ergebnis der durchgeführten Simulationen dar, das im Rahmen der dargestellten Methodik exakt ist. Das erschließbare Leistungspotenzial ergibt sich über pauschal angewendete Abschlagsfaktoren (vgl. Kapitel 2.8)

In der folgenden Tabelle sind alle ermittelten Größen, die zu jeder Potenzialfläche ermittelt worden, übersichtshalber dargestellt.

Parameter	Einheit	Verknüpfte Aussage
Flächenpotenzial	m ²	Für einen PV-Generator zur Verfügung stehende Fläche
Leistungspotenzial	kWp bzw. MWp	Welche Leistung ist auf der Fläche installierbar?
Jahresenergiepotenzial	kWh/a	Welche Energie lässt sich pro Jahr durchschnittlich erzeugen?
Spezifisches Jahresenergiepotenzial	kWh/kWp/a	Welche Energie lässt sich pro Jahr im Durchschnitt pro installierte Leistung erzeugen? (Quotient aus Jahresenergiepotenzial und Leistungspotenzial)

Tab. 2: In dieser Studie verwendete Größen zur Quantifizierung des PV-Potenzials

2 Methodik

Für die Berechnung des Potenzials ist eine umfassende Datengrundlage zusammengetragen, analysiert und aufbereitet worden. Eine Übersicht zu den verwendeten Datengrundlagen, der Methodik sowie die Qualität der Daten wird in den folgenden Kapiteln beschrieben. Im Ergebnis der GIS-Analyse wird das berechnete Leistungspotenzial auf Grundlage der technischen Quantifizierung berechnet und pro Standort als Geodatenatz ausgegeben.

2.1 Aufbau der zu untersuchenden Flächenkulisse

Vor der eigentlichen Umsetzung des Projektvorhabens wurde in einem ersten Schritt eine umfassende Datenakquise durchgeführt und aus den zusammengetragenen Grundlagendaten für die Betrachtungsebenen Lärmschutzwände und -wälle, Gebäude, Parkflächen sowie Straßenbegleitflächen eine auf ihr PV-Potenzial hin zu untersuchende Flächenkulisse zusammengestellt.

2.1.1 Lärmschutzeinrichtungen

Zu Beginn der Datenakquise erfolgte eine Abfrage von Bestandsdaten zu Lärmschutzeinrichtungen und Geodaten zur Verkehrsinfrastruktur bei den einzelnen Bundesländern. Ansprechpartner stellten hierbei in erster Linie Landesbetriebe und Behörden dar, jedoch wurden z. T. auch mitzuständige Verkehrs- und Umweltministerien der Länder angesprochen. Bild 2 gibt einen Überblick über die aus den jeweiligen Bundesländern zur Verfügung gestellten Datengrundlagen, die im Zuge der Erstellung eines aktualisierten Katasters für Lärmschutzeinrichtungen (LSE) genutzt werden konnten.

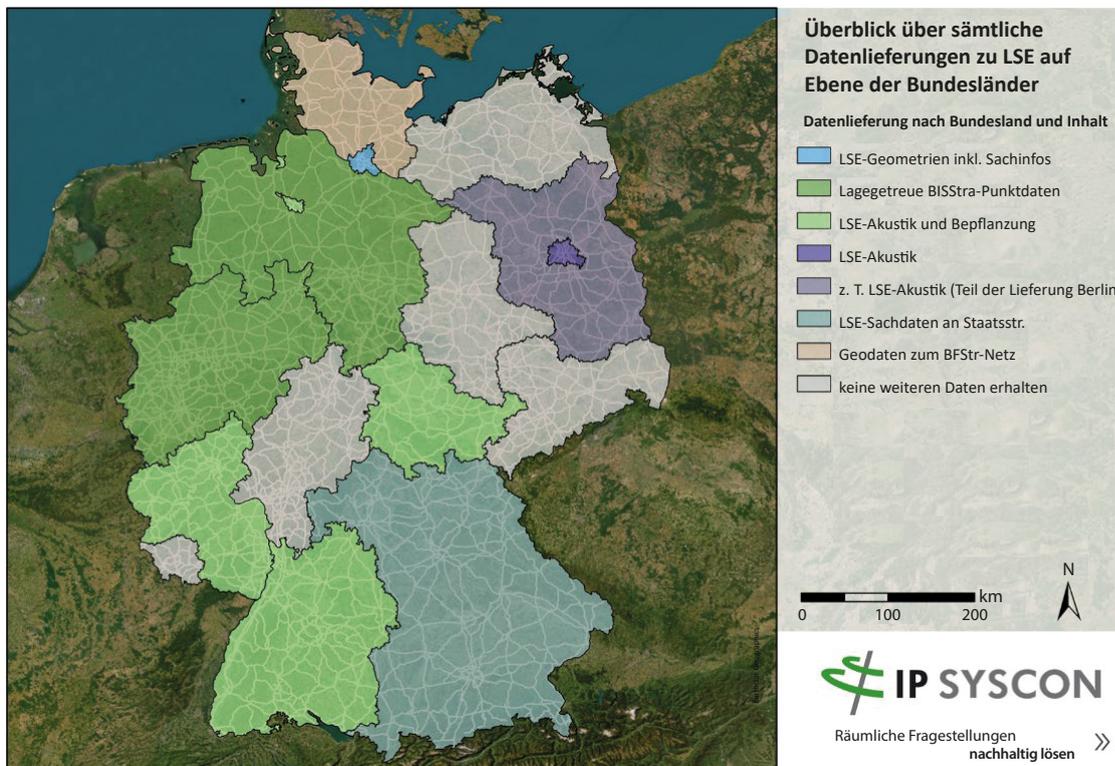


Bild 2: Überblick über Datenlieferungen zu Lärmschutzeinrichtungen auf Länderebene

Eine weitere Datengrundlage stellte die in tabellarischer Form gepflegte Datenbasis der Bauwerksdatenbank BISStra (Bundesinformationssystem Straße) dar. Diese wurde zusammen mit BISStra-Geodaten zum Bundesfernstraßennetz sowie zugehörigen Netzknotenpunkten von der BASt bereitgestellt. Weiterhin standen im Hinblick auf die Optimierung des LSE-Standortkatasters verschiedene Ebenen aus den jeweiligen Basis-Digitales Landschaftsmodell-(DLM)-Datensätzen der Bundesländer zur Verfügung. Diese Datensätze wurden vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde die frei nutzbare OpenStreetMap (OSM)-Datenbank verwendet, welche in ähnlicher Struktur wie die Basis-DLM-Daten nach Bundesländern und thematischen Ebenen gegliedert vorliegt.

Das „Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen sowie Wildbarrieren“ aus dem Jahr 2013 wurde im Zuge der Aktualisierung als Basis genommen und unter Hinzunahme der zuvor genannten Datensätze validiert und erweitert. So liegen beispielsweise innerhalb des Basis-DLM des jeweiligen Bundeslandes entsprechende LSE in lagegetreuer Verortung vor, welche die Lagegenauigkeit des alten Datenbestandes, d. h. des LSE-Standortkatasters von 2013, in aller Regel sichtbar übersteigt. Insbesondere in jenen Fällen, in denen im Zuge des vorangegangenen Forschungsvorhabens eine Verortung der LSE lediglich über Netzknotenpunkte entlang des BFStr-Netzes möglich war, bedeutet dies eine signifikante qualitative Verbesserung der Standortbestimmung. Sogar gegenüber solchen LSE, welche ursprünglich den Erfassungen der Bundesländer im Rahmen der Umgebungslärmrichtlinie entstammen, weist das Basis-DLM weitestgehend höhere Lagegenauigkeiten auf. Die nachfolgenden Bilder verdeutlichen in diesem Zusammenhang die Verbesserung des Raumbezugs verschiedener LSE.

Während die LSE-Geometrien des alten Standortkatasters (2013) grob verortet sind, insbesondere im rechten Beispiel als geradliniges Element, im linken zudem inmitten der Fahrbahnfläche verortet, weisen die aus aktuellen Basis-DLM-Daten (2022) stammenden Geometrien im direkten Vergleich sowohl eine höhere Detailliertheit in Hinblick auf ihren Verlauf als auch eine generell bessere Lagegenauigkeit auf. Im Zuge der Aktualisierung des LSE-Katasters wurden daher bevorzugt Geometrien aus dem Basis-DLM genutzt und gezielt aufbereitet.



Bild 3: Ausgewählte Beispiele je nach Datenquelle unterschiedlich räumlich verorteter LSE

Nach erfolgreicher Zusammenstellung der zu untersuchenden Geometrien der Lärmschutzwälle und -wände erfolgte die Zuordnung der zugehörigen Parameter wie Höhe und Baustoff. Über einen raumbezogenen Abgleich der LSE-Geometrie mit den verorteten BISStra-Daten wurden die Sachdaten aus den BISStra-Dateien mit den Geometrien verknüpft. Die Verortung der in BISStra aufgeführten Elemente erfolgte mittels der Informationen zu zugehörigen Netzknotenpunkten sowie der Länge des (Teil-)Bauwerks. Die neu verorteten BISStra-Geometrien wurden unmittelbar auf die Geometrie des zugehörigen BFStr-Abschnitts modelliert, da eine genauere Verortung aufgrund der fehlenden Information, auf welcher Straßenseite sich die LSE befindet, nicht möglich war. Dieser Abgleich mit den BISStra-Geometrien erfolgte zum Abschluss für das gesamte Bundesgebiet.

Das neue Lärmschutzkataster (2022) umfasst knapp 37.000 Geometrien von z. T. als Teilsegmente erfasste Lärmschutzeinrichtungen (LSE) innerhalb des Straßenraums der deutschen Bundesfernstraßen. Einen Einblick in das als Geodatenatz vorliegende Kataster vermitteln die nachfolgenden Bilder.

In Bild 4 sind die LSE differenziert nach den in der Attributtabelle des Lärmschutzkatasters geführten Bauwerkstypen dargestellt, wobei eine farbliche Gruppierung von Wall- (grün) und Wand-Geometrien (violett) vorgenommen wurde. Zusätzlich ist ein spezifischer Typ-Count angegeben, welcher der Gesamtanzahl des jeweiligen Bauwerkstyps entspricht. Dabei wird zum einen deutlich, dass innerhalb des aktualisierten Lärmschutzkatasters ein deutliches Übergewicht an Lärmschutzwand- gegenüber Wall-Geometrien besteht. Darüber hinaus ist insbesondere in dicht besiedelten Bundesländern wie NRW auch eine Kom-

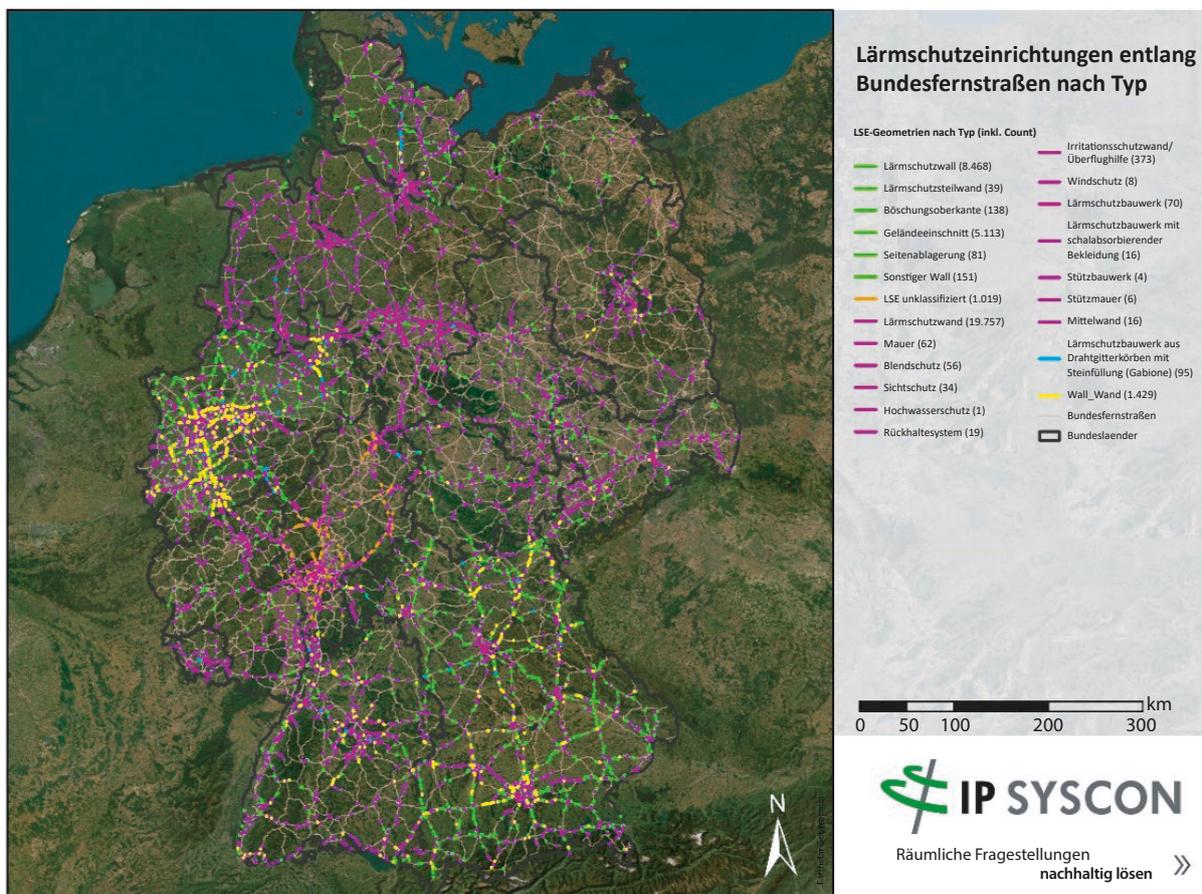


Bild 4: Überblick über die Lärmschutzeinrichtungen entlang BFStr nach Typ (inkl. Count)

bination von Lärmschutzwall- und Wand gegeben. Anteilsmäßig befinden sich die höchsten Zahlen an identifizierten Geometrien insbesondere in den Bundesländern Bayern, Nordrhein-Westfalen sowie den nördlichen Bundesländern Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern.

Die nachfolgenden Kartendarstellungen thematisieren demgegenüber die Herkunft der LSE-Geometrien sowie der Datenquelle LSE-Höhe. Auch hier wird ein zugehöriger Count mit angegeben. Zusätzlich fasst Bild 5 die Anteile der jeweiligen Datenquellen an der Summe aller LSE-Geometrien zusammen. Hierbei wird deutlich, dass rund zwei Drittel aller LSE-Geometrien des Katasters 2022 aus dem LSE-Kataster von 2013 herrühren. Eine Verbesserung der Datenlage konnte in erster Linie durch das Basis-DLM sowie im Speziellen durch jeweilige Datenlieferungen aus Berlin und Hamburg erreicht werden.

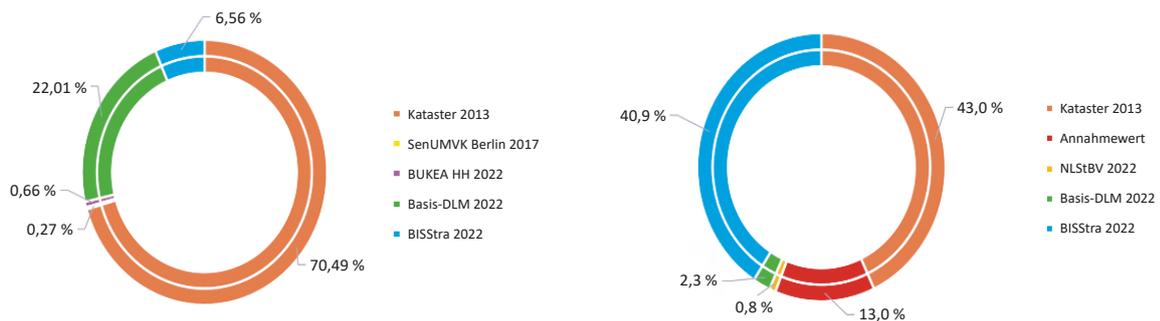


Bild 5: Anteil der Datenquelle für LSE-Geometrie (links) und LSE-Höhe (rechts) bezogen auf die Geometrie-Gesamtzahl

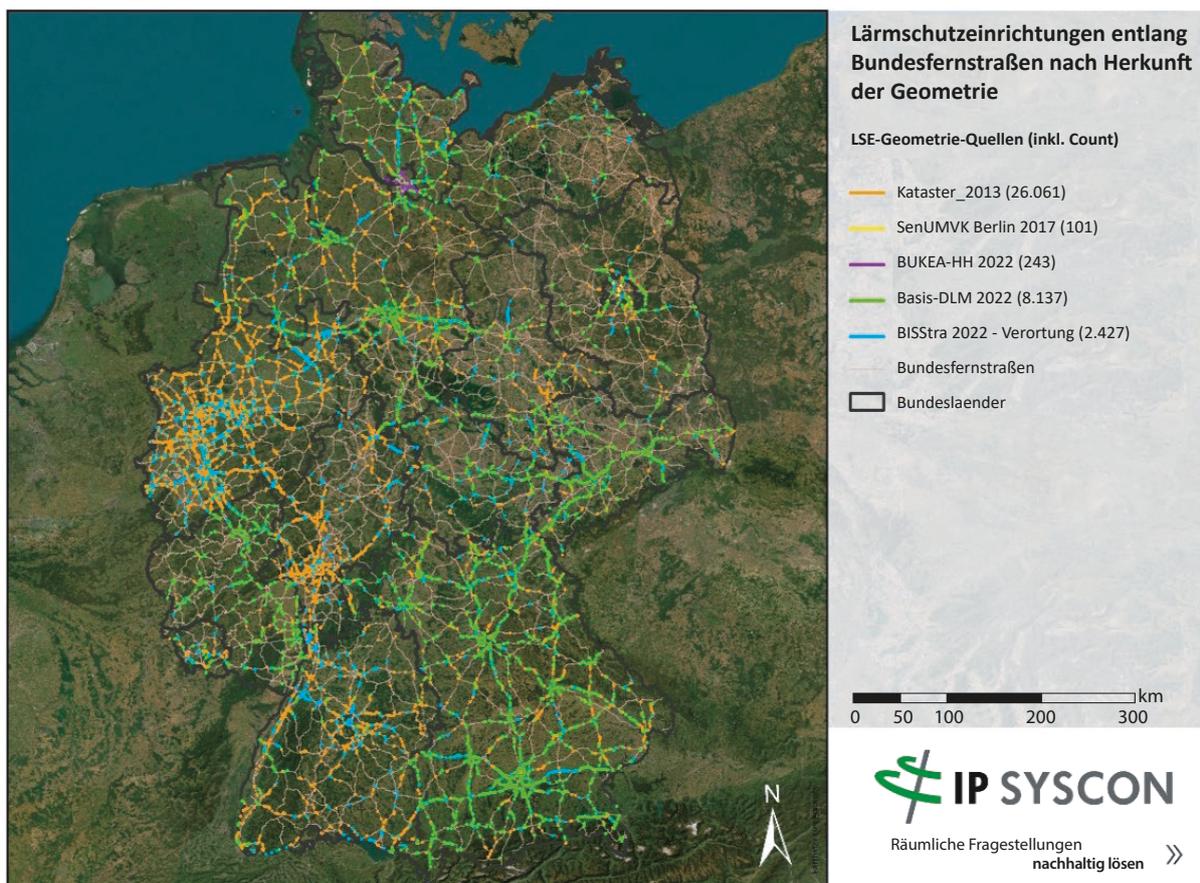


Bild 6: Überblick über die Lärmschutzeinrichtungen entlang von BFStr nach Herkunft der LSE-Geometrie (inkl. Count)

In insgesamt 833 Fällen (2,3 %) lag eine zugehörige Bauwerkshöhe aus den Basis-DLM vor. Weitere Höhenwerte stammen aus der BISStra-Datenbank oder wurden aus dem Kataster 2013 übernommen. In ca. 4.800 Fällen wurde die Höhe der LSE angenommen. Im Zuge einer statistischen Auswertung der angegebenen Bauwerkshöhen wurde für Lärmschutzwände eine Höhe von 3,5 m und für Wälle von 4 m festgestellt. Diese Höhenwerte werden als Annahmewerte für LSE-Geometrien übernommen, denen keine Höheninformationen zugeordnet werden konnte.

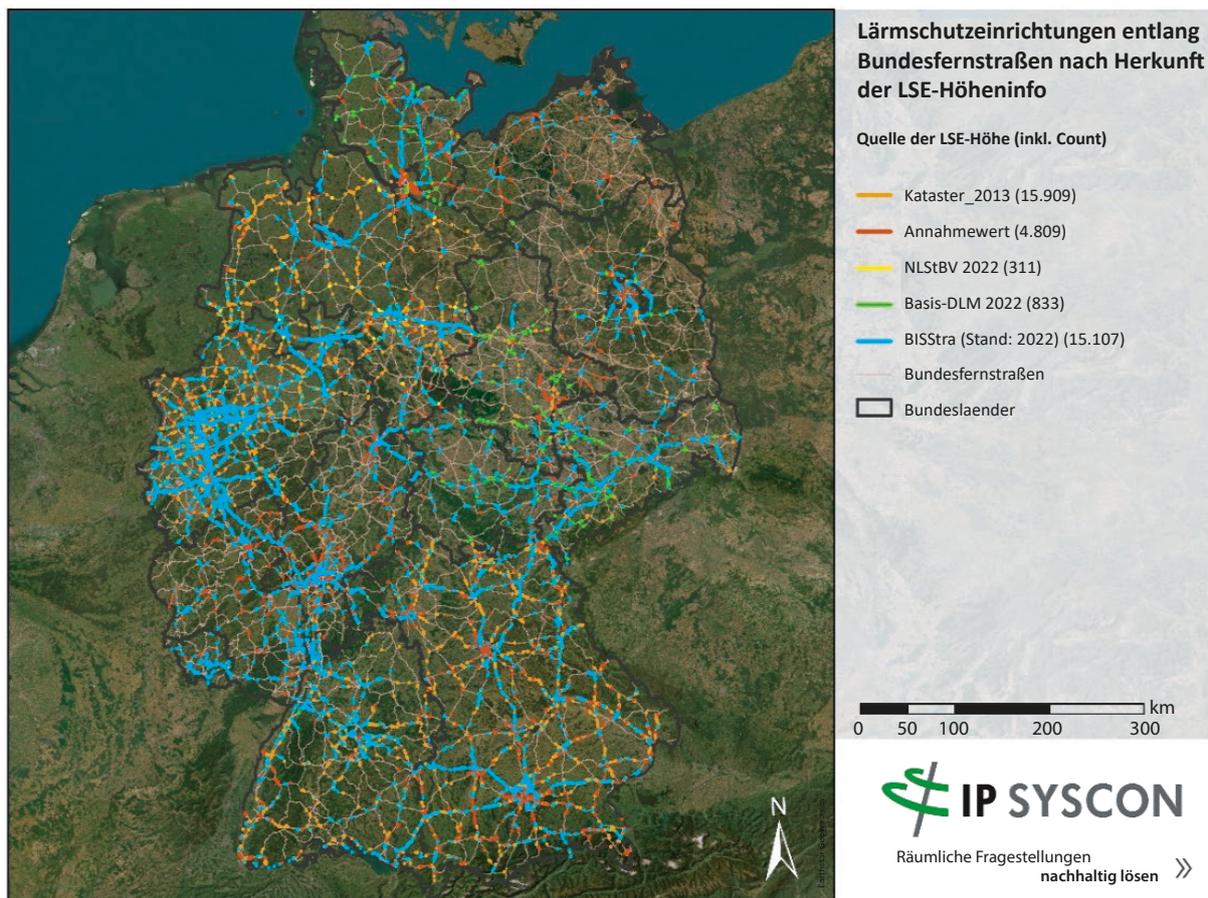


Bild 7: Überblick über die Lärmschutzeinrichtungen entlang von BFStr nach Datenquelle der LSE-Höhe (inkl. Count)

2.1.2 Gebäude

In der Potenzialanalyse für Gebäude lag der Fokus zum einen auf einer Betrachtung von Rastanlagen und zum anderen auf Straßen- und Autobahnmeistereien und Salzhallen. Als Basis für die Selektion von Rastanlagegebäuden, wie z. B. Gastronomie-, Toiletten- oder Tankstellengebäude dienen die vom BKG gelieferten Hausumringe (HU). Zur weiteren Ergänzung des Gebäudedatensatzes wurden OSM-Gebäudedaten sowie das Basis-DLM verwendet (jeweils Stand 2022). Hierbei konnte innerhalb der Basis-DLM-Daten und den Hausumringen gezielt nach der Gebäudefunktion (GFK) „Straßenmeisterei“ (31001_2411) gefiltert werden. Weitere Gebäude-Geometrien, darunter auch Salzhallen, v. a. aber weitere Meistereigebäude konnten durch das Einbinden von OSM-Daten ergänzt werden. Hierfür wurde eine Filterung der jeweiligen Gebäudebeschreibung (Attributfeld „name“) vollzogen.

Eine separate Kennzeichnung anderer spezifischer Gebäudetypen wie Salzhallen oder Verkehrsleitzentralen liegt in den verfügbaren Geodaten jedoch nicht vor. Über die Filterung bestimmter Gebäudefunktionstypen hinaus wurden Gebäude daher räumlich über ihre Nähe zum BFStr-Netz und ihre Lage auf bestimmten Flächen selektiert. So wurden die parallel zusammengestellten Flächen-Datensätze, welche u. a. an Parkflächen, Rastanlagen beinhalten, genutzt und die auf diesen Flächen befindlichen Gebäude dem Datensatz hinzugefügt. Auf diese Weise konnten insgesamt etwa 6.500 Rastanlagegebäude und mehr als 2.800 Meistereigebäude selektiert werden.

Auch hier ist zu bemerken, dass gemäß der Aufgabenstellung etwaige Zuständigkeiten und Besitzverhältnisse nicht berücksichtigt worden sind.

2.1.3 Parkflächen

Die lagegetreue Ausweisung von Parkflächen erfolgt innerhalb der OSM-Daten. Diese wurden entsprechend zusammengeführt und aufbereitet. Auch im Basis-DLM werden Rastanlagen ausgewiesen, jedoch wird hier nicht zwischen den eigentlichen Parkflächen und umliegenden Flächen und Verkehrswegen unterschieden. Bild 8 verdeutlicht diesen Unterschied am Beispiel einer Rastanlage in Niedersachsen. Die Rastanlagen- und die Verkehrsflächen werden im Basis-DLM sichtbar weiträumiger ausgeführt. Die Verkehrsfläche des OSM-Datensatzes hingegen ist etwas kleinteiliger gefasst und weist v. a. – wie oben bereits genannt – Parkflächen separat und detailliert aus, z. T. auch mit Information über die Art des Parkplatzes (z. B. Lkw-Parkfläche). Außerdem sind die ALKIS-Hausumringe mit abgebildet, die sich auf den Rastanlagenflächen befinden und auf dieser Grundlage als Gebäude der Rastanlagen identifiziert werden konnten. Speziell aufgrund der groben Ausweisung der Rastanlagenflächen wurden die Polygone nachbearbeitet und in diesen Zuge Gebäude-, Straßen- und Wege sowie Gewässer-Geometrien (z. B. Gräben, Teiche, Sickerbecken) sowohl aus OSM als auch aus dem Basis-DLM stammend herausgeschnitten. Um einen flächendeckenden Datensatz zu erhalten, wurden beide Datensätze zusammengeführt.

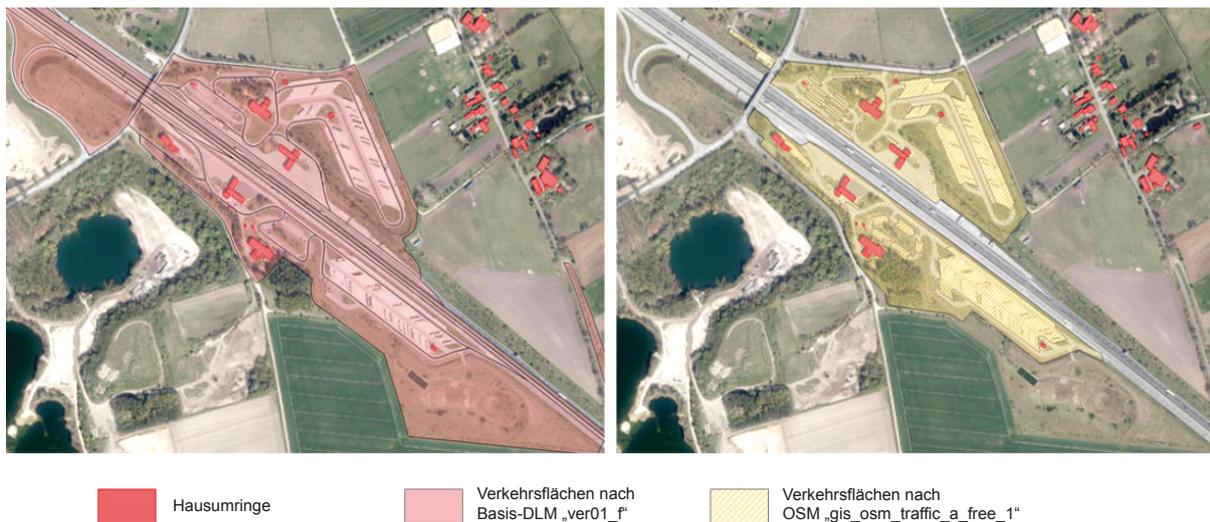


Bild 8: Vergleich der Verkehrsflächen eines ausgewählten Rasthofs inklusive Hausumringen nach Basis-DLM- und OSM-Daten (jeweils Stand 2022)

2.1.4 Straßenbegleitflächen

Im Zuge der Potenzialermittlung entlang der BFStr-Infrastruktur werden innerhalb eines Pufferbereiches um die BFStr zudem Straßenbegleitflächen betrachtet. Auch im Falle dieser Potenzialflächen wird die Datengrundlage von Basis-DLM- und OSM-Daten gebildet. Eine Gegenüberstellung der für die Aufbereitung wesentlichen Layer zeigt, wie Flächen zumeist unterschiedlich ausgewiesen werden. Der die Landnutzung widerspiegelnde OSM-Datensatz umfasst i. d. R. wie im dargestellten Ausschnitt eine Grobeinteilung in Wald-, Gras- und wenige weitere Vegetationsflächen, welche jedoch von der versiegelten Straßenfläche abgegrenzt sind. Dem gegenüber sind die Straßenbegleitflächen in den Daten des Basis-DLM generell ungenauer verortet, wobei sich entsprechende Polygongrenzen oftmals weit auf die Fahrbahn erstrecken.

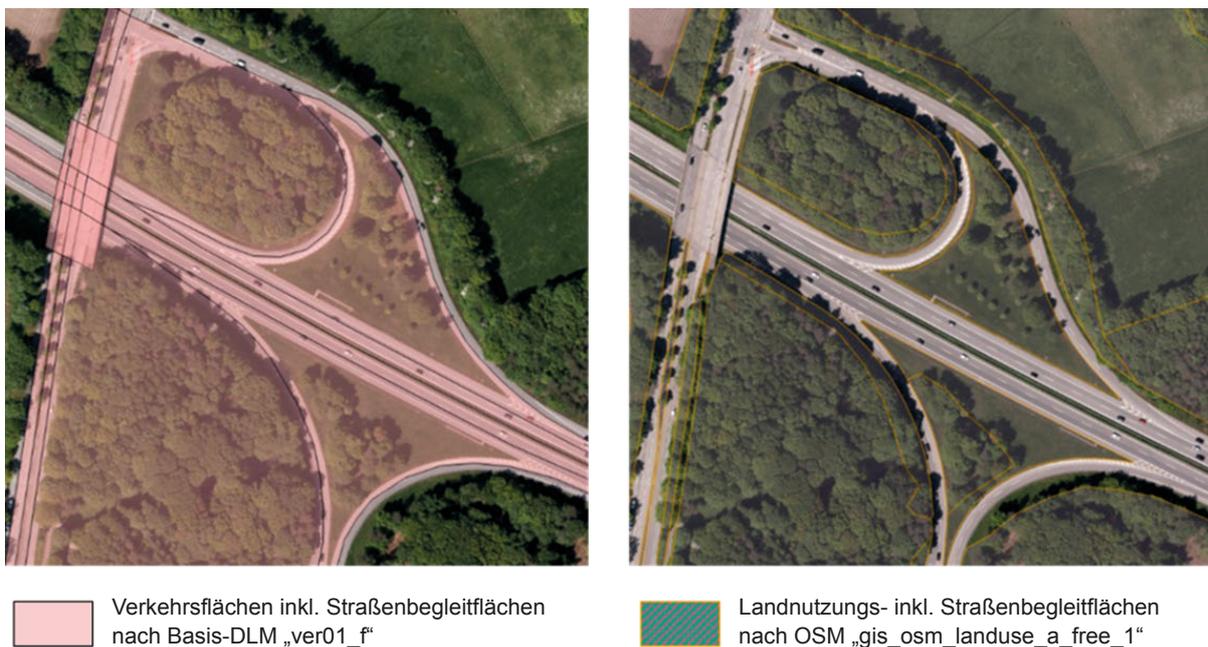


Bild 9: Vergleich von Straßenbegleitflächen eines ausgewählten BFStr-Abschnitts nach Basis-DLM und OSM-Daten (jeweils Stand 2022)

Ähnlich wie bei den Rastanlagenflächen wurden Gebäude-, Straßen- und Wege- sowie Gewässer-Geometrien (z. B. Gräben, Teiche, Sickerbecken) ausgeschnitten, um die Differenzierung der Begleitflächen zu verbessern. Dabei bestand ein Schwerpunkt in den Flächenausweisungen sog. „Ohren“ und ähnlicher Flächensegmente, die u. a. bei Ausfahrten und Autobahnkreuzungen etc. zu Stande kommen. Die Betrachtung von Straßenbegleitflächen erfolgte im Zuge der Geodatenaufbereitung zunächst bis zu einer maximalen Entfernung von 50 m bis zur nächstgelegenen BFStr-Geometrie. Der nach sämtlichen Verschneidungen veränderte Datensatz umfasst gegenüber der ersten Flächenauswahl einzelne Polygon-Features, die insbesondere an berücksichtigten Rastanlagen, Autohöfen o. ä. wesentlich weitere Abstände zur BFStr aufweisen. Dies lässt sich durch die Zerschneidung von Features erklären, die eingangs eine größere, unmittelbar an die Linien-Geometrie der BFStr angrenzende, z. B. aus Basis-DLM-Daten (Layer “ver01_f”) stammende Straßenbegleitfläche darstellten. Eine genaue Abgrenzung von BFStr-Verkehrsfläche zu anliegenden Nebenflächen, selbst mittels angenommener Fahrstreifenbreite und Anzahl, war aufgrund der insgesamt zu ungenauen Verortung der als Polylinie vorliegenden BFStr-Geometrien

nicht umsetzbar. Die Anbauverbotszonen um die BFSt (40 m bei Autobahnen, 20 m bei Bundesstraßen) sind daher im Datensatz der betrachteten Straßenbegleitflächen enthalten.

Auch eine Verkleinerung der Begleitflächen in Hinblick auf eine Einschränkung des Sichtfeldes des sog. Sichtdreiecke wurde im Rahmen dieser Datenaufbereitung nicht vorgenommen. Solche und weitere generelle Abschichtungen der Potenziale werden nachträglich über pauschale Abschläge vorgenommen.

Ein weiterer Grundlagendatensatz wurde im Laufe der Flächenaufbereitung seitens der BAST unterstützend zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich um eine tabellarische Auflistung von Rastanlagen und Autohöfen entlang der BFStr. Diese konnten in einen Punktdatensatz überführt und räumlich verortet werden. Zugehörige Sachinformationen zu Rastanlagenart und Betreiber (u. a.) konnten hierdurch z. T. an die Verkehrsflächen angefügt werden. Dieser abschließende Schritt kann später eine Differenzierung von privat und öffentlich bewirtschafteten Rastanlagen ermöglichen.

Weiterhin hatte die Einbindung mancher dieser Rastanlagen einschl. zugehöriger Begleitflächen zur Folge, dass auch in einem größeren Abstand zur BFStr (größer 50 m) Polygon-Features in den zu untersuchenden Gesamtdatensatz aufgenommen wurden. Dies ist vor allem lokal um die untersuchten Rastanlagen der Fall.

2.2 Ermittlung der solaren Einstrahlung

Für die Ermittlung der solaren Einstrahlung wurden ein Digitales Oberflächenmodell mit einer Gitterweite von 1 m (DOM1) sowie ein Digitales Geländemodell mit einer Gitterweite von 5 m (DGM5) als Grundlage herangezogen. Die Daten wurden vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Verfügung gestellt. Das DOM1 bildet dabei sämtliche Geländestrukturen inkl. Bebauung und Bewuchs ab. Das DGM5 bildet lediglich die Geländetopografie ab.

In der Regel erfolgt die Berechnung der solaren Einstrahlung allein auf Grundlage eines DOM, um auch die Verschattung durch Vegetation zu berücksichtigen. Für einige Bauwerke wurden allerdings gesonderte Modellierungen vorgenommen, um beispielsweise die Vegetation auf oder um diese Bauwerke herum gezielt herauszunehmen oder um eine Aufständigung zu simulieren. Die vorgenommenen Modellierungen werden für die betreffenden Bauwerke im Folgenden beschrieben:

Lärmschutzwände

Die Potenziale für Photovoltaik auf Lärmschutzwänden wurden für horizontale Aufsätze ermittelt. Der unterschiedliche Datenbestand je nach Bundesland erschwerte eine einheitliche Betrachtung vertikaler PV-Installationen. Für vertikale Installationen hätte eine Fallunterscheidung nach Himmelsausrichtung und Höhe erfolgen müssen, was den Aufwand für eine flächendeckende deutschlandweite Analyse signifikant erhöht hätte. Auch aufgrund der Datengrundlage bot es sich daher an, horizontale PV-Aufsätze zu betrachten, da diese auch aus lärmschutztechnischen Aspekten eine bevorzugte Annahme darstellen. Detaillierter wird darauf in Kapitel 3.2.5 eingegangen.

Um die Einstrahlungsberechnung durchzuführen, wurden die Polygonlinien der Lärmschutzwand mit vorhandenen Höheninformationen in das DOM hineinmodelliert, wobei in einem Puffer von 4 m um die Lärmschutzwand das DGM genutzt wurde. Durch diese Vorgehensweise wurde die Vegetation direkt am Standort der Lärmschutzwand ausgeblendet, da im Falle einer PV-Installation damit zu rechnen ist, dass die Wand freigeschnitten wird.

Durch die DOM-Informationen im Umfeld konnte die Einstrahlungsberechnung jedoch Geländedetails, Bäume und andere Verschattungsobjekte in näherer Umgebung berücksichtigt werden. Die Einstrahlungsberechnung erfolgte für die Polygonlinie in Höhe der Oberkante der Lärmschutzwand. Bei fehlenden Höheninformationen wurde der Durchschnitt der bekannten Höhen von 3,5 m je Lärmschutzwand ausgegangen. Auf jede Wand wurde ein horizontaler Aufsatz mit 1 m Breite modelliert, sodass die Einstrahlung auf eine ebene Fläche berechnet wurde. Eine Begründung für die Wahl dieser Methodik liefert Kapitel 3.1.

Lärmschutzwälle

Für die Analyse der Lärmschutzwälle wurden die als Linienfeatures im Kataster vorliegenden Wallstrukturen in das DOM modelliert. Zur Modellierung wurde ein Verhältnis von 1 zu 1,5 von Höhe zu Breite angesetzt. So kommt eine Hangneigung von $33,7^\circ$ zustande (vgl. Bild 10). Dieses ist in der Praxis das gängige verwendete Verhältnis. Ist die Höhe nicht im Kataster vermerkt gewesen, wurde der über alle bekannten Wallhöhen ermittelte Mittelwert von 4 m angewendet. Auf den Wallstrukturen wurde keine Vegetation berücksichtigt. Am unteren Rand der Lärmschutzwälle wurde auf der straßenzugewandten Seite zudem ein 3 m breiter Schutzstreifen berücksichtigt, auf dem keine Module errichtet werden sollten, da dort die Gefahr von Steinschlag oder Schneewurf im Zuge von Räumarbeiten besteht. Der Wert wurde mit den Expert*innen aus dem Betreuerkreis der Studie als gemeinsame Einschätzung festgelegt. Jedoch liegen hierzu keine Datengrundlage und kein Fachwissen vor, sodass es sich bei dieser Annahme um eine Einschätzung handelt. Für die reale Umsetzung ist die örtliche Situation wie z. B. Abstand des Lärmschuttwalls zur Straße, Fahrzeurückhaltesysteme, Schneezone, Blendung etc. abhängig. Das muss jedoch lokal geprüft werden. In Bild 10 ist der Querschnitt eines Lärmschuttwalls mit PV-Fläche (blau) skizziert, um zu verdeutlichen, welcher Teil des Hangs mit PV-Belegung vorgesehen ist. Weitere Annahmen sind in Kapitel 2.3.2 aufgeführt.

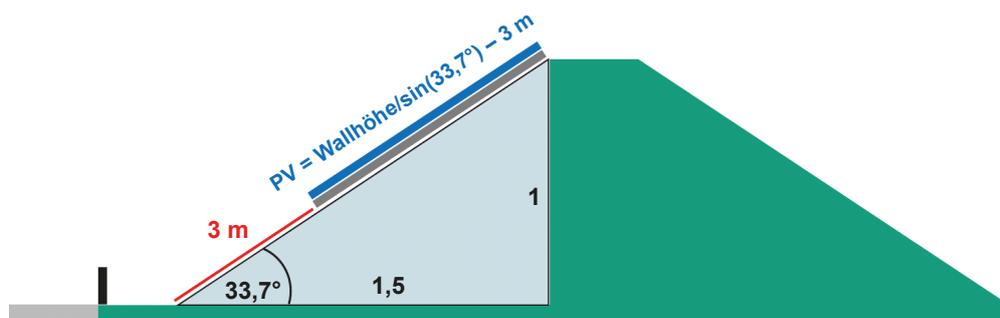


Bild 10: Querschnitt PV-Lärmschutzwall

Parkflächen

Für die Ermittlung der solaren Einstrahlung auf Parkflächen wurde auf den entsprechenden Flächen eine Aufständering der Module auf 5,2 m Höhe simuliert. Im DOM wurde dazu auf den Flächen eine ebene Fläche in der benannten Höhe modelliert. Die Einstrahlung wurde in der Einstrahlungsberechnung somit auf die ebene Fläche simuliert und dann die Einstrahlung für eine Südaufständering auf 30° zum Vergleich mit ausgegeben. Die Potenzialberechnung erfolgt für auf 30° Süd aufgeständerte Module.

Zur Kalibrierung der Einstrahlungsanalysen auf die zu untersuchenden Bauwerke und Flächen wurden Daten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) herangezogen. Die amtlichen Globalstrahlungsdaten werden gemittelt über den letzten 30-Jahre-Zeitraum (1991 bis 2020) und sowohl für direkte als auch diffuse Einstrahlungsverhältnisse in einem 1km-Rasterformat herausgegeben und bildeten so gemeinsam mit den vom BKG erhaltenen DOM1-Rasterdaten die Berechnungsgrundlage für die lokale jährliche Einstrahlung. Die im monatlichen Mittel bundesweit vorliegenden Einstrahlungsraster des DWD gewährleisteten eine präzise Ermittlung der je nach Einstrahlungswinkel und Objektausrichtung variierenden spezifischen Einstrahlung für beispielsweise LSE, Gebäudedach- oder Straßenbegleitflächen.

Flächen, die zu mehr als 20 % pro Jahr verschattet sind, wurden als zu verschattet gekennzeichnet und in der Ausweisung als Potenzialfläche nicht berücksichtigt.

Im folgenden Bild ist das Ergebnis einer Einstrahlungsberechnung am Beispiel einer Rastanlage verdeutlicht. Zu sehen ist hier das die höchste Einstrahlung auf die südlich bzw. süd-westlich ausgerichteten Schrägdächer erfolgt. Die Parkflächen haben aufgrund der horizontal angenommenen Ausrichtung der Module eine geringe Einstrahlung. Die homogene Farbcodierung zeigt jedoch, dass es hier kaum zu Nahverschattungseffekten kommt. Bei dem gezeigten Lärmschutzwall kommt es vor allem im unteren Bereich der Wallkrone zu deutlichen Nahverschattungseffekten. Die reduzierte Einstrahlung auf der Nord-West-Seite des Walls ist vor allem bedingt durch die Ausrichtung.

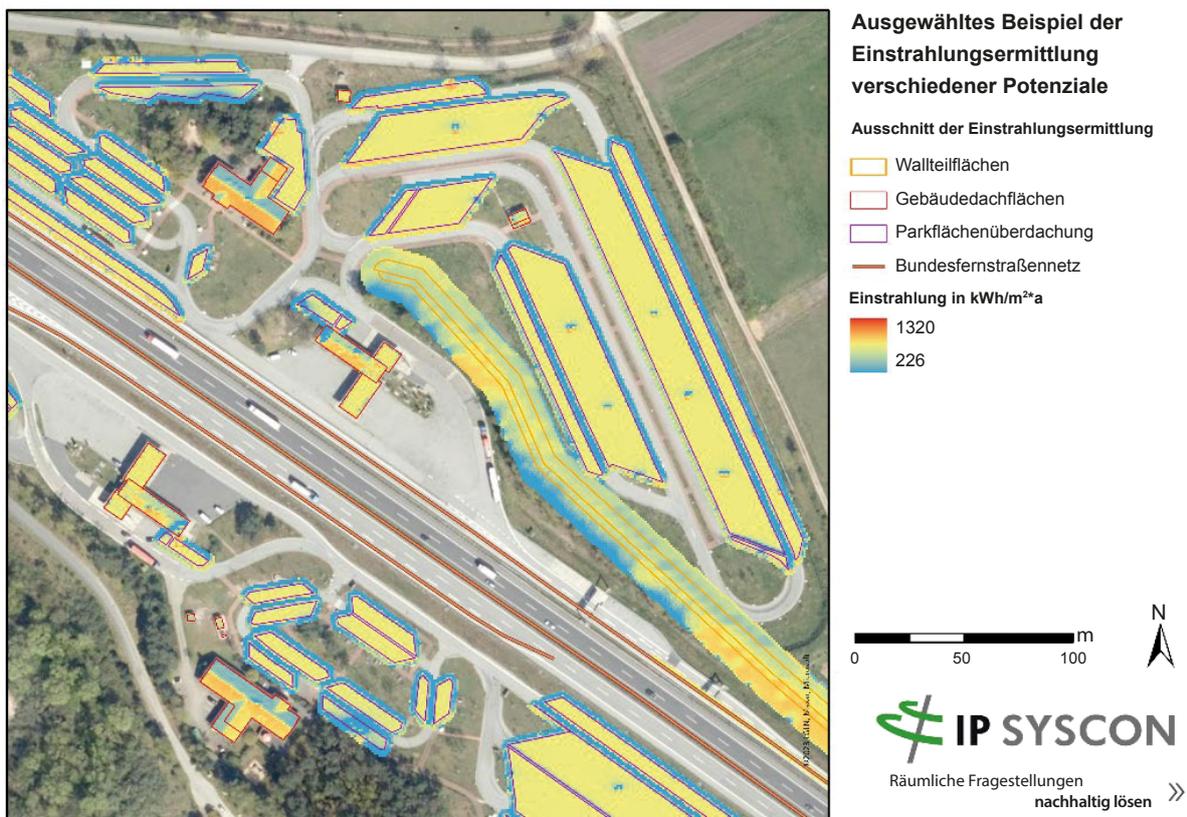


Bild 11: Beispiel einer Rastanlage mit ermittelter jährlicher Einstrahlung auf den unterschiedlichen, dort vorhandenen Anwendungsfällen

2.3 Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials zur PV-Nutzung

Zur Ermittlung des technischen Potenzials zur PV-Nutzung an Bundesfernstraßen wurden je betrachteter Fläche oder Bauwerk Annahmen getroffen, die im Folgenden aufgeführt werden.

2.3.1 Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Lärmschutzwänden

Zur Berechnung des technischen PV-Potenzials auf horizontale Aufsätze auf Lärmschutzwänden müssen Annahmen zu den technischen Rahmenbedingungen getroffen werden. Dies betrifft u. a. die Moduleffizienz und die Performance Ratio. Im Jahr 2022 im Massenmarkt angebotene PV-Module haben laut 12. Edition ITRPV von 2020 unter Standard Test Bedingungen (STC) im Durchschnitt eine Moduleffizienz zwischen 20,7 % (PERC), und 21,79 % (TOPCon) bzw. 21,99 % (SHJ). Für diese Studie wird von einer Moduleffizienz von 20,7 % ausgegangen, was eine konservative Annahme ist. Dies entspricht dem mittleren Modulwirkungsgrad für p-type PERC/PERT/PERL Zellen, welche zuletzt und momentan in 2023 noch den Weltmarkt dominieren. Zum Ende der Studie liegt nun die 14. Edition ITRPV vor, bei der sich allein die p-type PERC Effizienz auf 21,4 % erhöht hat. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass sich der Modulwirkungsgrad noch stetig verbessert und bereits heute für SHJ und TOPCon zwischen 22 % und 23 % liegt. In den nächsten Jahren sind Modulwirkungsgrade bis über 24 % erwartet, was gegenüber den in der Studie angenommenen 20,7 % eine mögliche Leistungssteigerung und damit auch Potenzialsteigerung um bis zu 16 % auf gleicher Fläche entspricht.

Die elektrische Nennleistung von PV-Modulen ist im Realbetrieb von netzgekoppelten PV-Kraftwerken nicht in dieser Höhe abrufbar, da der Betrieb mit weiteren Verlusten verbunden ist, die in der Kennzahl Performance Ratio (PR) aggregiert werden.

Im PR werden Verluste durch erhöhte Betriebstemperaturen von PV-Modulen, variablen Einstrahlungsbedingungen, Verschmutzung, Leitungswiderständen, Wandlungsverlusten des Wechselrichters, Spitzenkappung des Wechselrichters (DC/AC-Verhältnis > 1) und Ausfallzeiten veranschlagt (WIRTH, 2023). Betriebstemperaturen von PV-Modulen liegen üblicherweise nicht bei 25 °C wie unter STC gemessen, sondern bei der „Nominal Module Operating Temperature“ von ca. 45 bis 50 °C. Bei gut hinterlüfteten PV-Modulen ist daher aufgrund niedrigerer Temperaturentwicklungen ein höherer Energieertrag möglich.

Übliche Werte des PR liegen zwischen 80 % bis 90 % (WIRTH, 2023). Für diese Potenzialstudie soll von einem mittleren PR von 80 % ausgegangen werden.

Die Moduleffizienz bzw. der Wirkungsgrad der Module sowie die Performance Ratio werden für alle betrachteten Potenzialflächen einheitlich angenommen.

In Tabelle 3 sind die angenommenen Parameter zur Berechnung des technischen PV-Potenzials auf Lärmschutzwänden zusammengefasst. Eine Begründung für die Wahl der Parameter liefert zudem Kapitel 3.1.

Parameter Beschreibung	Annahme
Angenommene Modulfläche je Meter Lärmschutzwand	1 m ² bei PV-Aufsatzlösung
Wirkungsgrad eines Moduls	20,7 %
Modulneigung	0°
Performance Ratio	0,8
m ² je kWp Leistung	4,83 m ² für 1 kWp
Mindestertrag	650 kWh/kWp
Mindestflächengröße	5 m ²

Tab. 3: Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Lärmschutzwänden

2.3.2 Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Lärmschutzwällen

Die Wälle werden, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, in das Oberflächenmodell modelliert. Weitere angenommene Parameter sind in Tabelle 4 aufgeführt. Eine Begründung zur Methodik ist Kapitel 3.2 zu entnehmen.

Parameter Beschreibung	Annahme
Wirkungsgrad eines Moduls	20,7 %
Performance Ratio	0,8
Modulneigung = Neigung des Hangs	Verhältnis Höhe zu Breite 1:1,5 ca. 33,7°
m ² je kWp Leistung	4,83 m ² für 1 kWp
Mindestertrag	650 kWh/kWp
Mindestflächengröße	50 m ²

Tab. 4: Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Lärmschutzwällen

2.3.3 Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Dachflächen

Auf Meistereigehöften, Salzhallen, Rastanlagen und PWC-Häuschen wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Parameter zur Berechnung des technischen Potenzials angenommen. Bei einer Neigung von unter 10° wurden Dachflächen zudem als Flachdächer ausgewiesen. Auf Flachdachflächen wurde von einer Aufständering der Module ausgegangen. Bei einer Aufständering nach Süden wurden die Module mit einer Neigung von 20° aufgestellt. Um gegenseitige Verschattung der Flächen zu vermeiden, ist dabei ein Abstand zwischen den Modulreihen einzuplanen. Die Flächennutzung bei dieser Art der Aufständering betrug daher 50 %. Ebenso wurde das Potenzial bei einer Aufständering in Ost/West-Richtung ermittelt. Die Module wurden dabei mit einer Neigung von 10° aufgestellt. Die Flächennutzung liegt aufgrund der geringeren Neigung bei 80 %. Bei geneigten Dächern wurden die Module dachparallel installiert. Um kleinere Aufbauten auf dem Dach zu berücksichtigen,

die durch die Auflösung des DOM mit 1 m Rasterweite möglicherweise nicht erkannt werden, wurde für geneigte Dächer zudem ein Flächennutzungsgrad von 95 % angenommen.

Parameter Beschreibung	Annahme
Wirkungsgrad eines Moduls	20,7 %
Performance Ratio	0,8
m ² je kWp Leistung	4,83 m ² für 1 kWp
Nettomodulfläche	1,66 m * 0,99 m
Bruttomodulfläche	1,7 m * 1,02 m
Mindestertrag	650 kWh/kWp
Mindestgröße der geeigneten Dachfläche	5 m ²
Mindestanzahl der Module je Dachteilfläche	1

Tab. 5: Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Dachflächen

2.3.4 Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Parkflächen

Auch wenn in verschiedenen Bundesländern bereits eine Pflicht zur solaren Nutzung von Parkflächen ab 150 Stellplätzen besteht, sind aktuell noch nicht viele solar überdacht. Die identifizierten Standorte wurden bzgl. der folgenden Rahmenbedingungen und des hier vorhandenen PV-Potenzials berücksichtigt. Die Randbedingungen wurden zusammen mit Industrieunternehmen, die solare Parkplatzanlagen errichten, erarbeitet. Grundsätzlich können die Überdachungen vollflächig über die gesamte Parkfläche ausgeführt werden (Konzept A) oder nur über den Standflächen (Konzept B). In den meisten Fällen wird die Überdachung gemäß Konzept B realisiert, da die bau- und brandschutzrechtlichen Vorgaben hier niederschwelliger sind. Wie bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben, weist die Datengrundlage Parkflächen auf Rastanlagen in unterschiedlicher Qualität aus. Entsprechend wurden im Zuge der Methodenentwicklung Faktoren ermittelt, mit denen die Parkplatzflächen von den Straßenbegleitflächen und Fahrwegen abgegrenzt werden. Eine räumliche Abgrenzung war auf Grundlage der bestehenden Datenlage in vielen Fällen nicht möglich. Daher wurde für die Parkflächen eine pauschale prozentuale Belegung umgesetzt. Für Konzept A wurde aus Beispielbetrachtungen einzelner Referenzprojekte ein Wert von 80 % ermittelt, im Konzept B von 60 %. In der Potenzialberechnung wurde pauschal ein Flächennutzungsgrad von 60 % festgelegt.



Bild 12: Konzept A mit vollflächiger solarer Überdachung © ClickCon GmbH & Co. KG



Bild 13: Konzept B mit solarer Teilüberdachung über den Stellplätzen © ClickCon GmbH & Co. KG

Als Höhe der PV-Anlage konnte ein Wert von ca. 5,2 m angenommen werden. Dieser ergibt sich aus der Durchfahrtshöhe von 4,2 m + 1 m für die Aufständigung der Module. Um Verschattungsverluste zu reduzieren, können die Anlagen mit sehr geringen Aufstellwinkeln im Bereich von 5 – 10° realisiert werden. Bei noch flacheren Winkeln ist die Selbstreinigung der Module zu schlecht, sodass die Ertragsverluste durch die damit einhergehende Verschmutzung zu groß bzw. sehr kurze Reinigungsintervalle nötig wären. Im Rahmen der Einstrahlungsberechnung wurde die Einstrahlung auf die ebene Fläche bestimmt. Daraufhin wurde die Einstrahlung zur Potenzialermittlung für eine optimale Aufständigung der Module auf 30° Süd ermittelt und eingesetzt.

Eine Installation kann sowohl in Süd- als auch in Ost-West-Ausrichtung erfolgen. Bei reinen Einspeiseanlagen ist die Südausrichtung zu bevorzugen. Bei Eigenverbrauchsanlagen mit üblichen Verbrauchsprofilen ist in den meisten Fällen eine alternierende Ost-West-Ausrichtung optimal. Zur Ermittlung des technischen Potenzials zur PV-Nutzung auf Parkflächen an Bundesfernstraßen bzw. auf Rastanlagen wurden die in Tabelle 6 aufgeführten Parameter verwendet.

Parameter Beschreibung	Annahme
Performance Ratio	0,8
Höhe der Aufständigungskonstruktion	5,2 m
Angenommene Modulneigung	30°
Wirkungsgrad oder Leistung eines Moduls bezogen auf die Modulgröße	20,7 %
m ² je kWp Leistung	4,83 m ² für 1 kWp
Mindestertrag	650 kWh/kWp
Mindestflächengröße	50 m ²

Tab. 6: Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Parkflächen

2.3.5 Annahmen zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Straßenbegleitflächen

Auf Straßenbegleitflächen wurden die in Tabelle 7 aufgeführten Parameter zur Berechnung des technischen Potenzials angenommen. Bei einer Neigung von unter 10° werden die Freiflächen zudem als flach ausgewiesen. Auf Flachflächen wurde von einer Aufständering der Module ausgegangen. Bei einer Aufständering nach Süden werden die Module mit einer Neigung von 20° aufgestellt. Um gegenseitige Verschattung der Flächen zu vermeiden, ist dabei ein Abstand zwischen den Modulreihen einzuplanen. Die Flächennutzung bei dieser Art der Aufständering beträgt daher 50 %. Bei geneigten Flächen werden die Module parallel zur Hangneigung installiert.

Parameter Beschreibung	Annahme
Wirkungsgrad oder Leistung eines Moduls bezogen auf die Modulgröße	20,7 %
Performance Ratio	0,8
m ² je kWp Leistung	1 kW = 4,83 m ²
Mindestflächengröße	100 m ²

Tab. 7: Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Straßenbegleitflächen

2.4 Implementierung von Netzverknüpfungspunkten

2.4.1 Abschätzung Netzanschlusskosten

Um die Netzanschlusskosten zu bestimmen, werden alle Anlagestandorte mit den Koordinaten und der Nennleistung berücksichtigt. In einem ersten Schritt werden für alle Anlagestandorte das nächstgelegene Hochspannungs-Mittelspannungs-Umspannwerk bestimmt und anschließend der kürzeste, über Straßen erreichbare Weg, wie auch die Luftlinie zum potenziellen PV-Park ermittelt. Anschließend werden, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, alle Cluster identifiziert. Im nächsten Schritt werden für alle Cluster, mit der kumulierten Nennleistung je Cluster (P_{CL}) die nächstgelegenen Netzverknüpfungspunkte ermittelt und der kürzeste, über Straßen erreichbare Weg und die Luftlinie zum Clusterschwerpunkt des PV-Park definiert. Mit aus früheren Projekten bekannten Kosten für die Verlegung von Hoch-, Mittel-, und Niederspannungskabeln werden die Netzanschlusskosten bei Neuverlegung bestimmt. Kosten für den Netzanschluss, wenn der Anschluss der Liegenschaft ausreichend dimensioniert ist, bzw. nur erweitert werden muss, können so weit nicht festgelegt werden, da ein möglicher Verbrauch am Anlagestandort unbekannt ist.

Parameter Beschreibung	Annahme
$P_{CL} < 135 \text{ kW}$	Niederspannung
$135 \text{ kW} \leq P_{CL} < 950 \text{ kW}$	Mittelspannung
$950 \text{ kW} \leq P_{CL}$	Hochspannung

Tab. 8: Angenommene Parameter zur Ermittlung möglicher Netzverknüpfungspunkte. Einordnungen gemäß VDE 42.

Da nur für Mittelspannungs- und Hochspannungsknoten Koordinaten verfügbar sind, wurden in diesem Projekt nur Mittel- und Hochspannungsknoten als mögliche Netzverknüpfungspunkte berücksichtigt.

Parameter Beschreibung	Annahme: Kosten je km
MS-Kabel	160.000 €
HS-Kabel	1.100.000 €

Tab. 9: Kostenabschätzung Netzanschluss

Bei der Installation der Betriebsmittel wird davon ausgegangen, dass die jeweiligen Netzverknüpfungspunkte über ausreichende Kapazitäten verfügen. Die reale Auslastung ist unbekannt. Kosten für weitere Transformatoren bei fehlender Kapazität oder andere Netzanschlusskonzepte wie beispielsweise redundante Ausführung finden keine Beachtung. Lokale Gegebenheiten wie spezifische Kosten für Tiefbauarbeiten und Preise für Grund und Boden, z. B. städtisches oder ländliches Umfeld können darüber hinaus wichtigen Einfluss haben, der nicht weiter berücksichtigt werden kann.

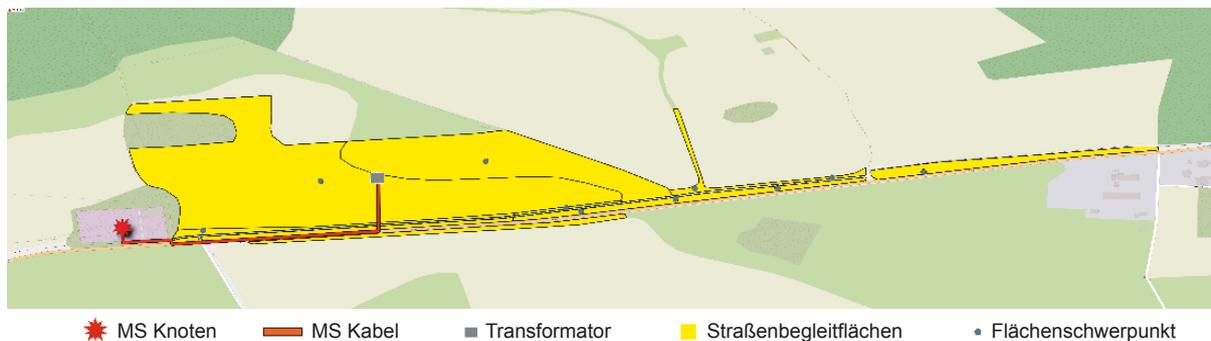
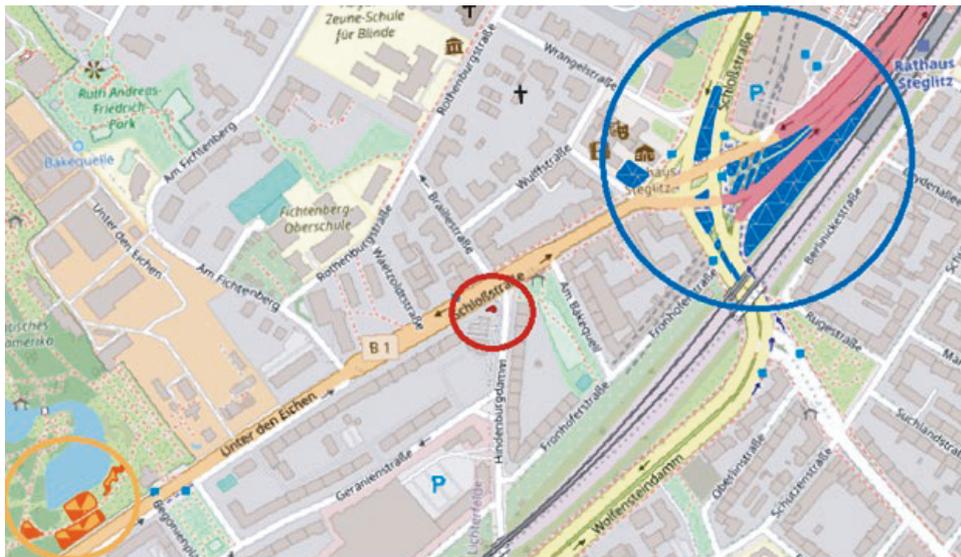


Bild 14: Installation von Straßenbegleitflächen

2.5 Clusterbildung

Für alle Anlagestandorte werden zuerst, wie unter Kapitel 2.4 beschrieben, das nächstgelegene Hochspannungs-Mittelspannungs-Umspannwerk ermittelt. Anschließend werden die Geometrien der potenziellen PV-Anlagen je Umspannwerk um 200 Meter vergrößert. Alle potenziellen PV-Anlagen, bei denen sich die erweiterten Geometrien schneiden, werden als ein Cluster bestimmt. Alle sich nicht schneidenden Geometrien ergeben für sich eigene Cluster. Für jedes Cluster wird der Clusterschwerpunkt berechnet; dafür werden die Koordinaten der Anlagen mit der jeweiligen Erzeugung gewichtet und darauf basierend der gewichtete Zentroid berechnet. Basierend auf den Anlagestandorten konnten so 18.291 Cluster bestimmt werden.



Cluster 1

Cluster 2

Cluster 3

Bild 15: Clusterbildung für PV-Anlagen mit selben Netzverknüpfungspunkt

2.6 Rechtliche Rahmenbedingungen bei der Belegung mit PV-Modulen

In Deutschland sind insbesondere das Baurecht, das Naturschutzrecht und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) für die Errichtung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen relevant. Das Baurecht regelt die Baugenehmigungsverfahren und Bauvorschriften für solche Anlagen. Das Naturschutzrecht schützt die Umwelt und regelt den Umgang mit geschützten Tier- und Pflanzenarten sowie mit natürlichen Lebensräumen. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) regelt die Vergütung und Einspeisung des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms. Dabei kann sich die Gesetzeslage von Bundesland zu Bundesland unterscheiden. Weiter sind weiche Lenkungskriterien z. B. in den Landesentwicklungsplänen zu finden. In dieser Studie wird das Hauptaugenmerk auf die in Tabelle 10 genannten Gesetze gelegt. Gesetze können restriktive und begünstigende Wirkung auf PV-Anlagen haben. Die räumliche Ausdehnung des Anwendungsraums der Gesetze wird im GIS-Tool als grafischer Layer, welche bei Interesse eingeblendet werden können, integriert.

Auch sei nochmals erwähnt, dass bei den betrachteten Flächen die Zuständigkeiten und Besitzverhältnisse gemäß Aufgabenstellung nicht berücksichtigt wurden.

Gesetz	Paragraph	Eigenschaften	Umsetzung
EEG-Flächen	§ 37 Abs. 2c	Seitenrandstreifen entlang von Bundesfernstraßen und Schienenwegen 500 m	Puffer 500 m
BauGB	§ 35 Abs. 1 Nr. 8	200 m (BAB, Hauptschienenwege)	Puffer 200 m
FStrG	§ 9 Abs. 1	Anbauverbotszone, 40 m (BAB) bzw. 20 m (BFSt)	Puffer 40 m, 20 m

Tab. 10: In das GIS-Tool integrierte Gesetze

2.7 Validierung der PV-Ertragsprognosen

Um die in Kapitel 2.2 beschriebene flächendeckende Berechnung der PV-Ertragsprognosen zu validieren, wurden Ertragsberechnungen mit der am Fraunhofer-ISE entwickelten Simulationssoftware Zenit© erstellt. Zenit© wird seit mehreren Jahren in der Erstellung von Ertragsgutachten für PV-Kraftwerke von größeren Aufdachanlagen bis zu Großanlagen mit mehreren MWp eingesetzt. Zenit© berechnet in Zeitschritten von 10 Minuten die Energieerzeugung einer PV-Anlage. Für die Simulation werden Wetterdaten der letzten 10 Jahre als Eingangswerte verwendet. Das Ergebnis der Simulation ist der jährlich erwartbare Energieertrag der installierten PV-Anlage. Zur Validierung wurden für repräsentative Standorte Ertragsimulationen erstellt. Um eine Aussage über den Energieertrag zu allen in dieser Studie betrachteten Standorten tätigen zu können, wurden die Ergebnisse der Standorte interpoliert. Dabei wird vereinfacht davon ausgegangen, dass Regionen mit einer ähnlichen jährlichen Einstrahlungssumme ähnliches Wetter erfahren. Ziel dieses Ansatzes ist es, die Inhomogenität der Einstrahlung innerhalb Deutschlands abzubilden ohne flächendeckende Simulationen durchführen zu müssen. Es wurden 5 signifikante Standorte anhand der verfügbaren jährlichen solaren Einstrahlung und ihrer Verteilung in Deutschland ausgewählt. Für diese Standorte wurden hochaufgelöste Wetterdaten, darunter maßgeblich Einstrahlung, Temperatur und Windgeschwindigkeit bezogen.

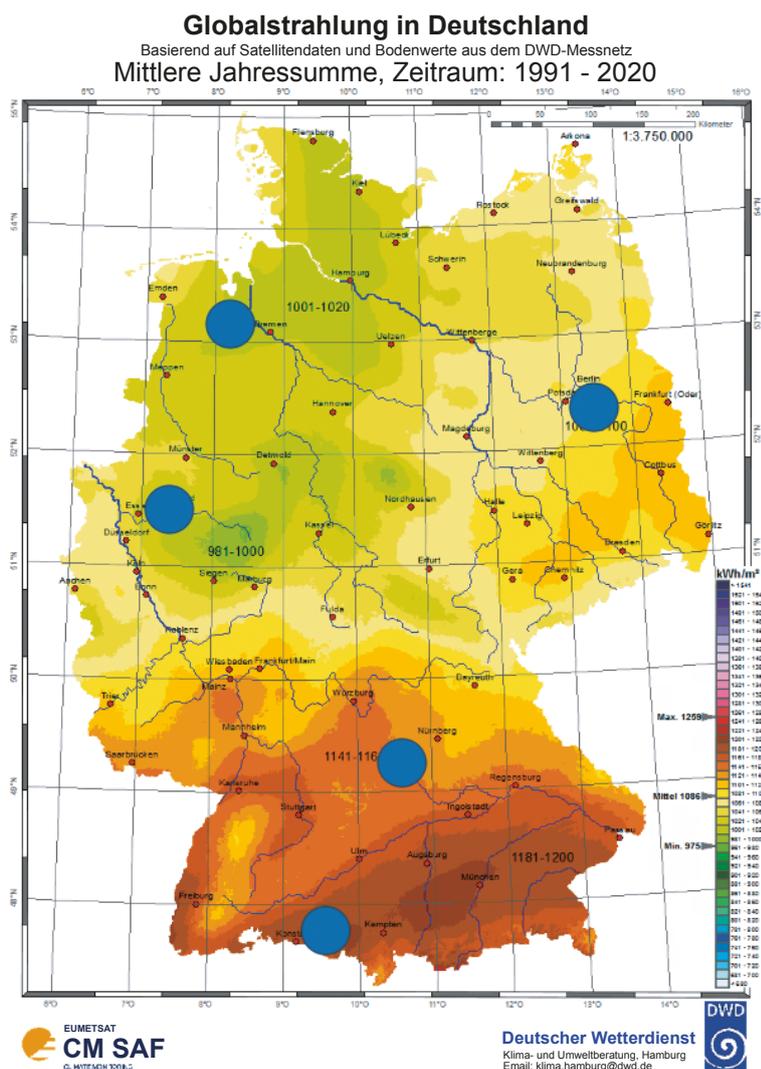


Bild 16: Standorte der Anlagen zur Simulation mit Zenit© (© DWD)

In Bild 16 sind die 5 Referenzstandorte aufgetragen. Diese Karte bildet die durchschnittliche jährliche Einstrahlungssumme in den Jahren von 1991 bis 2020 ab und soll beispielhaft die inhomogene Verteilung der Einstrahlung zeigen. Für Berechnungen wurden die Einstrahlungen der Jahre von 2013 – 2022 verwendet. Für jeden dieser 5 Standorte wurden PV-Anlagen in Beispielkonfigurationen simuliert. Die Beispielkonfigurationen bilden dabei die in dieser Studie untersuchten Anlagentypen ab. Für Wälle wurden drei Himmelsrichtungen (Süd, West, Ost) mit fester Neigung berechnet. Wände und Parkplatzüberdachung wurden mit flacher Modulneigung, Dachanlagen und Straßenbegleitflächen mit Modulneigung zwischen 20° und 30°, simuliert. Zusammengefasst wurden 6 Varianten von Anlagentypen mit teilweise variierender Ausrichtung simuliert. Somit wurden für jeden Standort 10 Simulationen mit angepassten Anlagenparametern erstellt, die in Tabelle 11 vermerkt sind. Die Ergebnisse der Ertragssimulation sind in Bild 17 gezeigt. Darin werden die 5 Standorte anhand der durchschnittlichen jährlichen Einstrahlungsenergie gegen den simulierten spezifischen Jahresenergieertrag aufgetragen. Dabei ist der je nach Technologie und Anlagengeometrie variierende Jahresenergieertrag bei gleicher Einstrahlung zu kennen. Weiter wurden die Simulationsergebnisse aus Bild 17 für jede Anlagenkonfiguration interpoliert und mit einer linearen Funktion gefittet. Diese Funktionen verknüpfen die jährliche Einstrahlungssumme mit der jährlichen Energieerzeugung eines jeden Anlagentyps und sind in Bild 18 zu sehen.

#	Typ	Beschreibung	Ausrichtung
1	Wälle	Hangparallel, Neigung: 33,7°	Süd, West, Ost
2	Wände	Wandaufsatz, Neigung: 0°	Süd
3	Dachflächen Flachdach	Aufgeständert 20°	Süd
4	Schrägdächer	Dachparallel, Neigung 30°	Süd, West, Ost
5	Parkflächen überdacht	Neigung: 0°	Süd
6	Straßenbegleitflächen	Aufgeständert Neigung: 20°	Süd

Tab. 11: Varianten und Ausrichtung der Anlagen der Simulation

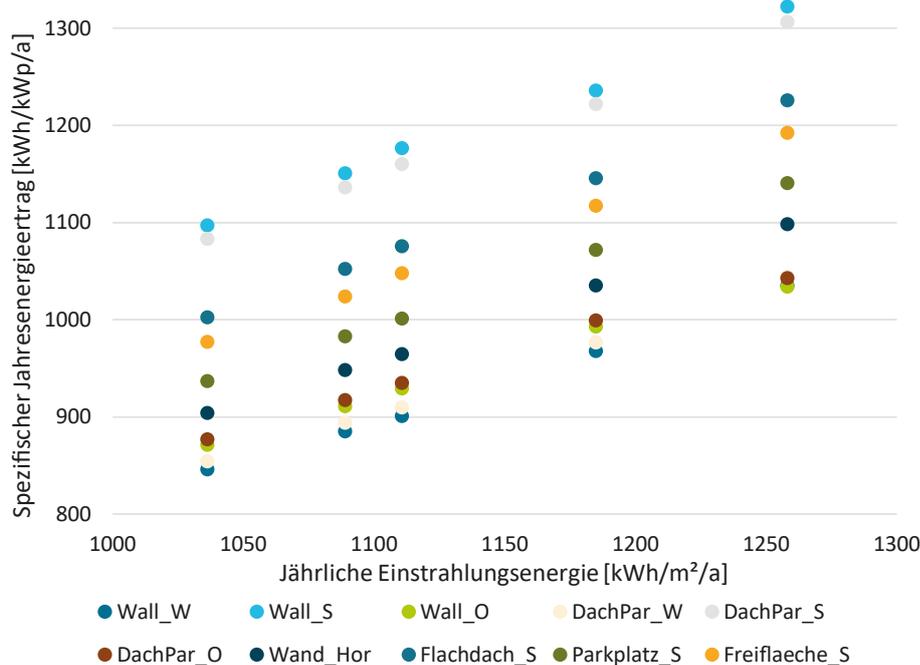


Bild 17: Simulierter spezifischer Ertrag der 5 Referenzstandorte und die verschiedenen Anwendungsfälle

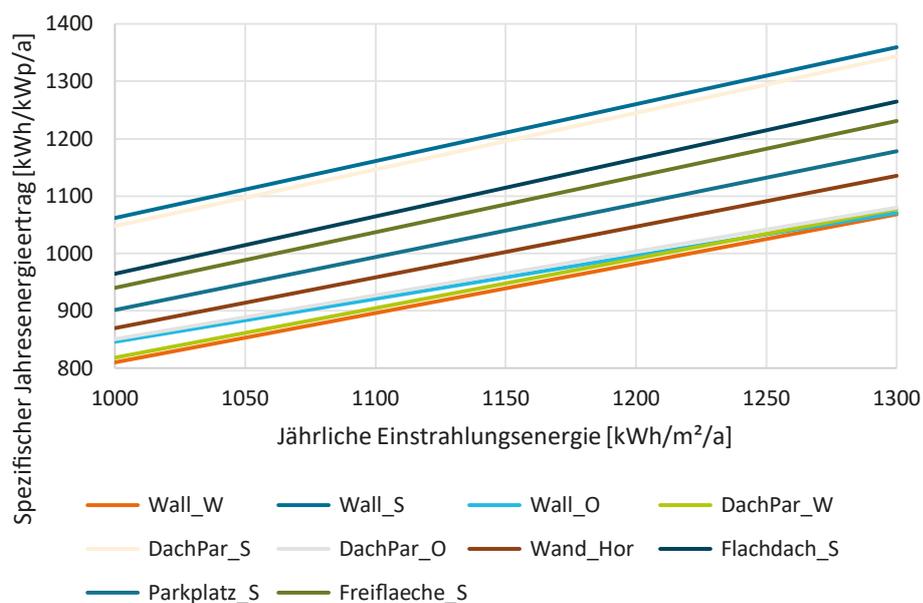


Bild 18: Interpolierter spezifischer Ertrag

Mithilfe der interpolierten Simulationsergebnisse und unter Berücksichtigung des Anlagentyps wurde für jede in dieser Studie betrachtete Anlage ein jährlicher Energieertrag errechnet. Danach wurde die Nahverschattung aus der Einstrahlungssimulation auf die mit den errechneten Energieertrag angewandt. Das Ergebnis dieser Abschätzung wurde mit den Ergebnissen der Berechnungsmethodik in Kapitel 2.2 verglichen und in Tabelle 12 aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Ansatz aus Kapitel 2.2 bei den nach Süden ausgerichteten Anlagen bis zu 25 % weniger Ertrag ausweist als die Simulationsergebnisse mit Zenit©. Bei den Wänden werden bei Ansatz aus Kapitel 2.2 7 % höhere Energieerträge berechnet. Generell ist zu sehen, dass der Ansatz in Kapitel 2.2 zur Berechnung des jährlichen Energieertrages ein konservativer ist und das Energieerzeugungspotenzial der Anlagen teilweise unterschätzt wird.

Typ	Durchschnittliche Differenz
Wälle Ost	-12 %
Wälle Süd	-25 %
Wälle West	-10 %
Wände	7 %
Gebäude Flachdach	-2 %
Dachparallel Ost	-13 %
Dachparallel Süd	-21 %
Dachparallel West	-12 %
Parkflächen	-16 %
Straßenbegleitflächen	-15 %

Tab. 12: Differenz der simulierten Jahresenergie

2.8 Ermittlung der angewendeten Abschläge

Um anhand des berechneten Leistungspotenzials die Größenordnung des voraussichtlich erschließbaren Potenzials abzuschätzen, wurden pauschale Abschlagsfaktoren geschätzt. Diese sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	Lärmschutzwand	Lärmschutzwall	Straßenbegleitflächen	Parkflächen	Dachflächen	
In der Simulation umgesetzte Flächenreduktion (Berechnetes Leistungspotenzial)	10 %	17 %	62 %	43 %	38 %	
Umwelt- + Landschaftsplanerische Einschränkungen						
Blendungseffekte aufgrund von Modulreflektionen						
Sichteinschränkungen bzgl. Verkehrssicherheit						
Rechtliche Aspekte bzgl. versch. Vermarktungs- und Erschließungsaspekte						
Baurechtliche und -technische Einschränkungen						
Ertragsreduktion durch Nahverschattung						
Entfernung Netzanschlusspunkt						
Wirtschaftlichkeit bezogen auf Installationsaufwand						
Zusätzlicher Abschlag zur Ermittlung des erschließbaren Leistungspotenzials	Gesamter Abschlag Min	10%	20%	20%	5%	5%
	Mittlerer Abschlag	20%	30%	40%	10%	10%
	Gesamter Abschlag Max	30%	40%	60%	15%	15%
	hoch 50 – 90%	mittel 30 – 50%	gering 10 – 30%	Methodisch in der Simulation umgesetzt		

Tab. 13: Schätzung der pauschalen Abschlagsfaktoren die auf das berechnete Leistungspotenzial angewendet werden

Aus der Darstellung geht hervor, welche Aspekte bereits in der Simulation berücksichtigt wurden und welche nicht. Anhand der Auswertungen der Input- und berücksichtigten Outputflächen wurden die über die Methodik bereits hinterlegten Abschläge auf das reine technische Potenzial berechnet und in Zeile 1 dargestellt. Der größte Abschlag entsteht bei den Straßenbegleitflächen von ca. 62 %.

Die zusätzlichen Abschläge wurden basierend auf der im Projektteam durchgeführten Sichtung der Luftbilder von einigen wenigen Beispielflächen abgeleitet. Die Ergebnisse erfüllen daher nicht den Anspruch einer wissenschaftlichen Exaktheit, sondern sind auch aufgrund der unterschiedlichen Datenquellen mit großer Unsicherheit zu betrachten. Die dargestellten Abschläge wurden im Anschluss daran mit den Teilnehmern des Betreuerkreises plausibilisiert.

Besonders die Restriktionen durch den ökologischen Wert bestimmter Flächen von Lärmschutzwällen und der Straßenbegleitflächen sind methodisch nicht zu ermitteln. Um diesem Aspekt teilweise abzubilden, wurden methodisch bei der Berechnung der Einstrahlung die Nahverschattungseffekte durch vorhandene Vegetation berücksichtigt. Hierdurch wurden Flächen mit starkem Bewuchs automatisiert ausgeschlossen, da bedingt durch die Verschattung der Ertrag unterhalb der Grenze von 650 kWh/kWp liegt. Durch Sichtung der Luftbilder war jedoch ersichtlich, dass weitere Abschläge für die Abschätzung des erschließbaren Potenzials sinnvoll sind. Im Rahmen dieser Studie wurden hier zusätzlich 40 % mit einer Varianz von ± 20 % als sinnvoll erachtet. Einige Teilflächen liegen in den Sichtdreiecken von Auf- und Abfahrten. Diese Potenziale wären nur mit erheblichem Aufwand oder

gar nicht erschließbar, da sicherheitsrelevante Aspekte hier als vorrangig zu betrachten sind. Für eine genaue Aussage wäre auch hier eine Einzelfallbetrachtung notwendig.

Die Ergebnisse für Dachflächen und die Überdachung der Parkflächen haben das geringste Risiko hinsichtlich einer Reduktion der berechneten Potenziale. Hier führen lediglich baurechtliche Einschränkungen und eine fehlende Wirtschaftlichkeit aufgrund des Installationsaufwands bei den Überdachungen zu weiteren Reduktionen des berechneten Potenzials im Hinblick auf das erschließbare Potenzial.

Die Abschläge bei den Lärmschutzwällen und -wänden liegen zwischen den zuvor genannten Anwendungsfällen. Kritisch sind hier vor allem die durchschnittlich höheren Entfernungen zu Netzanschlusspunkten. Bei Lärmschutzwällen ist außerdem der Bestandsbewuchs als einschränkender Aspekt zu nennen. Dieser wurde bei der Ertragsberechnung zunächst nicht berücksichtigt, ist aber durch einen großen pauschalen Abschlag berücksichtigt.

Bei den Lärmschutzwänden wurde aufgrund der gewählten technischen Lösung durch Aufsatzkassetten keine Einschränkung durch Blendung angewendet (vgl. Kapitel 3).

Bautechnische Einschränkungen sind vor allem bei Lärmschutzwänden zu erwarten, da hier vor jeder Installation entsprechende Bauwerksprüfungen vorzunehmen sind.

Alle vorab genannten Abschlagszahlen sind mit einer großen Unsicherheit besetzt, da es sich hierbei um rein qualitative abgeleitete Schätzungen handelt. Die Faktoren wurden daher auch nur abschließend auf das final berechnete Leistungspotenzial angewendet. Die Abschläge sind nicht auf Einzelflächen anwendbar. Alle berechneten Einzelflächen innerhalb des berechneten Potenzials sind daher im ermittelten Datensatz enthalten.

In den Grafiken in der Auswertung sind die Abschläge gesondert gekennzeichnet. Zu beachten ist, dass die Abschläge auf Basis der heutigen Rahmenbedingungen getroffen worden sind. Durch technologische Verbesserungen oder Anpassungen von gesetzlichen Rahmenbedingungen können die Abschläge künftig auch kleiner ausfallen als zum heutigen Zeitpunkt angenommen.

Insgesamt ist hier zu bemerken, dass aus Sicht der Autoren eine exakte Berechnung des deutschlandweit erschließbaren Potenzials entlang der Bundesfernstraßen aufgrund des hohen Aufwandes, der nicht ausreichenden Datenlage und der ständigen Veränderung der technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen nicht umsetzbar erscheint.

Im Folgenden ist, um eine Einordnung der Abschläge zu ermöglichen, eine Übersicht von ermittelten/geschätzten Abschlägen anderer Studien und Veröffentlichungen gezeigt.

Mit den Autoren zwei der genannten Studien wurde im Vorfeld der durchgeführten Simulationen Kontakt aufgenommen. Zu bemerken ist hier das deutlich gröbere Vorgehen dieser Studien hinsichtlich ihrer jeweils durchgeführten Methodik zur Ermittlung der Potenziale. Die ermittelten Werte (ohne Abschläge) dieser Studien sind daher deutlich näher am verfügbaren technischen Potenzial. Demzufolge wurden hier entsprechend hohe pauschale Abschläge angewendet. Im Vergleich dazu wurde in der vorliegenden Studie eine Vielzahl an Restriktionen methodisch berücksichtigt. Am Beispiel der Straßenbegleitflächen kann dies gut verdeutlicht werden. In dieser Studie wurden methodisch 61 % der Eingangsflächen ausgeschlossen (vgl. Tabelle 13). Zusätzlich wurden auf das gesamte Ergebnis ein pauschaler Abschlag von 40 – 60 % angewendet. Damit ergibt sich ein gesamter Abschlag von 68 – 84 % der in dieser Studie auf die Eingangsdatensatz (Technisches Potenzial) der Straßenbegleitflächen angewendet wurde.

Jahr	Autor	Titel	Anwendungsfall	Prozentualer Abschlag	Quelle
2019	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Bosch & Partner GmbH	Untersuchung zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen	EEG-Freiflächenanlagen entlang von Verkehrswegen	95 – 98 %	(KELM, 2019, S. 27)
2021	Bundesrat der Schweizer Eidgenossenschaft	Studie über das Potenzial der Lärmschutzwände entlang von Autobahnen und Bahnstrecken für die Produktion von Solarenergie	Lärmschutzwände	83,6 %	(BUNDESRAT DER CH, 2021, S. 2)
2022	Deutscher Wetterdienst, EisenbahnBundesamt, Bundesanstalt für Straßenwesen	Abschätzung des potenziellen jährlichen Energieertrags von PV-Anlagen an Lärmschutzeinrichtungen der Verkehrswege	Lärmschutzeinrichtungen	90 % (Wand) 50 % (Wall)	(BAER, 2022, S. 3)

Tab. 14: Ermittelte Abschläge auf technische Flächenpotenziale anderer Studien und Veröffentlichungen

3 Photovoltaik Lärmschutz- einrichtungen- und Straßenüberdachungen

3.1 PV-Lärmschutzwände

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über bereits realisierte Photovoltaik Lärmschutzwänden (PVLSW) gegeben und basierend auf technischen Anforderungen herausgearbeitet, welche Annahmen für die PV-Belegung in der Potenzialstudie getroffen werden sollen.

3.1.1 Vorgehende Potenzialabschätzungen

Neben der Vorgängerstudie (GÜNDRA, 2015) gibt es weitere Beispiele für Potenzialabschätzungen an Bundesfernstraßen in Nachbarländern wie der Schweiz. Dazu zählt der Forschungsauftrag ASTRA 2010/009 als Antrag des Bundesamtes für Straßen (ASTRA), welcher 2012 durch die TNC Consulting AG durchgeführt wurde. Um einiges neuer ist Studie „Potenziale zur Produktion erneuerbarer Energien bei Transportunternehmen“ von Amstein und Walthert aus 2017 und die „Studie über das Potenzial der Lärmschutzwände entlang von Autobahnen und Bahnstrecken für die Produktion von Solarenergie“ als Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats 20.3616 von 2020 (Energie- und Umweltplanungsbüro Planair SA, 27. Oktober 2021).

Zwar ist ein Teil der vorausgehenden Betrachtungen in diesen Studien, wie technische Anforderungen und Anwendungsfallunterscheidungen und die Methodik, relevant, jedoch ist die Verfügbarkeit der Daten in der Schweiz und in Deutschland nur bedingt vergleichbar (NORDMANN, 2012) und die Tiefe der Potenzialbetrachtung bezogen auf die GIS-Methodik ebenfalls nicht.

3.1.2 Historische Pilotprojekte

Das erste PV-Lärmschutzprojekt wurde bereits 1989 in Chur (Schweiz) umgesetzt und es folgten eine Reihe weiterer Pilotprojekte. Seither wurden schätzungsweise in mehr als 50 Pilotprojekten weltweit solare Lärmschutzeinrichtungen errichtet. Einige wichtige Pilotprojekte sind in nachfolgend in einem Zeitstrahl exemplarisch dargestellt.



Bild 19: Wichtige Pilotprojekte von solaren Lärmschutzwänden

Referenz	Ort	Titel der Abbildung	Copyright
1	Chur, CH	Aufsatzmodule	© TNC AG
2	Inning, DE	Schindelmodule	© TNC AG
3	Aubrigg, CH	Glas/Glas Module	© TNC AG
4	Wallisellen, CH	Zickzack Wand	© TNC AG
5	Ammersee, DE	Zickzack Wand	© TNC AG
6	Brüttisellen, CH	PV-Elemente	© TNC AG
7	Oppeano, IT	Kassetten	© Solar Sound Panel
8	Neuötting, DE	Kombinationsflächen	© R. Kohlhauer GmbH
9	Uden, NL	Bifazialmodule	© Rijkswaterstaat/Michel Giezen
10	Vösendorf, AU	ASFINAG IÖB Challenge	© DAS Energy Ltd.

Tab. 15: Bildreferenzen zu Pilotprojekten in Bild 19 (von links nach rechts)

Eine detaillierte Auflistung der Anzahl von PV-LSW nach europäischen Ländern und Projektdetails zu erfolgreichen Projekten ist im Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 364 „Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie“, 2022 zu finden.

3.1.3 Kategorisierung von Umsetzungsarten

PV-Lärmschutzwände lassen sich in verschiedene sinnvolle Kategorien unterteilen, um Fallunterscheidungen für die jeweils geeignete Anwendungsform und die jeweiligen Anforderungen zu treffen.

Eine der wichtigsten Kategorisierungen ist die Lage zur Straße sowie die Himmelsausrichtung der PV-Flächen, welche in der 2D-Draufsicht über den Orthogonalvektor der PV-Flächen definiert ist. Die Himmelsausrichtung wird üblicherweise auch als Azimutwinkel angegeben (häufig: N = 0°, O = 90°, S = 180°, W = 270°).

Für einen attraktiven Energieertrag wird zunächst davon ausgegangen, dass PV-Module nicht mit nördlichen Himmelsausrichtungen installiert werden. Aufgrund der ansonsten gering ausfallenden Energieerträge ist in dem Fall die gegenüberliegende Seite einer Wand stets vorzuziehen. Für Lärmschutzwände bedeutet dies, dass die geeigneten PV-Flächen mit Südkomponente bei Lärmschutzwänden nördlich einer Straße straßenzugewandt liegen und für Lärmschutzwände südlich einer Straße auf der straßenabgewandten Seite vorhanden sind. Im Sonderfall einer Lärmschutzwand auf der Nordsüdachse kann entweder örtlich beurteilt werden, welche Seite geeigneter ist, oder – falls aus akustischer Sicht möglich – auf bifaziale PV-Module zurückgegriffen werden.

Weitere Kategorisierungen lassen sich auf technischer Ebene insbesondere über den Neigungswinkel bzw. Elevationswinkel der PV-Module definieren, wobei 0° als horizontal und 90° als vertikal angenommen wird. Eine Übersicht bereits existierender technischer Konzepte mit verschiedenen Neigungswinkeln ist in Bild 20 gezeigt.

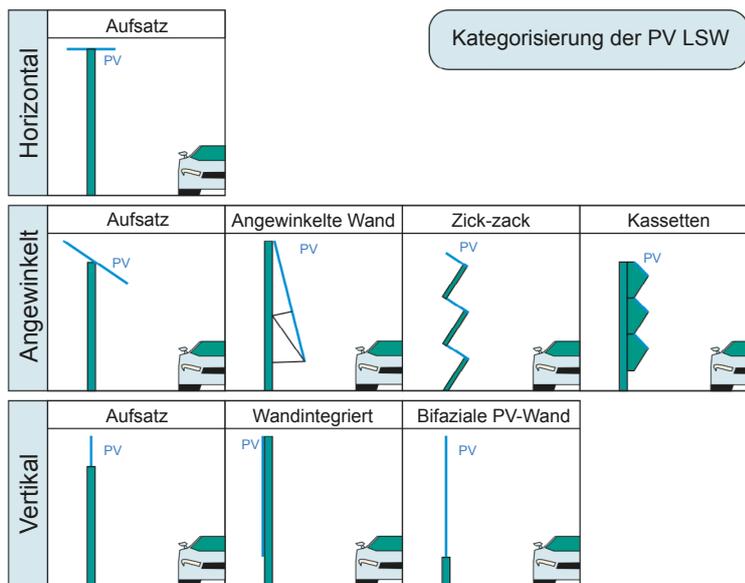


Bild 20: Kategorisierung von technischen Umsetzungsvarianten von PV-LSW nach Elevationswinkel
© Fraunhofer ISE

Zudem ist eine Kategorisierung nach einer PV-Nachrüstung bzw. Retrofit von bestehenden Wänden oder dem Neubau von Lärmschutzwänden eine wichtige Unterscheidung, die auf technischer Ebene über die installierbare Leistung pro Meter und die Ausrichtung der PV-Module entscheiden kann. In dieser Studie werden über die GIS-Daten jedoch nur bereits existierende Lärmschutzwände aufgenommen und nicht weitergehend betrachtet, ob diese nachgerüstet oder durch neue PV-Lärmschutzwände an gleicher Stelle ersetzt werden können. Für eine umfassende derartige weitergehende Abschätzung fehlen Daten zur Statik, Bauart, Baumaterial und zum Zustand der Objekte. Daher wurden hierzu entsprechende pauschale Abschläge gemäß Tabelle 13 berücksichtigt.

3.1.4 Anforderungen an Lärmschutzwände

Das tatsächlich realistische Flächenpotenzial für PV auf oder an Lärmschutzwänden ist aufgrund akustischer, mechanischer und weiterer Anforderungen wie im Besonderen an die Sicherheit weiter beschränkt als die komplette aufgespannte Fläche von Lärmschutzwänden. Um realistische Annahmen für diese Potenzialstudie zu treffen, werden einige der wichtigsten Anforderungen im Folgenden betrachtet.

3.1.4.1 Akustische Anforderungen

Die Hauptfunktion einer Lärmschutzwand ist die Reduktion des Verkehrslärms am Immissionsort (z. B. eine Haussiedlung) um ein definiertes Level, welches in der Regel bei 25 dB(A) liegt. Diese Reduktion des Verkehrslärms lässt sich bereits über eine ausreichend dicke Wand realisieren. Sind jedoch auf beiden Seiten einer Straße Ortschaften bzw. Immissionsorte gelegen, würde eine reflektierende Lärmschutzwand den Schall von einem Immissionsort reduzieren, am anderen Immissionsort jedoch erhöhen. Aus diesem Grund ist die zu erfüllende akustische Absorption des Verkehrslärms nach verschiedenen Abstufungen gemäß der ZTV Lsw 22 (Kapitel 2.2) bei der Ausschreibung einer Lärmschutzwand vorgegeben.

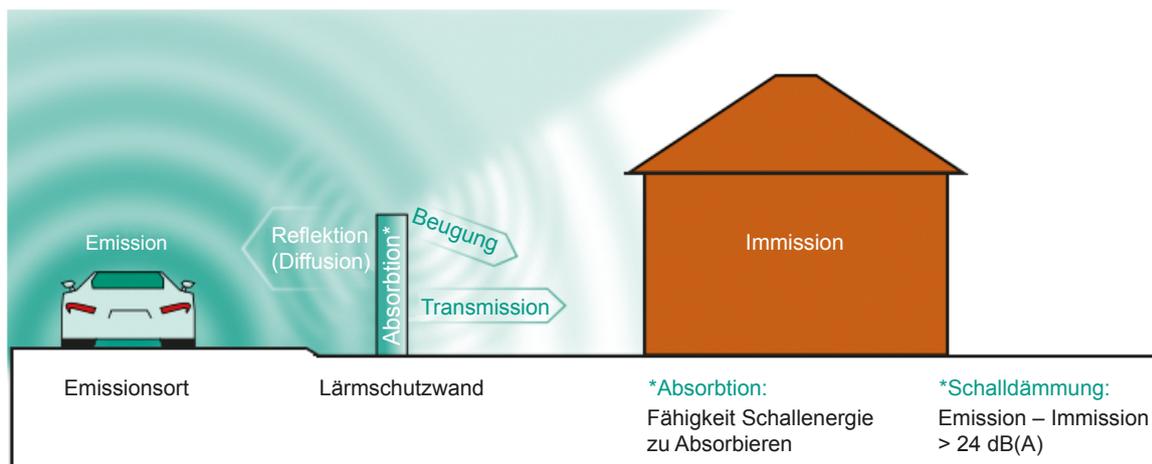


Bild 21: Akustische Funktionsweisen einer Lärmschutzwand © Fraunhofer ISE

Gemäß Tabelle 16 wird zwischen nichtabsorbierend/reflektierend, absorbierend und hochabsorbierend unterschieden. Die hochabsorbierende Gruppe A4 mit mehr als 11 dB wird nur selten angewendet. Häufig wird akustische Absorption durch Lochblechelemente mit Füllungen aus beispielsweise Steinwolle, oder durch absorbierende Betonelemente realisiert.

Absorptionsgruppen nach ZTV LSW 06 2.2/DIN EN 1793-1		
Gruppe	Schallabsorption DL_a [dB]	Beschreibung
A1	< 4	Reflektierend (nicht absorbierend)
A2	4 – 7	Absorbierend
A3	8 – 11	Hoch-Absorbierend
A4	> 11	

Tab. 16: Absorptionsgruppen nach ZTV Lsw 22

PV-Module wirken akustisch wie ein solides Glas, das zwar bei ausreichend Dicke genügend Schalldämmung erreicht, jedoch stark schallreflektierend ist. Die Entwicklung von technischen Lösungen, welche die akustischen Anforderungen mit ertragsoptimierten solaren Funktionen vereinbaren können, ist daher die wesentliche Herausforderung. Eine der naheliegendsten Lösungen ist es, Flächen mit den funktionalen Eigenschaften Schallabsorption und PV-Energieerzeugung nebeneinander zu kombinieren. Im Rahmen des Projekts PVwins sind hierzu am Fraunhofer ISE Konzepte betrachtet worden, welche jedoch noch im Entwicklungsstatus sind und noch nicht als Produkte bei Lärmschutzwandherstellern erhältlich sind. Tiefergehend wird hierauf in der Veröffentlichung vom Fraunhofer ISE (FORSTER, 2023) eingegangen.

3.1.4.2 Mechanische Anforderungen

Um die Sicherheit und Langlebigkeit von Lärmschutzwänden auch unter widrigen Bedingungen an der Straße zu gewährleisten, sind eine Reihe von nichtakustischen, mechanischen Anforderungen nach der DIN EN 1794 zu erfüllen. Dazu gehören:

- Windlasten
- Statische Lasten: Eigengewicht, Drehmomente bei Aufsätzen
- Steinschlag durch weggeschleuderte Steine von Reifen
- Schneeprell von Räumungsdiensten im Winter
- Gefahr von herabfallenden Wandteilen (bei Lärmschutzwänden auf Brücken)

Dynamische Lasten, insbesondere durch Steinschlag und die Anforderungen durch Schneeprell, können problematisch für die PV-Integration in Bodennähe sein.

Nach Abschätzungen im Rahmen des Fraunhofer ISE Projekts PVwins (FRAUNHOFER INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [5]) und Gesprächen mit Experten wird daher zur Vorsicht angenommen, dass die unteren zwei Meter einer Lärmschutzwand frei gehalten werden von vertikalen PV-Modulen. In diesem Bereich wird auf Betongründung und herkömmliche absorbierende Lärmschutzelemente gesetzt.

Da die GIS-Datenlage zu den Lärmschutzwänden nicht flächendeckend und konsistent Informationen zur statischen Auslegung und zum Zustand, Material, Alter und weiteren Attributen liefert, kann bei dieser Studie keine umfassende Detailbetrachtung erfolgen, inwiefern sich die bestehenden Wände für eine Nachrüstung eignen. Diese Betrachtung ist im Einzelfall in nachfolgenden Arbeitsschritten zu prüfen, etwa wenn eine Lärmschutzwand aufgrund ihrer geografischen Lage, Orientierung und naher Verbraucher als attraktiv eingeordnet wird. Es wird daher in dieser Studie davon ausgegangen, dass es technisch möglich ist, eine Lärmschutzwand

- a) nachzurüsten, wenn sich die akustischen und mech. Anforderungen erfüllen lassen, oder
- b) neu zu bauen, wenn die Anforderungen nicht erfüllt werden können, jedoch an gleicher Stelle eine neue PV-LSW errichtet wird. Zumindest langfristig ist davon auszugehen, dass ein Teil der bestehenden Lärmschutzwände aufgrund des Alters oder Umbaumaßnahmen des Straßenverlaufs saniert oder erneuert wird.

3.1.4.3 Weitere Anforderungen und abgeleitete Annahmen für Potenzialstudie

Es wurde entschieden, für die deutschlandweite Potenzialanalyse eine technische Umsetzung zu wählen, die den besten Kompromiss zwischen Anforderungen, Beschaffenheit der Datengrundlage und konservativen Potenzialannahmen bietet.

In Tabelle 17 werden die wesentlichen Anforderungen an PV-Lärmschutzwände und die daraus folgenden Annahmen für die flächendeckende technische Umsetzung in der Potenzialstudie aufgeführt.

Anforderung/Funktion	Bedeutung für PV-Integration
Primäre Lärmschutzfunktionen, insbesondere Absorption ist der sekundären PV-Integration übergeordnet	Technische Lösung darf die Absorptionseigenschaften nur geringfügig beeinflussen. PV-Aufsätze lassen die Absorptionseigenschaften der Lärmschutzwandfläche bestehen und bringen zusätzliche akustische Vorteile beim Einsatz von Absorberaufsätzen oder einer optimierten Schallbeugung der Oberkante.
Sicherheit vor Steinschlag, Schneeeinprall, Vandalismus (DIN EN 1794-1)	PV-Module erst ab 2 m Höhe montieren. Durch Systemdesign Gefahr von Anprall und Vandalismus vermeiden. PV-Aufsätze bringen dies weitestgehend immanent mit.
Risiko von Blendungsproblemen soll gering sein	PV-Module sollten in einem Winkel mit geringer Blendungsgefahr und ausreichend Höhe montiert werden. Horizontale PV-Aufsätze minimieren das Risiko von Blendung für den Straßenverkehr weitgehend.
Wirtschaftlichkeit: Kosteneffiziente PV-Installation mit hohem Ertrag pro kWp favorisiert	Vertikale PV-Installationen weisen einen deutlich geringeren spezifischen Ertrag als horizontale oder geneigte Module auf. Technische Lösungen ohne teure Sondermodule favorisiert. PV-Aufsätze können aufgrund geringerer Anforderungen an Steinprall mit Standardmodulen ausgeführt werden, was die Kosten senkt.
Statik	Zusätzliche Eigengewichts- und Windlasten sollten innerhalb der statischen Belastbarkeit der bestehenden LSW liegen. Dies kann jedoch u. a. aufgrund der zur Verfügung liegenden Daten nicht deutschlandweit berücksichtigt werden, sondern muss im Einzelfall vor einer Umsetzung geprüft werden. Wenn die Module mit ihrer langen Seite parallel zur Lärmschutzwand mittig auf der Lärmschutzwand montiert sind, ergibt sich ein Überhang von nur ca. 0,5 m. Damit lässt sich 1 m ² PV-Modul pro Meter LSW installieren. Aus Abschätzungen im Projekt PVwins ist ein Aufsatz mit der schmalen Seite eines PV-Moduls in vielen Fällen voraussichtlich möglich. Das tatsächlich installierbare Leistungspotenzial pro Meter Lärmschutzwand kann im Einzelfall höher sein, wenn die Lärmschutzwand genug statische Belastungsreserven hat für eine Belegung mit mehr PV-Fläche pro Meter. Genauso kann im Einzelfall auch festgestellt werden, dass keine statischen Reserven übrig sind.
Datenverfügbarkeit: Auch bei nicht vorhandener Höhe soll eine sinnvolle Annahme ohne große Fehlerquelle möglich sein.	Da bei den PV-Aufsätzen unabhängig von der Höhe der Lärmschutzwand die gleiche Fläche pro Meter LSW angenommen wird, ist die größte Unsicherheit bei der Potenzialbetrachtung, dass bei fehlenden Höhendaten die tatsächliche Höhe von der dann angenommenen Höhe von 4 m abweicht und ein geringfügig verfälschter Einstrahlungswert berechnet wird.

Tab. 17: Anforderungseigenschaften an die PV-Integration und resultierende Annahmen

In Tabelle 18 sind Beispiele für PV-Aufsätze dargestellt und verdeutlichen, dass sich PV-Aufsätze mit beliebiger Ausrichtung und zusätzlichen akustischen Eigenschaften, wie z. B. Absorbern oder verstärkenden Beugungskanten umsetzen lassen. Ebenso wird deutlich, dass es bereits verschiedene Produkte auf dem Markt gibt.

	<p>PV-Aufsatz zur Nachrüstung bestehender Wände mit variabler Modulausrichtung. Entwickelt im Projekt PVwins von der R. Kohlauer GmbH.</p> <p>© Fraunhofer ISE</p>
	<p>Aufsatz mit geneigten PV-Modulen und Absorber.</p> <p>© FORSTER Metallbau GmbH</p>
	<p>Betonaufsatz mit horizontalen PV-Modulen und verbesserter Beugekante zur Nachrüstung oder bei neuen Wänden.</p> <p>© Leube Betonteile GmbH & Co KG</p>

Tab. 18: Beispiele für PV-Aufsätze auf Lärmschutzwänden von Produkten und Prototypen

3.2 PV-Lärmschutzwälle

3.2.1 Gestaltung von Lärmschutzwällen

Lärmschutzwälle werden häufig dort gebaut, wo neben der Bundesfernstraßen noch ausreichend seitliche Fläche vorhanden ist und die Wälle auch aus akustischer Sicht eingesetzt werden dürfen. Um das gleiche Maß an Schallreduktion am Immissionsort zu erreichen, müssen Lärmschutzwälle in der Regel höher gebaut werden als Lärmschutzwände. Dies erfordert deutlich mehr Materialeinsatz, der jedoch technisch weniger anspruchsvoll ist. Durch den Bewuchs mit Gras, Büschen und Bäumen absorbieren grüne Lärmschutzwälle den Schall zwar ein wenig besser als rein reflektierende Lärmschutzwände, reflektieren jedoch durch die Hangneigung den Schall primär in vertikale Richtungen.

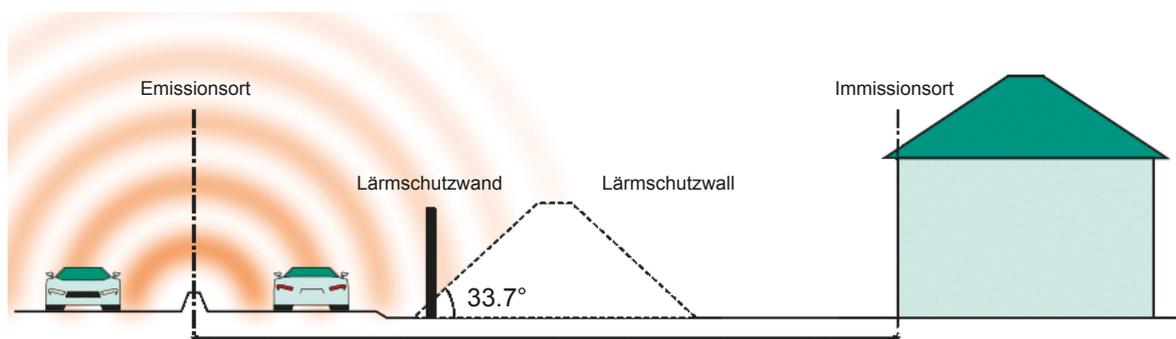


Bild 22: Querschnitt eines Lärmschutzwalls und einer Lärmschutzwand im Vergleich nach RLS-90
© Fraunhofer ISE

Wie in Bild 22 dargestellt, wird nach RLS-90 standardmäßig eine Hangneigung von 1:1,5 bzw. 33,7° vorgegeben. Muss die Hangneigung durch begrenzte Seitenfläche steiler ausfallen, wird der Hang durch die Nutzung von Geogittern stabilisiert.

3.2.2 Statistik von Lärmschutzwällen

Laut BMDV sind die Kosten von Lärmschutzwällen einschließlich Grunderwerb günstiger als die Kosten von Lärmschutzwänden. Dass aus ökonomischen Gründen nicht primär auf Lärmschutzwälle gesetzt wird, ist dadurch bedingt, dass ausreichend Seitenfläche für das Aufschütten eines Lärmschuttwalls verfügbar sein muss. Zudem variieren die Kosten dieser Lärmschutzmaßnahmen stark mit der lokalen Verfügbarkeit und Kosten an Abraum, welcher hier eingesetzt werden kann.

Zwischen 1978 und 2019 wurden ca. 57 mio. m³ Wall aufgeschüttet mit Kosten von ca. 12 €/m³ für den Zeitraum der letzten 10 Jahre einschließlich Grunderwerbskosten. Auf die wirksame Abschirmfläche bezogen gibt das BMDV Kosten von 154 €/m² für 4 m Wallhöhe bis 286 €/m² für 8 m Wallhöhe an.

3.2.3 PV-Lärmschutzwälle

Durch den entsprechenden Hangneigungswinkel von 1:1,5 und die vergleichsweise größere Fläche bieten sich Lärmschutzwälle gut an, ähnlich wie Freiflächen als PV-Kraftwerke genutzt zu werden. Hierzu eignen sich besonders Streckenabschnitte mit Süd-Ausrichtungen der Hangfläche. Der Schallschutz wirkt mit Photovoltaikmodulen insbesondere durch Reflektion des Schalls durch die schallharte Glasvorderseite der PV-Module nach oben. Verläuft die Bundesfernstraße nördlich eines Lärmschutzwalls, kommt auch die Anwohnerseite zur Photovoltaiknutzung in Frage, sofern die Anwohnerseite eines Lärmschutzwalls nicht auf andere Weise, z. B. als ökologische Ausgleichsfläche, genutzt wird.

Für den Fall von 33,7° Hangneigung kann bei südlicher Ausrichtung und einer jährlichen Einstrahlungsenergie von 1.150 kWh/m²/a ein spezifischer Jahresertrag von bis zu 1.200 kWh/kWp/a erreicht werden (siehe Kapitel 2.7). Demgegenüber können bei gleicher Himmelsausrichtung am gleichen Standort für monofaziale, vertikal an Lärmschutzwänden installierte PV-Module nur etwa 800 kWh/kWp/a erreicht werden.

3.2.4 Referenzprojekte von PV-Lärmschutzwällen

Die in Tabelle 19 abgebildeten Referenz-PV-Wälle werden im Folgenden näher beschrieben.

Referenz	Abbildung	Ort
1	 <p>Lärmschutzwall Freising © Freisinger Stadtwerke Versorgungs-GmbH</p>	Freising, Bayern
2	 <p>© Fraunhofer ISE</p>	Töging am Inn, Bayern

Tab. 19: Beispiele PV-Wälle in Freising und Töging am Inn

Freising, Bayern

In Freising-Lerchenfeld wurde im Jahr 2002 eine geteilte PV-Anlage auf einem Lärmschutzwall durch die Bürgergenossenschaft BürgerSolar und die Freisinger Stadtwerke errichtet. Der erste Teil ist eine 128 kWp Solaranlage, die über eine Bürgerinitiative finanziert wurde. Der zweite Teil mit 594 kWp wurde von der Firma Investsolar finanziert. Im Jahr 2009 wurde diese Anlage saniert und mit neueren PV-Modulen bestückt. Die ca. 6.000 m² Modulfläche erstrecken sich über eine Länge von ca. 1.200 m.

Töging am Inn, Bayern

Entlang der A94 in Töging am Inn wurde 2007 eine ca. 500 m lange PV-Anlage an dem nördlichen Lärmschutzwall von privaten Betreibern errichtet. Die Fläche wurde dabei von der Autobahndirektion Südbayern verpachtet. Die ursprüngliche Konstruktion mit Holzunterbau und einem Überhang auf der Wallkrone wurde im Jahr 2014 schließlich durch die Nürnberger Firma MR Solar GmbH & Co KG komplett erneuert. Die neue Anlage hat eine installierte Leistung von ca. 1 MWp. Der PV-Wall in Töging am Inn wurde ähnlich wie in Freising mit blockartig wasserführenden PV-Flächen von 14 x 9 Modulen gebaut – dies entspricht ca. 14 m x 18 m mit ca. 1 m breiten Streifen dazwischen.

3.2.5 Annahmen für die Belegung von PV-Lärmschutzwällen

Das maximale technische Potenzial wird erzielt, wenn die Hangfläche eines Walls vollflächig mit PV belegt wird. Sofern zur Wartung begehbare Lücken vorzuziehen sind, kann dies angelehnt an die Referenzprojekte in Freising und Töging am Inn über eine Reduktion der Gesamtfläche um 5-7 % pauschal berücksichtigt werden. Für die Potenzialanalyse wurde eine vollflächige Belegung in GIS berechnet. Über die Abschlagfaktoren in Kapitel 2.8, Tabelle 13 werden Reduktionen berücksichtigt.

In Tabelle 20 sind die wesentlichen Anforderungen und daraus abgeleiteten Bedeutung für die PV-Belegung der Wälle dargestellt.

Anforderung/Funktion	Bedeutung für PV-Integration
Primäre Lärmschutzfunktionen bleiben erhalten	Die PV-Module reduzieren die auch in geringem Maß absorbierenden Eigenschaften von Vegetation, jedoch bleibt die primäre schalldämmende und den Schall nach oben reflektierende Eigenschaft erhalten. Optional könnte durch eine Erhöhung des Walls sogar mehr PV-Fläche und höherer Lärmschutz umgesetzt werden.
Sicherheit vor Steinschlag, Schneeprell, Vandalismus (DIN EN 1794-1) und Unfällen	PV-Module sollten nicht in den unteren 3 m der Hypothenuse aus dem Querschnittsdreieck des Wallhangs zur Straße liegen (siehe Kapitel 2.3.2, Bild 10). Die Gefahr von Vandalismus ist ähnlich wie bei Freiflächenanlagen einzustufen. Auf der straßenabgewandten Seite des Lärmschutzwalls ist dieser Abschlag nicht vorgesehen, da hier keine Gefahr von Steinschlag und Schneeprell ausgeht.
Risiko von Blendungsproblemen soll gering sein	Blendungsgutachten müssen im Einzelfall erstellt werden. Wenn erforderlich, können PV-Module mit antireflektiven Oberflächeneigenschaften eingesetzt werden. Bisherige Umsetzungen, z. B. in Töging am Inn demonstrieren die Machbarkeit (siehe Tabelle 19).
Wirtschaftlichkeit: Kosteneffiziente PV-Installation mit hohem Ertrag pro kWp favorisiert	Durch die Hangneigung von üblicherweise ca. 33,7° ist ein Neigungswinkel nahe des Optimums für besonders hohen Energieertrag gegeben.
Naturschutz	Lärmschutzwälle sind u. a. deswegen eine häufig bevorzugte Lärmschutzmaßnahme, weil sie sich durch Bewuchs natürlich in das Landschaftsbild integrieren lassen. Zugleich bieten Gras, Büsche und kleine Bäume einen Rückzugsstreifen für Kleintiere und Insekten zwischen der Fahrbahn und den oft angrenzenden Ortschaften oder intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen. Daher ist die zusätzliche Doppelnutzung für mehr als die Straßenraumfunktion von Lärmschutz und dem durch die Begrünung gegebenen Rückzugsort für Tiere ein kontroverses Thema, das sich in dieser Potenzialstudie nicht beantworten lässt. Das technische Potenzial für PV-Lärmschutzwälle ist also durch ökologische und rechtliche Aspekte unter Umständen weitaus stärker beschränkt als es aus technischer Sicht sein müsste. Dieser Aspekt ist zum Verständnis bereits in Kapitel 2.8 betrachtet worden. Da es keine Datenlage zu Lärmschutzwällen gibt, die bereits als Ausgleichsflächen eingeordnet sind oder anderen Naturschutzstatus haben, kann dieser Aspekt nicht durch die Methodik berücksichtigt werden. Um jedoch für eine realistischere Abschätzung Abschlüsse dem erschließbaren Potenzial näher zu kommen, wurden Abschlagfaktoren gemäß Kapitel 2.8, Tabelle 13 vorgeschlagen und im Einverständnis mit dem Betreuerkreis der Studie festgelegt. Das berechnete und erschließbare Leistungspotenzial ist im Ergebnisteil 5.4 dargestellt.

Tab. 20: Anforderungen und Funktionen an PV-Lärmschutzwälle

3.3 PV-Straßenüberdachung für Tunnelenergiebedarf

Für die Potenzialstudie wurde ursprünglich nicht vorgesehen, die Gesamtflächen der Straßen mit PV-Überdachungen als weitere Potenzialfläche zu untersuchen. Aufgrund des gestiegenen Interesses wurde nach Start der Studie mit aufgenommen, Tunnel als Standorte mit hohem Energieverbrauch auf ihr Eigenverbrauchspotenzial für PV-Strom hin zu untersuchen. Hierfür würden sich etwa PV-Straßenüberdachungen vor den Tunneln eignen.

Tunnel haben den größten Anteil am Energieverbrauch der Bundesfernstraßeninfrastruktur. Zugleich ist ihr Lastprofil sehr gut planbar und einigermaßen konstant. Der Energieverbrauch in Tunneln setzt sich insbesondere aus Beleuchtung, Lüftungsanlagen und Nebenrichtungen wie Signaltechnik zusammen. Dies prädestiniert die Ein- und Ausgänge von Tunneln für PV-Überdachungen zur Deckung des Eigenenergiebedarfs.

3.3.1 Referenzprojekte von PV-Straßenüberdachungen

Die größten bereits umgesetzten PV-Überdachungen bzw. PV-Straßeneinhausungen mit zusätzlichem Nutzen von Lärmschutz sind in Südkorea gebaut worden (siehe Tabelle 21).

In Deutschland ist nach den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) davon auszugehen, dass PV-Straßenüberdachungen mit einer Länge > 80 m die deutlich höheren Anforderungen von Tunneln umsetzen muss, was diesen Fall derzeit aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausschließen würde (HAIDER, 2021).

Referenz	Abbildung und Quelle	Ort
1	 <p>PV-Straßenüberdachung aus dem öffentlich geförderten D-A-CH Forschungsprojekt PV-Süd. Weitere Informationen: https://www.ait.ac.at/themen/akustik-und-laermschutz-im-bereich-verkehr/projects/pv-sued (abgerufen am 20.08.2024) Foto © Fraunhofer ISE</p>	Raststätte im Hegau, Deutschland
2	<p>Hyundai Energy Solutions hat in Südkorea einen gläsernen schallisolierenden Tunnel mit gekrümmter Überdachung aus Solarmodulen mit 85 kWp errichtet. Nähere Details: http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=58139 (abgerufen am 20.08.2024)</p>	Eumseong in Nord Chungcheong Provinz, Südkorea
3	<p>Eine 1,3 km lange Schalleinhausung mit PV-Überdachung wurde in der Gwanggyo Gyeonggi Provinz in Südkorea errichtet. Die Gesamtleistung beträgt 2,6 MWp. http://koreabizwire.com/s-korean-soundproof-tunnel-to-double-as-solar-power-generator/105657 (abgerufen am 20.08.2024)</p>	Gwanggyo Gyeonggi Provinz, Südkorea
4	<p>Ein weiterer Schallschutz tunnel mit 479 m Länge und einer Leistung von 902 kWp wurde auf der Dongbu Schnellstraße in Südkorea errichtet. Mehr dazu unter: http://www.kharn.kr/news/article.html?no=13014 (abgerufen am 20.08.2024)</p>	Nowon-gu, Dongbu, Seoul, Südkorea

Tab. 21: Referenzprojekte für PV-Überdachungen/PV-Lärmschutzeinhausungen

3.3.2 Belegungskonzept für PV-Überdachungen

Der Verlauf der PV-Überdachung ist vom Straßenverlauf an den Ein- und Ausgängen der Tunnel abhängig und richtet sich in der veranschlagten installierten Leistung nach dem längenabhängigen Tunnelenergiebedarf. Die Neigung der PV-Module kann dabei ähnlich wie bei PV-Parkflächenüberdachungen ganzflächig z. B. als Pulldach erfolgen, oder über leichte Ost-West Neigungen. Hierbei sind kleine Winkel von unter 10° realistisch. Die Neigung hat vor allem statische Vorteile, lässt Wasser abfließen und kann den Ertrag geringfügig anheben.

4 Eigenverbrauchspotenziale

4.1 Schnellladestationen entlang von Bundesfernstraßen

Nach der Lokalisierung und Ermittlung des hier adressierten Potenzials an Rastanlagen und Parkflächen anhand der in AP 1 durchgeführten Geodatenanalyse wird auch hier für den genannten Anwendungsfall das Eigenverbrauchspotenzial an Schnellladestationen analysiert. Zugrunde gelegt wird hier nicht der Status Quo der aktuell installierten Ladeinfrastruktur, sondern Hochrechnungen und Analysen, die vom Reiner Lemoine Institut im Auftrag der Leitstelle Elektromobilität erarbeitet und veröffentlicht wurden. Als Referenzjahr wurde für die hier durchgeführten Analysen das Jahr 2025 der Studie gewählt.

Aufgrund der großen potenziell verfügbaren Flächen und des hohen Eigenbedarfs an Energie an diesen Standorten werden auch hier für die Identifizierung des Potenzials Simulationen mit den typischen Last- und Erzeugungsszenarien durchgeführt.

4.1.1 Datenbeschaffung der Eigenverbrauchsprofile

Für die synthetische Erzeugung der Lastprofile wurden Studienergebnisse von der nationalen Leitstelle zu Grunde gelegt. Diese ist unter <https://nationale-leitstelle.de/wp-content/pdf/broschuere-lis-2025-2030-final-web.pdf> zu finden. Aus der Studie sind die insgesamt verfügbaren Schnellladepunkte (Bild 12 in Studie) und die Verteilung auf verschiedene Usecases (Bild 13 in Studie) ersichtlich. Hierdurch lassen sich die vorhandenen Schnellladepunkte in Deutschland für den Usecase an Achsen ermitteln: ~ 6.000 in 2025. Außerdem ist die zeitlich aufgelöste Auslastung je nach Wochentag ersichtlich (Bild 08 in Studie). Diese wurde auf einen typischen Ladehub an Achsen übertragen. Aus diesem Wochenprofil wurde ein Jahresprofil erzeugt, das als Grundlage für die durchgeführten Simulationen genutzt wird. Die Rahmenbedingungen für den Anwendungsfall sind:

- 16 Ladepunkte à 150 kW
- Maximale Ladeleistung 2,4 MW
- Jahresverbrauch: ~ 4.000 MWh
- Megawattcharging-(MCS)-Ladepunkte für den Schwerlastverkehr wurden nicht berücksichtigt

Die Analyse in Form eines Histogramms ist im folgenden Bild gezeigt.

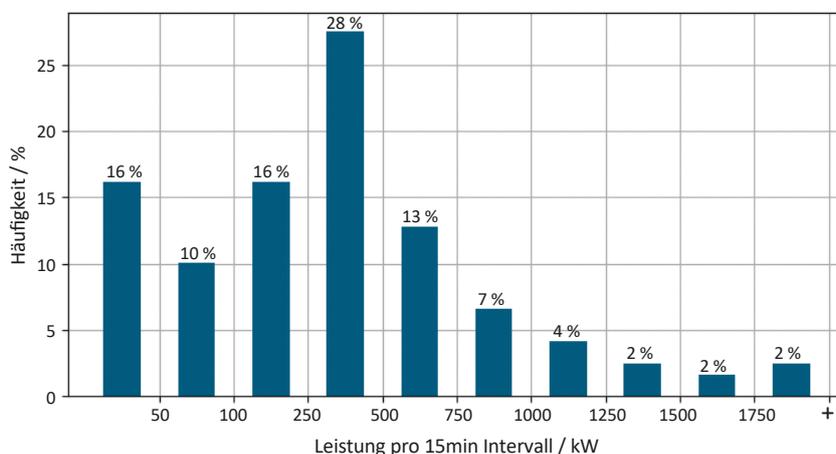


Bild 23: Häufigkeit von Leistungsbedarfen in einem typischen Schnellladehub an Achsen

4.1.2 Simulation des Eigenverbrauchs

Für die Simulationen wurden in einer Pythonumgebung Simulationsmodelle mit 15 Minuten-Auflösung für ein typisches Jahr erstellt. Der PV-Generator wurde dazu generisch mit einer Größe von 250 kVAAC implementiert. Die Wetterdaten mit Minutenwerten wurden aus Messungen am Fraunhofer ISE aus dem Jahr 2016 verwendet. Bezogen auf die letzten 10 Jahre kann dieses Jahr als repräsentatives Jahr betrachtet werden. Die verfügbaren typischen meteorologischen Jahre (TMY) aus Quellen wie z. B. Meteonorm oder PVGIS benutzen als Datengrundlage die Jahre 1990 bis 2010 oder 2020 und sind aufgrund des Klimawandels weniger gut geeignet für Prognosen für die kommenden Jahre. Ein anderer Grund ist die Verfügbarkeit einer höheren Zeitauflösung. TMYs liegen meist nur in stündlicher Auflösung vor. Für die geplante Analyse ergeben sich doch höhere Genauigkeiten durch eine höhere Auflösung. Der PV-Generator ist mit ca. 20 % bezogen auf die Wechselrichterleistung überdimensioniert. Die ist eine in der Praxis verbreitete Auslegung bei heutigen Anlagen. Es bedeutet, dass beim Wechselrichter eine geringere Leistung dimensioniert wird als die installierte PV Leistung der Solarmodule. Da die volle Leistung am Generator nur unter Standardtestbedingungen vorliegt und in der Praxis selten vorkommt, führt diese Dimensionierung trotzdem nur zu sehr geringen Ertragsverlusten. Es wird für die Simulation keine Nah- oder Reihenverschattung berücksichtigt. Außerdem werden zwei Ausrichtungen untersucht: Südausrichtung und Ost-West-Ausrichtung. Die Simulationen wurden sowohl mit Batterie als auch ohne durchgeführt. Dafür wurde eine einfache Lade-strategie im Batteriemanagementsystem zur Optimierung des Eigenverbrauchs implementiert. Das Batteriemanagementsystem (BMS) priorisiert zunächst die Deckung der aktuellen Last. Bestehende Überschüsse werden in der Batterie zwischengespeichert und erst bei voller Batterie ins Netz eingespeist. Wetterprognosen oder Peakshavingalgorithmen sind nicht umgesetzt. In der folgenden Tabelle sind die grundlegenden Simulationsparameter noch einmal dargestellt. Es ist keine Abregelung der PV-Erzeugung implementiert.

Parameter	Wert
Generatortyp	Fixe Aufständerung
Wechselrichter Leistung	N * 250 kVA
Wechselrichtermodell	Generisch
P_{DC}/P_{AC} ratio	1.21
PV Module	Generisch
Max. PV Generator Spannung	1.000 V
Anzahl Module pro String	17
Anzahl Strings	N*4
Ausrichtung	Süd/Ost-West
Aufstellwinkel	Süd: 30° Ost-West: 10°
Tracker System	-
Wetterdaten	Messdaten in Minutenauflösung von 2016 (Quelle: Fraunhofer ISE)
Batterieleistung	- /1 MW
Batteriekapazität	1/2/3/4 MWh

Tab. 22: Grundsätzliche Simulationsparameter

Als Ergebnis sind in der folgenden Grafik die Verläufe einer Woche im Mai zu sehen, bei denen jeweils die PV-Leistung, die Last und die Leistung des Batterieumrichters gezeigt sind. Auch hier zeigt sich, dass die Nutzung der Schnellladehubs gut mit der Erzeugung der PV-Anlage übereinstimmt.

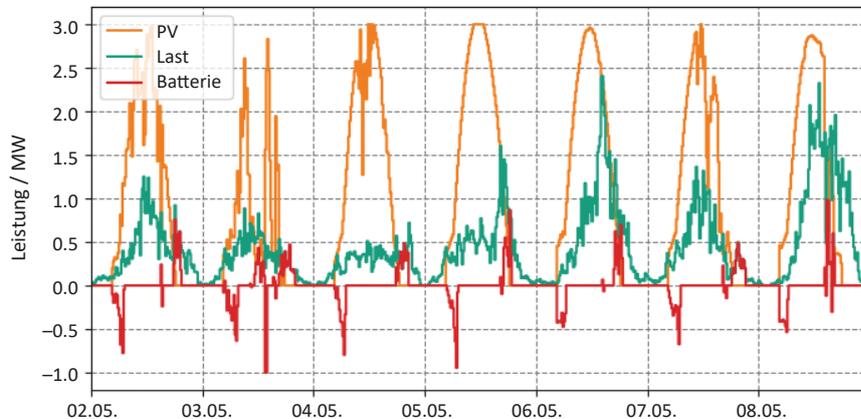


Bild 24: Zeitlicher Verlauf von PV, Last und Batterieleistung im Mai für den Standort Schnellladehub

4.1.3 Ergebnisse zum Eigenverbrauch

Die erste Auswertung erfolgt zunächst ohne den Einsatz eines Speichers. In den folgenden Kurven werden die Ergebnisse gezeigt. In Abhängigkeit der installierten PV-Generatorleistung sind hier die bilanzielle Autarkie über ein Jahr, der Autarkiegrad und die Eigenverbrauchsquote dargestellt. Bei der bilanziellen Autarkie wird nur die PV-Energie im Verhältnis zur benötigten Energie betrachtet, ohne dass zeitliche Verläufe berücksichtigt werden. Die Kurve steigt linear mit der PV an, da pro installiertem kW_{peak} aufgrund der homogenen Anlage ein konstanter Wert erreicht wird. Aufgrund des höheren Jahresertrags bei Südausrichtung steigt die Kurve hier steiler an. Zwischen 2,75 MW und 3 MW wird bilanzielle Autarkie erreicht, sodass mit der Anlage die Menge erzeugt wird, die am Standort auch ladetechnisch benötigt wird. Die Autarkiequote mit Berücksichtigung der zeitlichen Verläufe liegt hier bei ca. 50 % ohne Speicher und ist damit sehr hoch im Vergleich zu anderen Anwendungen. Hierdurch bestätigt sich noch einmal die gute PV-Eignung an Schnellladehubs. Die Eigenverbrauchsquote beschreibt die vor Ort direkt verbrauchte Energie im Verhältnis zu vor Ort durch die PV-Anlage erzeugte Energie. Diese sinkt mit der Generatorleistung und liegt im Bereich der bilanziellen Autarkie bei 50 – 60 %, bei Ost-West-Ausrichtung um ca. 5 %-Punkte höher. Da die Autarkiequote in beiden Fällen jedoch gleich ist, bedeutet dies, dass bei Südausrichtung mehr Überschüsse ins Netz eingespeist werden.

Ausgehend von der bilanziellen Autarkie wurde dem Modell ein Speichersystem mit konstanter Leistung und verschiedenen Energiekapazitäten hinzugefügt, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Grafik gezeigt und beziehen sich auf eine Generatorleistung von 3 MW. Wie erwartet lässt sich eine deutliche Steigerung erzielen. Mit den ersten 1.000 kWh Kapazität kann der Autarkiegrad um ca. 7 %-Punkte gesteigert werden. Mit steigender Kapazität flacht die Kurve jedoch ab, sodass die Steigerung ebenfalls abnimmt. Bei Südausrichtung flacht die Kurve aufgrund der hohen Peakleistung am Mittag bei größeren Kapazitäten weniger stark ab.

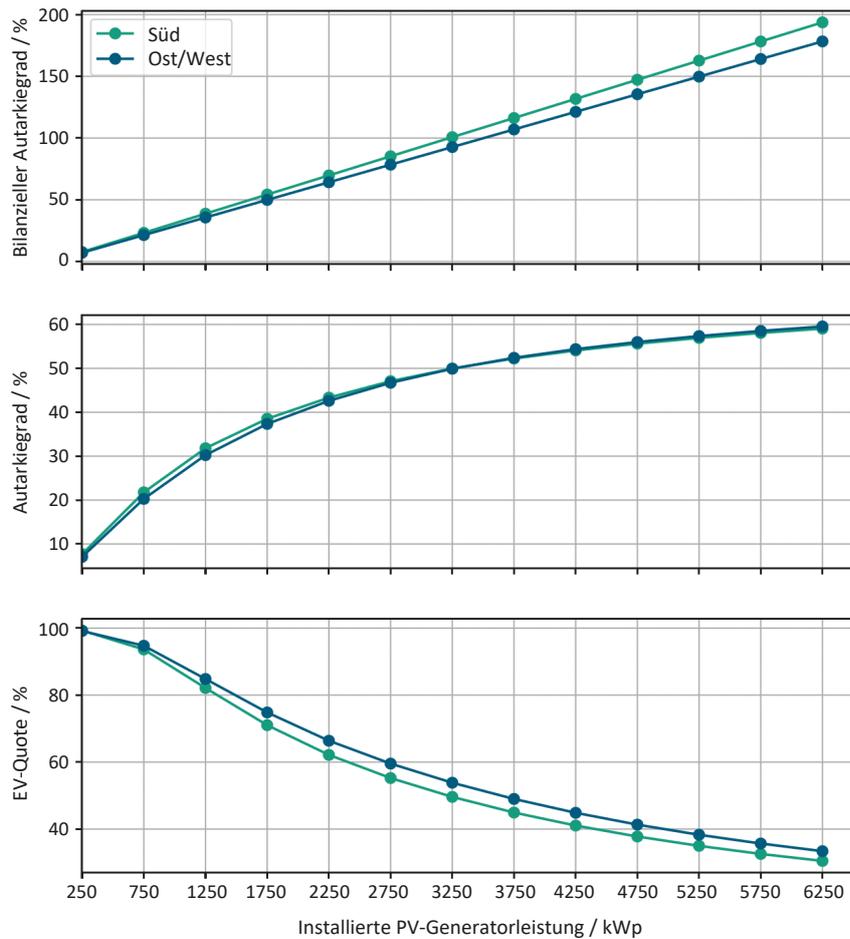


Bild 25: Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einem typischen Schnellladehub

Aus den Simulationsergebnissen lassen sich die folgenden Ergebnisse schlussfolgern:

- Pro Ladepunkt werden gemäß Hochrechnungen ca. 250 MWh benötigt
- Um bilanzielle Autarkie zu erreichen oder eine Autarkiequote von ~ 50 % kann folgende Faustregel abgeleitet werden (2025):

$$P_{PV\text{-Generator}} = E_{\text{Jahresverbrauch}} * 0,75 \frac{kW}{MWh} \text{ bzw. } 190 \frac{kW}{\text{Ladepunkt}} \quad (1)$$

- Pro MWh Batteriespeicher lassen sich ca. 4-6 %-Punkte höherer Autarkiegrad erreichen
- Prinzipiell ist Südausrichtung favorisiert, falls Überschuss durch Speicher oder Netzeinspeisung genutzt wird
- Durch Ausbau der MCS-Ladestruktur werden die Zahlen noch weiter nach oben skalieren

Bei einer Hochrechnung auf Deutschland gemäß der Studie Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf von der nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur (BMVI, 2020, Bild 12 und 13) ergeben sich 6.000 Ladepunkte an Achsen bis 2025. Mit den Simulationsergebnissen (jährlicher Energiebedarf von 150 MWh pro Ladepunkt) ergibt sich ein Bedarf von 1.500 GWh pro Jahr. Mit dem Ziel einer bilanziellen Autarkie ergäbe sich die Notwendigkeit der Installation ca. 1.124 MWp.

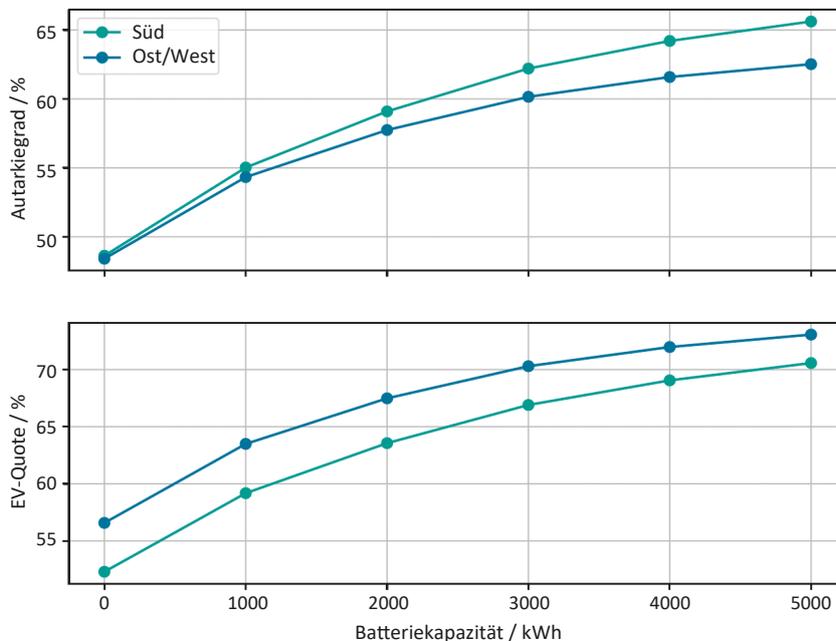


Bild 26: Simulationsergebnisse mit Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einem typischen Schnellladehub mit einem PV-Generator mit 3 MW_{peak}

4.1.4 Wirtschaftliche Betrachtungen

Aufgrund der extremen Volatilität der Marktpreise für die Installationen aber auch der Bezugspreise wurden keine detaillierten ökonomischen Betrachtungen durchgeführt. Die hohe erreichte EV-Quote führt jedoch für den gezeigten Anwendungsfall zu einer sehr hohen Wirtschaftlichkeit der Anlagen. Die hohen Erlöse pro schnellgeladener kWh von aktuell ca. 40 – 80 Cent/kWh (Stand 2023) führt ebenso zu einer sehr guten Wirtschaftlichkeit der Anlagen.

Für die Betrachtung einer Wirtschaftlichkeit sollten aber neben der EV-Optimierung (gegeben durch höhere Erlöse pro kWh beim Laden von Fahrzeugen im Vergleich zur Netzeinspeisung) auch die Kostenvorteile durch die Implementierung eines Speichers im Peakshaving Modus betrachtet werden. Auch die langen Zeitkonstanten bei Ausbauten der Netzanschlüsse für die benötigten Ladeleistungen werden in den nächsten Jahren ohnehin dazu führen, dass derartige Systeme mit Speichern ausgestattet werden. Die EV-Optimierung ist hierbei als positiver Nebeneffekt zu verstehen.

Seitens der Privatwirtschaft ist hier aus den genannten Gründen ein großes Interesse an den umliegenden Potenzialflächen zu erwarten.

4.2 Tunnel an Bundesfernstraßen

Das prinzipielle Vorgehen in diesem Arbeitspaket korrespondiert zu dem der zuvor behandelten Eigenverbrauchspotenzialen an Schnelladehubs. Für die Simulationen wurden die aufgeführten Profile von Tunneln an Bundesstraßen verwendet. Diese sind jedoch ebenfalls auf Autobahntunnel übertragbar, da die benötigte technische Ausstattung nicht von der Straßenart abhängt.

4.2.1 Datenbeschaffung der Eigenverbrauchsprofile

Die Aussagekraft der Simulationsergebnisse hängt maßgeblich von der Genauigkeit der eingepflegten Lastprofile ab. Im ersten Schritt wurden vom Verkehrsministerium des Landes Baden-Württemberg Jahresverbrauchsdaten von 10 verschiedenen Tunneln an Bundesstraßen geliefert (vgl. Tabelle 23). Von zwei der Tunneln wurden außerdem detaillierte, zeitaufgelöste Profile für ein komplettes Jahr geliefert.

Die Profile liegen in einer Zeitauflösung von 15 Minuten vor und konnten daher direkt in das Modell implementiert werden. Die Profile beider Tunneln wurden jeweils in eigene Modelle überführt und separat analysiert. Allgemein ist zu bemerken, dass Tunnel aufgrund ihrer adaptiven Beleuchtung ein sehr PV geeignetes Lastprofil haben. Durch die Adaption an den Ein- und Ausgängen der Tunneln an die Tageslichtverhältnisse ergibt sich zum einen über den Tag ein der Sonneneinstrahlung folgender Verlauf. Zum anderen ergeben sich auch saisonale Schwankungen durch kürzere Tage im Winter, die sich EV-freundlich auswirken.

Nr.	RP	LK/Stadtkreis	Straßenbez.	Name	Länge/m	Jahresverbrauch/kWh
1	RPF	Emmendingen	B 294	Hugenwaldtunnel (Waldkirch)	1.135	398.000
2	RPF	Ortenaukreis	B 28	Tunnel Oberkirch Ost	255	400.000
3	RPF	Ortenaukreis	B 28	Tunnel Oberkirch West	531	s. o.
4	RPK	Rhein-Neckar-Kreis	B 535	Tunnel OU Schwetzingen-Plankstadt	650/450	350.000
5	RPK	Neckar-Odenwald-Kreis	B 292	Eckenbergtunnel (Adelsheim)	295	81.930
6	RPS	Böblingen	L 1182	Tunnel Darmsheim	468	148.500*
7	RPS	Ludwigsburg	B 27a	Tunnel Stammheim	288	67.000
8	RPT	Zollernalbkreis	B 463	Tunnel Albstadt-Laufen	540	192.000
9	RPT	Reutlingen	B 312	Scheibengipfeltunnel Reutlingen	1.910	615.089
10	RPT	Ravensburg	B 30	Wernerhof-Tunnel Ravensburg	231/230	131.190

Tab. 23: Jahresverbrauch von 10 Tunneln in Baden-Württemberg (Quelle: Verkehrsministerium BaWü)

4.2.1.1 Analyse der Jahresverbräuche

Anhand der gelieferten Jahresverbräuche wurde über einen linearen Curvefit eine allgemeine Näherungsformel für den Jahresverbrauch in Tunneln ermittelt. Das Ergebnis mit der Eintragung der berücksichtigten Verbräuche zeigt das folgende Bild. Auch wenn verschiedene Beleuchtungssysteme (Na-Dampf, LED und Hybrid) zum Einsatz kommen, zeigen sich relativ geringe Abweichungen von der Näherungsgerade.

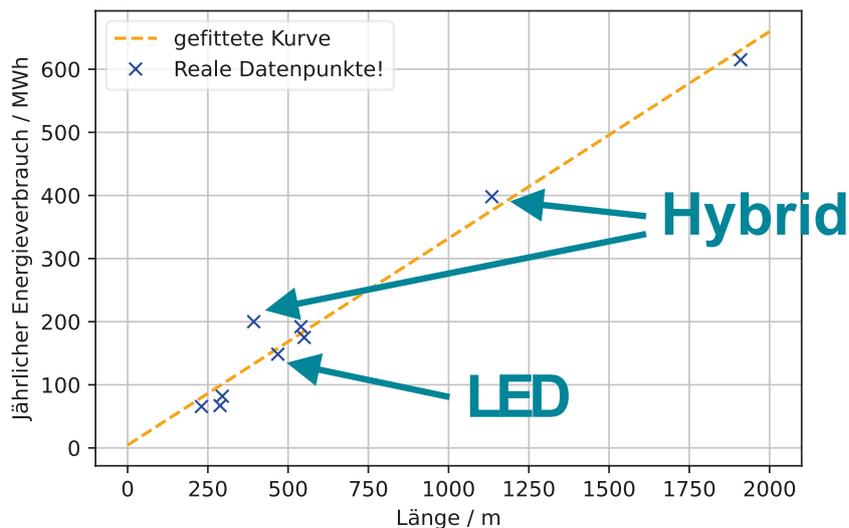


Bild 27: Jahresenergiebedarf der untersuchten Tunnel

Als allgemeine Formel ergibt sich folgende Formel:

$$E_{\text{Jahresverbrauch}}(l) = 4,4 \text{ MWh} + 0,328 \frac{\text{MWh}}{\text{m}} * l \quad (2)$$

Zu Beachten ist jedoch, dass diese nur auf Tunnel mit einer Mindestlänge von 80 m anwendbar ist, da erst ab dieser Länge entsprechende technische Ausstattung normativ gefordert ist. Bei genauerer Betrachtung der Tunnelverbräuche ergibt sich, dass die Steigung in MWh/m doch eine gewisse Streuung hat. Dies zeigt im Vergleich nochmal die folgende Grafik. Der Wert der Steigung schwankt zwischen 0,2 und 0,5 MWh/m. Im Einzelfall hängt der Verbrauch also doch von vielen individuellen Faktoren ab. Die Formel ist daher nur sinnvoll für eine grobe, erste Abschätzung.

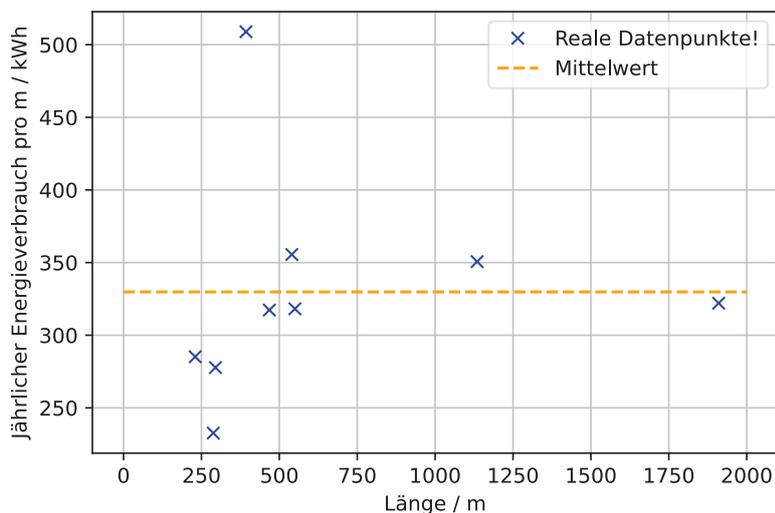


Bild 28: Jahresenergiebedarf pro m der untersuchten Tunnel

4.2.1.2 Profil Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt

Wie in folgendem Histogramm zu erkennen ist, liegt die Grundlast bei ca. 20 kW und die maximale Leistung bei 140 kW. Der Leistungsbedarf in den Zwischenstufen verteilt sich eher homogen. In der danach folgenden Grafik ist die saisonale Schwankung im Verbrauch dargestellt. Aufgrund der längeren Tage im Sommer ergibt sich hier zwischen einem durchschnittlichen Wintertag im Januar und einem Sommertag im Juni oder Juli fast der doppelte Energiebedarf.

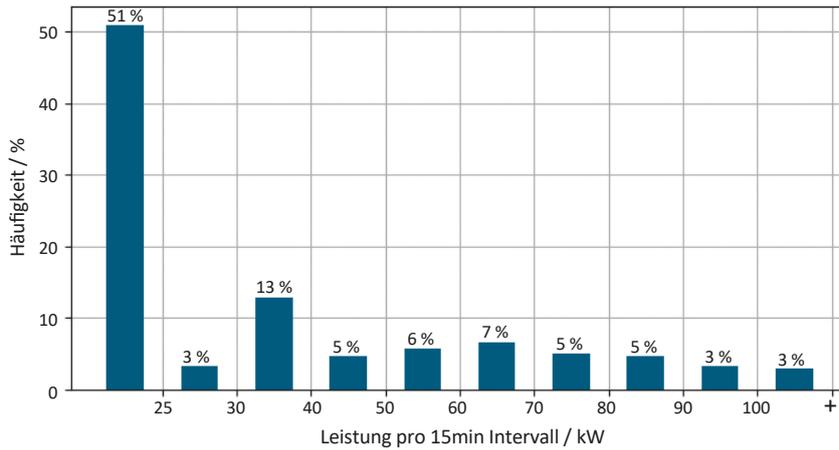


Bild 29: Häufigkeit von Leistungsbedarfen am Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt

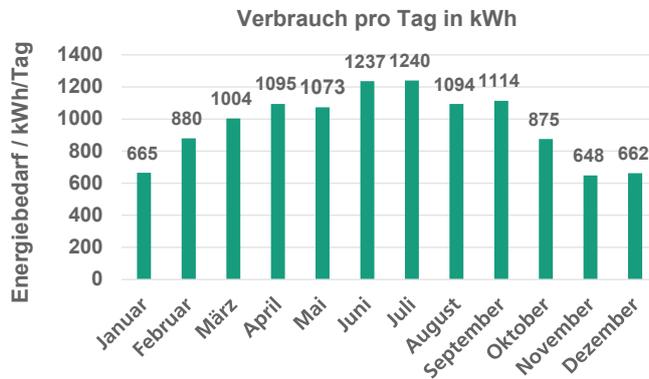


Bild 30: Durchschnittlicher Energiebedarf pro Tag Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt

4.2.1.3 Profil Tunnel L1182 Darmsheim

Insgesamt ergeben sich bei diesem Tunnel bedingt durch den geringeren Jahresverbrauch entsprechend geringere Leistungen im Histogramm. Die Grundlast liegt bei ca. 10 kW und die maximale Leistung bei 60 kW. Der Leistungsbedarf in den Zwischenstufen verteilt sich eher homogen mit fallender Tendenz hin zu größeren Leistungen. In der danach folgenden Grafik ist die saisonale Schwankung im Verbrauch dargestellt. Aufgrund der längeren Tage im Sommer ergibt sich auch hier zwischen einem durchschnittlichen Wintertag im Januar und einem Sommertag im Juni oder Juli fast der doppelte Energiebedarf. Der geringere Jahresverbrauch ist vor allem auf den insgesamt kleineren Tunnel (nur eine Röhre für beide Fahrtrichtungen zurückzuführen).

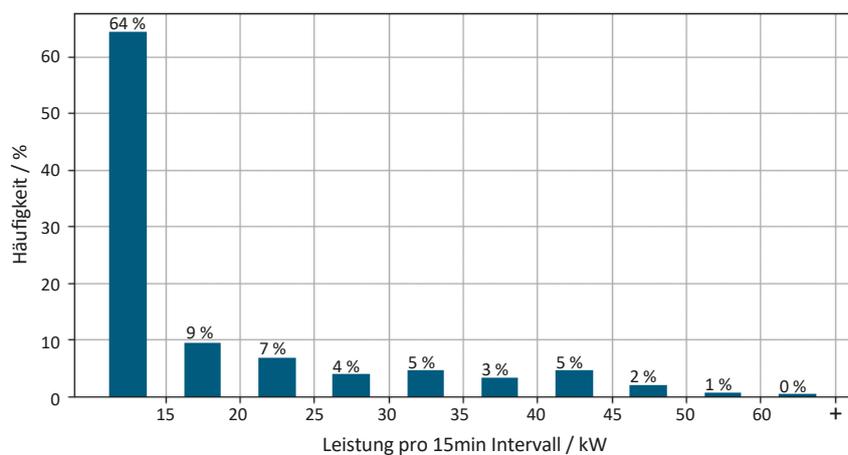


Bild 31: Häufigkeit von Leistungsbedarfen am Tunnel L1182 Darmsheim

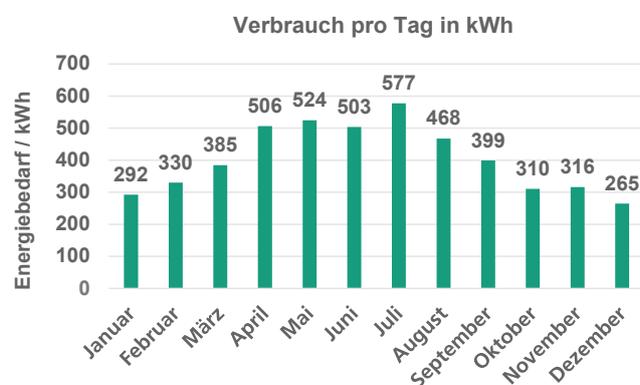


Bild 32: Durchschnittlicher Energiebedarf pro Tag Tunnel L1182 Darmsheim

4.2.2 Simulation des Eigenverbrauchs

Für die Simulationen wurden in einer Pythonumgebung Simulationsmodelle mit 15 Minuten-Auflösung für ein typisches Jahr erstellt. Der PV-Generator wurde dazu generisch mit einer Größe von 25 kVAAC implementiert. Die Wetterdaten mit Minutenwerten wurden aus Messungen am Fraunhofer ISE aus dem Jahr 2016 verwendet. Bezogen auf die letzten 10 Jahre kann dieses Jahr als repräsentatives Jahr betrachtet werden. Die verfügbaren typischen meteorologischen Jahre aus Quellen wie z. B. Meteonorm oder PVGIS benutzen als Datengrundlage die Jahre 1990 bis 2010 oder 2020 und sind aufgrund des Klimawandels weniger gut geeignet für Prognosen für die kommenden Jahre. Ein anderer Grund ist die Verfügbarkeit einer höheren Zeitauflösung. TMYs liegen meist nur in stündlicher Auflösung vor. Für die geplante Analyse ergeben sich höhere Genauigkeiten durch eine höhere Auflösung. Der PV-Generator ist mit ca. 20 % bezogen auf die Wechselrichterleistung überdimensioniert. Es wird für die Simulation keine Nah- oder Reihenverschattung berücksichtigt. Außerdem werden zwei Ausrichtungen untersucht: Südausrichtung und Ost-West-Ausrichtung. Die Simulationen wurden sowohl mit Batterie als auch ohne durchgeführt. Dafür wurde eine einfache Ladestrategie im Batteriemanagementsystem zur Optimierung des Eigenverbrauchs implementiert. Das BMS priorisiert zunächst die Deckung der aktuellen Last. Bestehende Überschüsse werden in der Batterie zwischengespeichert und erst bei voller Batterie ins Netz eingespeist. Wetterprognosen oder Peakshavingalgorithmen sind nicht umgesetzt. In der folgenden Tabelle sind die grundlegenden Simulationsparameter noch einmal dargestellt. Es ist keine Abregelung der PV-Erzeugung implementiert. Da die PV-Erzeugungsdaten nicht spezifisch für den jeweiligen Standort im jeweiligen Jahr aufgrund der fehlenden Wetterdaten zur Verfügung stehen, ist davon auszugehen, dass die hier durchgeführten Simulationen den EV-Anteil unterschätzen.

Parameter	Wert
Generatortyp	Fixe Aufständerung
Wechselrichter Leistung	N * 25 kVA
Wechselrichtermodell	Generisch
P _{DC} /P _{AC} ratio	1.21
PV Module	Generisch
Max. PV Generator Spannung	1.000 V
Anzahl Module pro String	17
Anzahl Strings	N*4
Ausrichtung	Süd/Ost-West
Aufstellwinkel	Süd: 30° Ost-West: 10°
Tracker System	-
Wetterdaten	Messdaten in Minutenauflösung von 2016 (Quelle: Fraunhofer ISE)
Batterieleistung	- /25 kW
Batteriekapazität	25/50/75/100 kWh

Tab. 24: Grundsätzliche Simulationsparameter

4.2.2.1 Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt

Als Ergebnis sind in der folgenden Grafik die Verläufe einer Woche im Mai zu sehen bei denen jeweils die PV-Leistung, die Last und die Leistung des Batterieumrichters gezeigt sind. Auch hier zeigt sich, dass der Verbrauch gut mit der Erzeugung der PV-Anlage übereinstimmt.

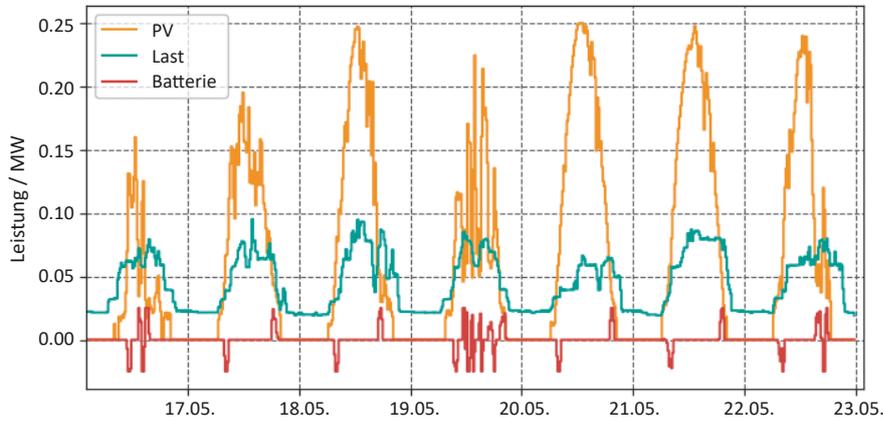


Bild 33: Zeitlicher Verlauf von PV, Last und Batterieleistung im Mai für den Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt

4.2.2.2 Tunnel L1182 Darmsheim

Als Ergebnis sind in der folgenden Grafik die Verläufe einer Woche im Mai zu sehen bei denen jeweils die PV-Leistung, die Last und die Leistung des Batterieumrichters gezeigt sind. Auch hier zeigt sich, dass der Verbrauch gut mit der Erzeugung der PV-Anlage übereinstimmt.

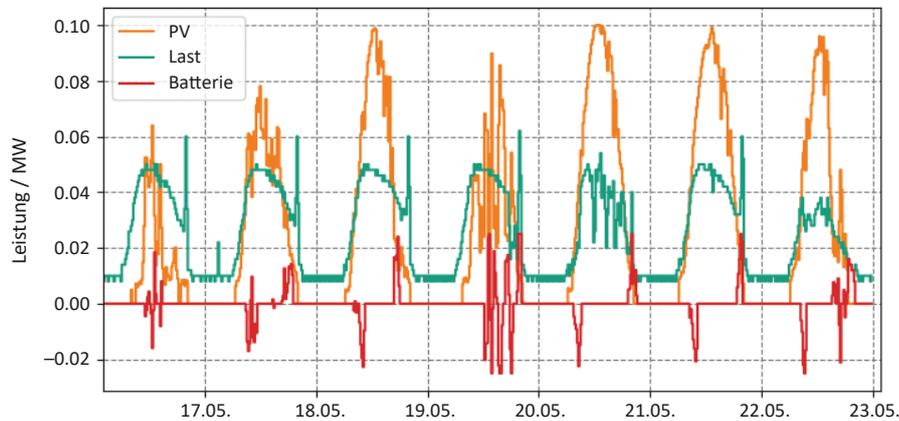


Bild 34: Zeitlicher Verlauf von PV, Last und Batterieleistung im Mai für den Tunnel L1182 Darmsheim

4.2.3 Ergebnisse zum Eigenverbrauch

4.2.3.1 Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt

Die erste Auswertung erfolgt zunächst ohne den Einsatz eines Speichers. In den folgenden Kurven werden die Ergebnisse gezeigt. In Abhängigkeit der installierten PV-Generatorleistung sind hier die bilanzielle Autarkie über ein Jahr, der Autarkiegrad und die Eigenverbrauchsquote. Bei der bilanziellen Autarkie wird nur die PV-Energie im Verhältnis zur benötigten Energie gesetzt, ohne dass zeitliche Verläufe berücksichtigt werden. Die Kurve steigt linear mit der PV an, da pro installiertem kWp aufgrund der homogenen Anlage ein konstanter Wert erreicht wird. Aufgrund des höheren Jahresertrages bei Südausrichtung steigt die Kurve hier steiler an. Zwischen 250 kW und 275 kW wird bilanzielle Autarkie erreicht, sodass mit der Anlage die Menge erzeugt wird, die am Standort auch ladetechnisch benötigt wird. Die Autarkiequote mit Berücksichtigung der zeitlichen Verläufe liegt hier bei über 50 % ohne Speicher und ist damit sehr hoch im Vergleich zu anderen Anwendungen. Hierdurch bestätigt sich noch einmal die gute PV-Eignung an Tunneln. Die Eigenverbrauchsquote beschreibt die vor Ort direkt verbrauchte Energie im Verhältnis zu vor Ort durch die PV-Anlage erzeugte Energie. Diese sinkt mit der Generatorleistung und liegt im Bereich der bilanziellen Autarkie bei 50 – 60 %, bei der Ost-West-Ausrichtung um ca. 5 %-Punkte höher. Da die Autarkiequote in beiden Fällen jedoch gleich ist, bedeutet dies, dass bei der Südausrichtung mehr Überschüsse ins Netz eingespeist werden.

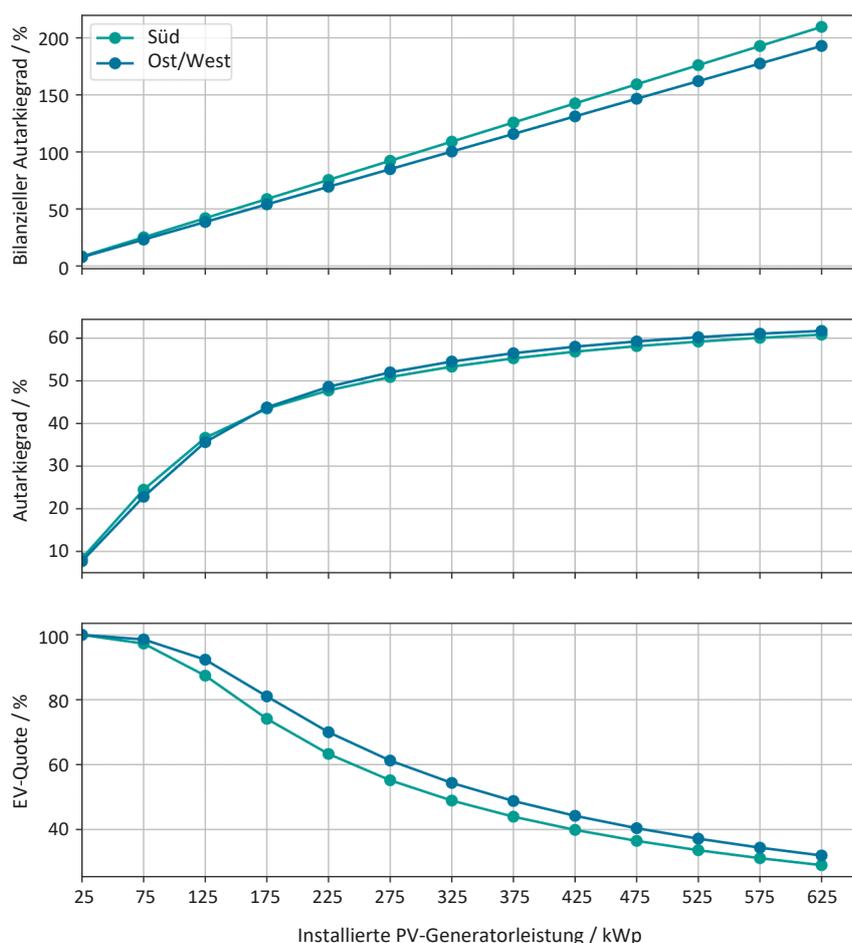


Bild 35: Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung am Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt

Ausgehend von bilanzieller Autarkie wurde dem Modell ein Speichersystem mit konstanter Leistung und verschiedenen Energiekapazitäten hinzugefügt, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Grafik gezeigt und beziehen sich auf eine Generatorleistung von 275 kW. Wie erwartet lässt sich eine Steigerung erzielen. Mit den ersten 25 kWh Kapazität kann der Autarkiegrad um ca. 4%-Punkte gesteigert werden. Mit steigender Kapazität flacht die Kurve jedoch ab, sodass die Steigerung ebenfalls abnimmt. Bei Südausrichtung flacht die Kurve aufgrund der hohen Peakleistung am Mittag bei größeren Kapazitäten weniger stark ab.

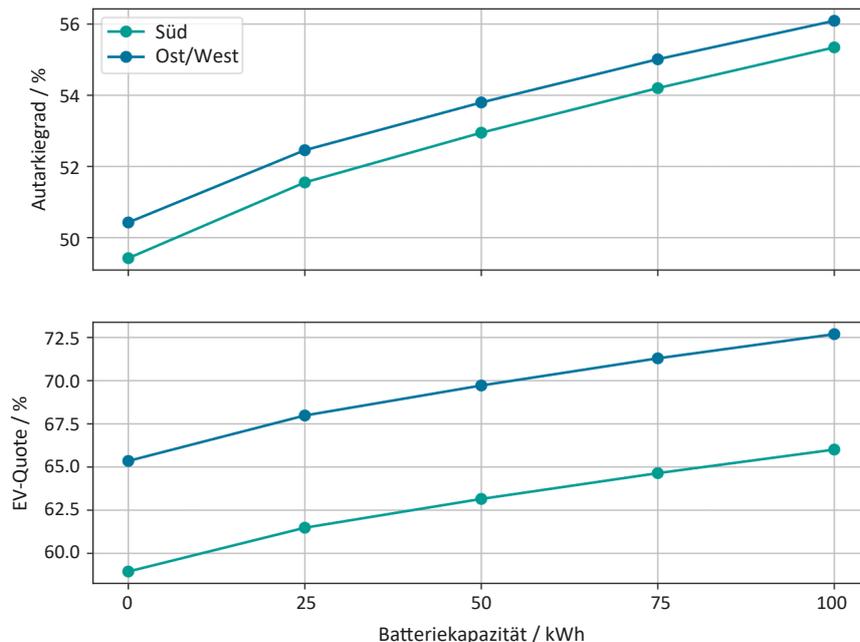


Bild 36: Simulationsergebnisse mit Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einem typischen Schnellladehub mit einem PV-Generator mit 250 kW_{peak} am Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt

4.2.3.2 Tunnel L1182 Darmsheim

Die erste Auswertung erfolgt zunächst ohne den Einsatz eines Speichers. In den folgenden Kurven werden die Ergebnisse gezeigt. In Abhängigkeit der installierten PV-Generatorleistung sind hier die bilanzielle Autarkie über ein Jahr, der Autarkiegrad und die Eigenverbrauchsquote. Bei der bilanziellen Autarkie wird nur die PV-Energie im Verhältnis zur benötigten Energie gesetzt, ohne dass zeitliche Verläufe berücksichtigt werden. Die Kurve steigt linear mit der PV an, da pro installiertem kWp aufgrund der homogenen Anlage ein konstanter Wert erreicht wird. Aufgrund des höheren Jahresertrages bei Südausrichtung steigt die Kurve hier steiler an. Zwischen 100 kW und 125 kW wird bilanzielle Autarkie erreicht, sodass mit der Anlage die Menge erzeugt wird, die am Standort auch ladetechnisch benötigt wird. Die Autarkiequote mit Berücksichtigung der zeitlichen Verläufe liegt hier bei über 50 % ohne Speicher und ist damit sehr hoch im Vergleich zu anderen Anwendungen. Hierdurch bestätigt sich noch einmal die gute PV-Eignung an Tunneln. Die Eigenverbrauchsquote beschreibt die vor Ort direkt verbrauchte Energie im Verhältnis zu vor Ort durch die PV-Anlage erzeugte Energie. Diese sinkt mit der Generatorleistung und liegt im Bereich der bilanziellen Autarkie bei 50 – 60 %, bei der Ost-West-Ausrichtung um ca. 5 %-Punkte höher. Da die Autarkiequote in beiden Fällen jedoch gleich ist, bedeutet dies, dass bei der Südausrichtung mehr Überschüsse ins Netz eingespeist werden.

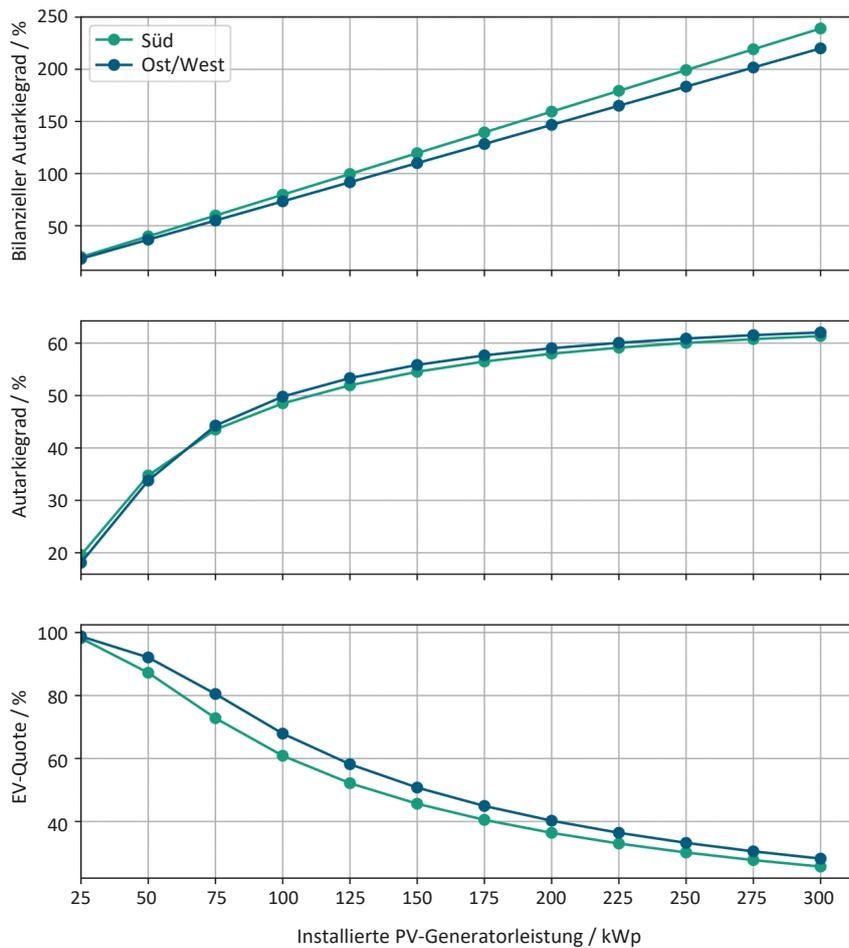


Bild 37: Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung am Tunnel L1182 Darmshiem

Ausgehend von bilanzieller Autarkie wurde dem Modell ein Speichersystem mit konstanter Leistung und verschiedenen Energiekapazitäten hinzugefügt, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Grafik gezeigt und beziehen sich auf eine Generatorleistung von 125 kW. Wie erwartet lässt sich eine Steigerung erzielen. Mit den ersten 25 kWh Kapazität kann der Autarkiegrad um ca. 4%-Punkte gesteigert werden. Mit steigender Kapazität flacht die Kurve jedoch ab, sodass die Steigerung ebenfalls abnimmt. Bei Südausrichtung flacht die Kurve aufgrund der hohen Peakleistung am Mittag bei größeren Kapazitäten weniger stark ab.

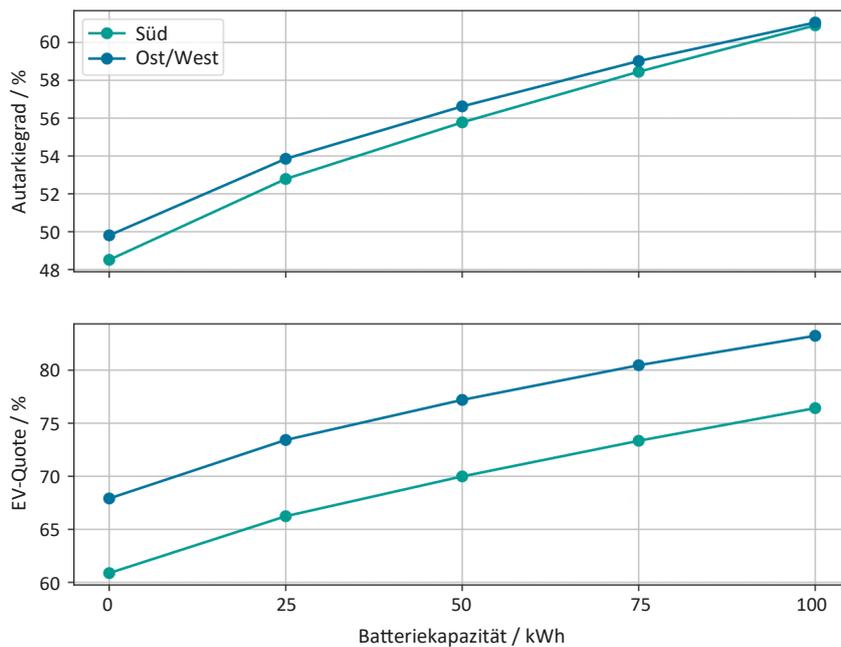


Bild 38: Simulationsergebnisse mit Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einem typischen Schnelladehub mit einem PV-Generator mit 100 kWp am Tunnel L1182 Darmsheim

4.2.4 Wirtschaftliche Betrachtungen

Für die Betrachtung einer Wirtschaftlichkeit sollten aber neben der EV-Optimierung (gegeben durch höhere Bezugspreise pro kWh beim Bezug aus dem Netz im Vergleich zu den Stromgestehungskosten der Anlage) auch systemtechnische Vorteile betrachtet werden. Alle Tunnel ab 80 m müssten nach heutigem Normenstand eine Notstromversorgung vorhalten, die den sicheren Betrieb mit reduzierten Verbrauchern im Notfall für eine Stunde sicherstellt. Daher ist schon heute ist an jedem Tunnel ein AC-gekoppeltes Speichersystem vorhanden. Bei entsprechender Planung und Implementierung eines Speichermanagements, das immer die für die Notstromversorgung notwendige Kapazität vorhält, kann mit geringem finanziellem Mehraufwand ein entsprechendes hybrides Speichersystem integriert werden. Die Infrastruktur für die Notstromversorgung kann so neben der Notstromversorgung gleichzeitig für die Eigenverbrauchsoptimierung der photovoltaisch erzeugten Energie genutzt werden. Besonders bei der Planung neuer Tunnel kann dies Sinn ergeben und sollte von vornherein mitbedacht werden.

4.2.5 Allgemeine Schlussfolgerungen und nationale Analyse

Die Ergebnisse der Simulation lassen auch in diesem Anwendungsfall die Aufstellung einer überschlägigen Faustregel für eine 100%ige bilanzielle Autarkie bei PV-Anlagen im Kontext von Tunnelversorgungen zu. Bei der Auslegung des PV-Generators $P_{PV} \setminus kW = E_{Jahresverbrauch} * (0,66..0,71) \frac{kW}{MWh}$ in Abhängigkeit des Jahresverbrauches ergibt sich eine Autarkiequote von ca. 50 %. Im Kontext der Studie wurde diese Formel auf die Bauwerksdatenbank mit allen bestehenden Autobahntunneln ab 80 m Länge angewendet. Die Längenverteilung der Tunnel zeigt das folgende Bild. Der Median beträgt 309 m, die Gesamtlänge aller Tunnel beträgt 282 km. Insgesamt wurden 551 Eintragungen berücksichtigt. Dadurch ergibt sich überschlägig ein Gesamtbedarf an den deutschen Autobahntunneln von ca. $\sum E = 95.000 MWh = 95 GWh$. Mit der oben stehenden Formel wären daher $\sim 70 MW_{p,PV,AC}$ für bilanzielle Autarkie notwendig.

Zusätzlich besteht hier Potenzial an den Tunneln entlang der Bundesstraßen. Diese wurde aufgrund fehlender Daten nicht weiter quantifiziert.

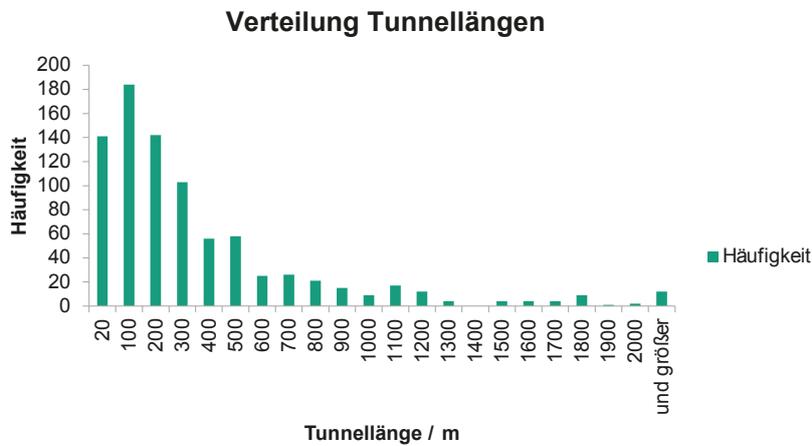


Bild 39: Längenverteilung der in der Bauwerksdatenbank enthaltenen Tunnel

4.3 PV-Aufdachanlagen an Meistereigehöften

Die Integration/Nutzung von vorhandenen Dachflächen zur Installation von PV-Anlagen ist aus verschiedenen Gründen wichtig bei der Ermittlung des Gesamtpotenzials. Zum einen handelt es sich dabei definitionsgemäß um bereits versiegelte Flächen, damit sind diese EEG einspeisetauglich. Zum anderen besteht je nach Anwendungsfall auch die Möglichkeit den lokalen Eigenverbrauch teilweise durch Solarstrom zu decken, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit der Anlagen verbessert. In diesem AP wird das Eigenverbrauchspotenzial an einer durchschnittlichen Straßenmeisterei analysiert.

4.3.1 Simulation des PV-Eigenverbrauchs

4.3.1.1 Aktueller Verbrauch ohne Elektromobilität

Die Aussagekraft der Simulationsergebnisse hängt maßgeblich von der Genauigkeit der eingepflegten Lastprofile ab. Im ersten Schritt wurden vom Verkehrsministerium des Landes Baden-Württemberg Jahresverbrauchsdaten von 9 verschiedenen Straßenmeistereien geliefert (vgl. Tabelle 25). Da seitens der Energieversorger erst ab einem Jahresbedarf größer 100.000 kWh detaillierte Lastprofile in 15 Minutenauflösung erfasst werden, liegen zu diesen Meistereien jedoch keine zeitaufgelösten Profile vor. Die verfügbaren Standardlastprofile vom BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.) sind auf den Verbrauch in einer Meisterei nur sehr eingeschränkt anwendbar, da der Verbrauch sich gänzlich anders verteilt als in typischen Gewerbebetrieben mit Bürotätigkeit. Dies haben Gespräche mit Beteiligten aus dem Verkehrsministerium und sich aus dem Austausch mit einem Straßenmeister ergeben.

Über die BAST konnte das Profil der Straßenmeisterei Hannover zeitaufgelöst in 15-Minuten-Schritten beschafft werden. Der dortige Verbrauch ist jedoch eher überdurchschnittlich (~ 350.000 kWh/Jahr), da dort einige Verbraucher existent sind, die nicht überall vorhanden sind. Das Profil wurde daher um die eine entsprechende Grundlast reduziert, um eine Übertragung zu ermöglichen. Anschließend wurde das Profil auf den Jahresverbrauch der Straßenmeisterei (SM) Kirchzarten skaliert. Diese wird in den folgenden Simulationen als typische SM betrachtet. In der folgenden Grafik ist als Ergebnis ein Histogramm dargestellt, das die Häufigkeit der dargestellten Leistungsbereiche über ein typisches Jahr darstellt.

Nr.	RP	LK	Bezeichnung	Jahresverbrauch/kWh
1	RPF	Breisgau-Hochschwarzwald	SM Kirchzarten	42.000
2	RPK	Freudenstadt	SM Dornstetten	23.800
3	RPS	Esslingen-Göppingen	SM Deizisau	44.340
4	RPS	Ostalbkreis	SM Ellwangen	59.000
5	RPT	Alb-Donau-Kreis	SM Ehingen	34.900
6	RPK	Neckar-Odenwald-Kreis	SM Buchen	37.621
7	RPK	Neckar-Odenwald-Kreis	SM Mosbach	21.008
8	RPS	Böblingen	SM Leonberg	11.428
9	RPS	Böblingen	SM Herrenberg	12.500

Tab. 25: Jahresverbrauch von 9 Straßenmeistereien in Baden-Württemberg (Quelle: Verkehrsministerium BaWü)

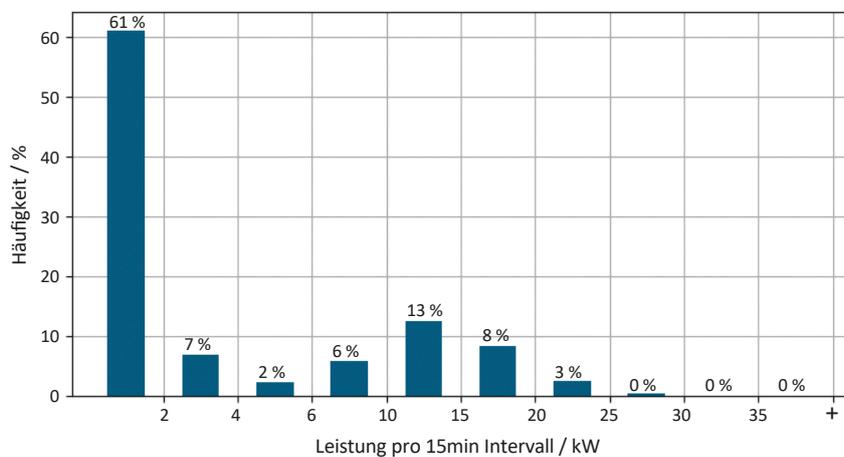


Bild 40: Häufigkeit von Leistungsbedarfen an einer typischen Straßenmeisterei

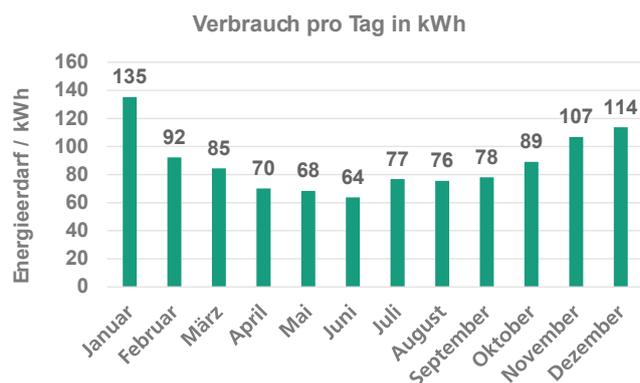


Bild 41: Durchschnittlicher Energiebedarf pro Tag in einer durchschnittlichen Straßenmeisterei mit 32 MWh Jahresverbrauch

4.3.1.2 Verbrauch mit Umstieg der Flotte auf Elektrofahrzeuge

Zum Zeitpunkt der Anfertigung der Studie waren alle Fahrzeuge in den untersuchten Straßenmeistereien mit Verbrennungsmotoren ausgestattet. Ein Teil- oder Vollumstieg auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge würde das Eigenverbrauchspotenzial an den untersuchten Standorten deutlich steigern, falls die Fahrzeuge zu einem relevanten Anteil auch am Standort geladen werden könnten. Zu den gelieferten Automeistereien sind auch Daten über die Anzahl bestimmter Fahrzeugklassen und entsprechende durchschnittliche km-Laufleistung vorhanden. In dieser Studie wurde nur die Fahrzeugklasse bis 3,5 t betrachtet, da hier der Umstieg am einfachsten und kurzfristigsten möglich ist. Für Fahrzeugklassen über 3,5 t sei an dieser Stelle auf das Projekt Aladin verwiesen, in dem diese ausführlich untersucht werden. Über durchschnittliche Verbräuche der Fahrzeuge wurde der Tagesbedarf an elektrischer Energie für die SM Kirchzarten ermittelt.

Nr.	Bezeichnung	Anz. Pkw und km pro Tag		Anz. Streckenkontrollfahrzeuge und km pro Tag		Anz. Mannschaftswagen und km pro Tag	
		Anz.	km	Anz.	km	Anz.	km
1	SM Kirchzarten	2	80	2	100	3	80
2	SM Dornstetten	1	52	1	114	4	90
3	SM Deizisau	1	66	3	113	4	80
4	SM Ellwangen	1	40	1	120	5	50
5	SM Ehingen	1	55	3	90	3	65
6	SM Buchen	2	83	3	99	3	73
7	SM Mosbach	2	80	3	104	3	65
8	SM Leonberg	2	30	2	100	3	50
9	SM Herrenberg	2	40	2	120	2	30

Tab. 26: Vorhandene Fahrzeuge und durchschnittliche Kilometerleistung in den 9 Straßenmeistereien in Baden-Württemberg (Quelle: Verkehrsministerium BaWü)

Für die Pkw wurde der durchschnittliche Verbrauch eines aktuellen Elektrofahrzeugs von 15 kWh/100 km angesetzt. Für Fahrzeuge in der 3,5 t Klasse wurde ein typischer Verbrauch von 35 kWh/100 km plus einen Aufschlag von 50 % angesetzt, da diese Fahrzeuge viel stehend mit laufenden Nebenverbrauchern wie Heizung, Licht, etc. im Einsatz sind. Der Aufschlag wurde aufgrund von Gesprächen mit Projektbeteiligten des Projektes Aladin und einem Straßenmeister gewählt. Für die SM Kirchzarten ergibt sich so ein täglicher mittlerer Bedarf von ca. 255 kWh pro Werktag bei Umstellung der 7 Fahrzeuge auf Elektrofahrzeuge. Um aus diesen Energien sinnvolle Lastprofile synthetisch erzeugen zu können, wurden ausgehend von Gesprächen mit Verantwortlichen aus dem Betriebsablauf von Meistereien, zwei verschiedene Szenarien entwickelt. Diese sind im Folgenden dargestellt.

EV-Szenario A: Ohne Lastmanagement

In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge von 8 Uhr morgens bis 16 Uhr abends im Einsatz sind und während dieser Zeit keine Möglichkeit besteht, die Fahrzeuge an der Meisterei zu laden. Mit dem durchschnittlichen Betriebschluss um 16 Uhr werden die Fahrzeuge dann auf der Meisterei an die AC-Ladeplätze eingesteckt und die Fahrzeuge nachgeladen, damit am nächsten Tag die Fahrzeugbatterien vollgeladen zur

Verfügung stehen. Dieses Szenario ist bezgl. der Eigenverbrauchsquote als Worst-Cast zu verstehen, da hier ohne Speicher nur sehr geringe Deckungsgrade erreicht werden können. Bei den Leistungen ist hier angesetzt, dass für jedes Fahrzeug eine 11 kW Wallbox zur Verfügung steht. Die Gesamtleistung ist jedoch aufgrund des begrenzten Netzanschlusses immer kleiner als 50 kW. Im Folgenden ist ein Histogramm eines entsprechenden Lastprofils dargestellt.

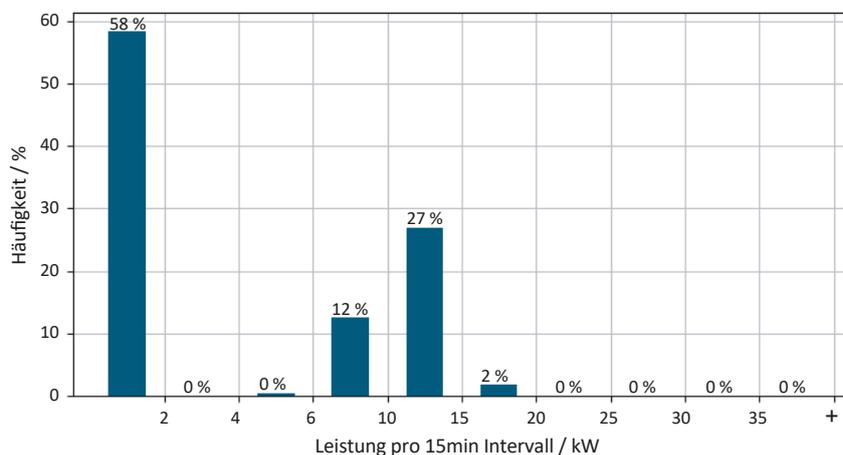


Bild 42: Häufigkeit von Leistungsbedarfen im EV Szenario A – ohne Lastmanagement

EV-Szenario B: Mit einfachem Lastmanagement

In diesem Szenario wird versucht, ein realisierbares Lastmanagement zu erstellen, um die PV-Ausbeute in diesem Use-Case zu verbessern. Durch Gespräche mit verschiedenen Verantwortlichen aus dem Betriebsbereich von Straßenmeistereien wurden Annahmen getroffen, mit denen die PV-Ausbeute gesteigert werden kann. Es handelt sich dabei um ein passives Lastmanagement, das ohne Einbindung von besonderer Intelligenz wie beispielsweise Wettervorhersagen auskommt. Folgende Annahmen wurden daher getroffen:

- Um Erzeugungenergie am Wochenende nutzbar zu machen, wurde davon ausgegangen, dass ca. die Hälfte der Energie, die in den Fahrzeugen jede Woche benötigt wird, samstags und sonntags zwischen 10 Uhr und 16 Uhr nachgeladen wird. Die Fahrzeugbatterien sind also am Freitag bei Dienstschluss halb voll, wodurch sich die Energie halbiert, die werktags zu schlechteren PV-Zeiten nachgeladen werden muss. Dadurch ergibt sich samstags und sonntags ein Energiebedarf von je ca. 319 kWh. Werktags müssen somit je ca. 128 kWh nachgeladen werden.
- Da nicht immer alle Fahrzeuge werktags unterwegs sind, wurde 10 % der nötigen Energie auf den Werktag tagsüber verteilt. Dies entspricht ca. 12,8 kWh.
- Zusätzlich wurden 20 % auf die Morgenstunden bis 9 Uhr verteilt, um Lade- und Richtzeiten vor der Dienstfahrt nutzen zu können.
- Die verbleibende Energiemenge wird wie in Szenario A nach Dienstschluss ab 16 Uhr geladen.

Hierdurch ergibt sich ein anderes Ladeprofil. Die Analyse in Form eines Histogramms ist im folgenden Bild gezeigt.

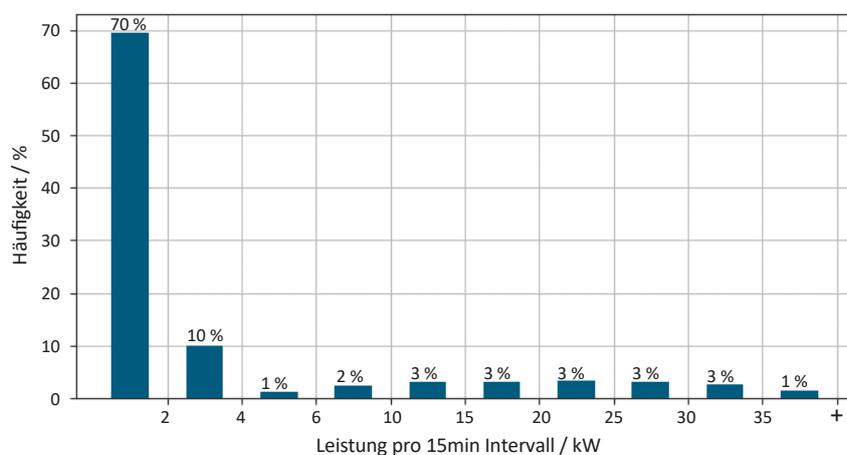


Bild 43: Häufigkeit von Leistungsbedarfen im EV Szenario B – mit einfachem Lastmanagement

4.3.2 Simulation des Eigenverbrauchs

Die prinzipielle Vorgehensweise entsprechend den vorgehenden Anwendungsfällen. In der folgenden Tabelle sind die grundlegenden Simulationsparameter für diesen spezifischen Fall noch einmal dargestellt. Es ist keine Abregelung der PV-Erzeugung implementiert.

Parameter	Wert
Generatortyp	Fixe Aufständerung
Wechselrichter Leistung	N * 25 kVA
Wechselrichtermodell	Generisch
P _{DC} /P _{AC} ratio	1.21
PV Module	Generisch
Max. PV Generatorspannung	1.000 V
Anzahl Module pro String	17
Anzahl Strings	N*4
Ausrichtung	Süd/Ost-West
Aufstellwinkel	Süd: 30° Ost-West: 10°
Tracker System	-
Wetterdaten	Messdaten in Minutenaufösung von 2016 (Quelle: Fraunhofer ISE)
Batterieleistung	- /10 kW
Batteriekapazität	10/20/30/40 kWh

Tab. 27: Grundsätzliche Simulationsparameter

Als Ergebnis sind in der folgenden Grafik die Verläufe einer Woche im Mai zu sehen, bei denen jeweils die PV-Leistung, die Last und die Leistung des Batterieumrichters gezeigt sind. Auch hier zeigt sich, dass der Verbrauch der Straßenmeisterei gut mit der Erzeugung der PV-Anlage im Tagesverlauf übereinstimmt. Lediglich an den Wochenendtagen ist der Bedarf deutlich geringer.

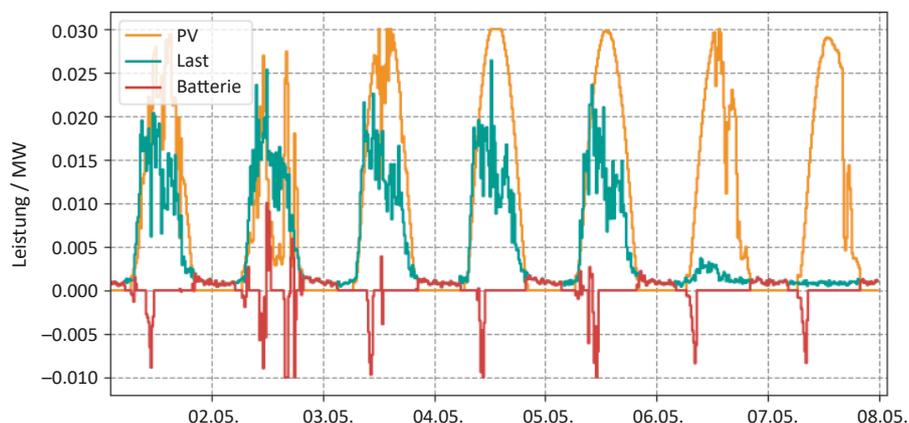


Bild 44: Zeitlicher Verlauf von PV, Last und Batterieleistung im Mai einer durchschnittlichen Straßenmeisterei ohne elektrifizierte Flotte

4.3.3 Ergebnisse zum Eigenverbrauch ohne elektrifizierte Flotte

Die erste Auswertung erfolgt zunächst ohne den Einsatz eines Speichers. In den folgenden Kurven werden die Ergebnisse gezeigt. In Abhängigkeit der installierten PV-Generatorleistung sind hier die bilanzielle Autarkie über ein Jahr, der Autarkiegrad und die Eigenverbrauchsquote dargestellt. Bei der bilanziellen Autarkie wird nur die PV-Energie im Verhältnis zur benötigten Energie betrachtet, ohne dass zeitliche Verläufe berücksichtigt werden. Die Kurve steigt linear mit der PV an, da pro installiertem kWp aufgrund der homogenen Anlage ein konstanter Wert erreicht wird. Die Eigenverbrauchsquote beschreibt die vor Ort direkt verbrauchte Energie im Verhältnis zu vor Ort durch die PV-Anlage erzeugte Energie. Diese sinkt mit der Generatorleistung und liegt im Bereich der bilanziellen Autarkie bei ca. 50 %, bei Ost-West-Ausrichtung um ca. 5 %-Punkte höher. Da die Autarkiequote in beiden Fällen jedoch gleich ist, bedeutet dies, dass bei Südausrichtung mehr Überschüsse ins Netz eingespeist werden.

Ausgehend von der bilanziellen Autarkie wurde dem Modell ein Speichersystem mit konstanter Leistung und verschiedenen Energiekapazitäten hinzugefügt, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Grafik gezeigt und beziehen sich auf eine Generatorleistung von 30 kWp. Wie erwartet lässt sich eine deutliche Steigerung erzielen. Mit den ersten 10 kWh Kapazität kann der Autarkiegrad um ca. 5 %-Punkte gesteigert werden. Mit steigender Kapazität flacht die Kurve jedoch ab, sodass die Steigerung ebenfalls abnimmt. Bei Südausrichtung flacht die Kurve aufgrund der hohen Peakleistung am Mittag bei größeren Kapazitäten weniger stark ab.

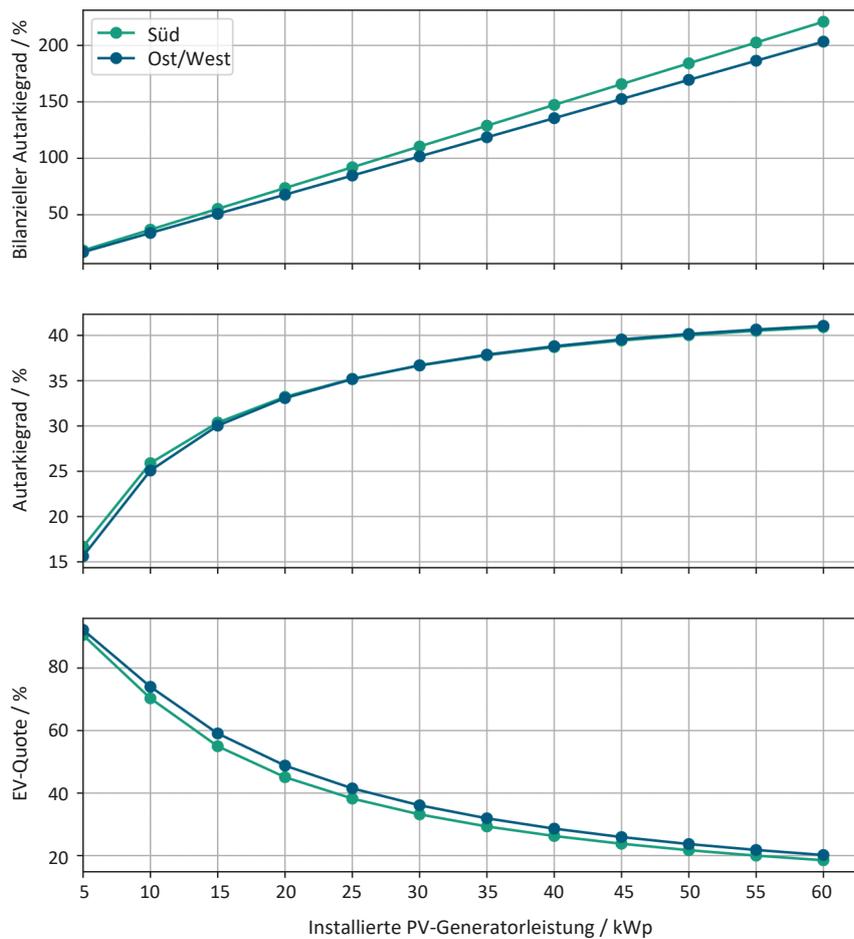


Bild 45: Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einer durchschnittlichen Straßenmeisterei

Aus den Simulationsergebnissen lassen sich die folgenden Ergebnisse schlussfolgern:

- Pro Straßenmeisterei können ca. 32 MWh Jahresbedarf angesetzt werden
- Um bilanzielle Autarkie oder eine Autarkiequote von ~ 50 % zu erreichen, kann folgende Faustregel abgeleitet werden (2025):

$$P_{PV-Generator} = E_{Jahresverbrauch} * 0,95 \frac{kW}{MWh} \quad (3)$$
- Pro 10 kWh Batteriespeicher lassen sich ca. 4-6 %-Punkte höherer Autarkiegrad erreichen
- Prinzipiell ist eine Südausrichtung zu favorisieren, falls der Überschuss durch Speicher oder Netzeinspeisung genutzt wird
- Durch einen Ausbau der Flotte mit E-Fahrzeugen werden die Bedarfe deutlich steigen
- Aufgrund der tagsüber nur wenig für das Aufladen nutzbaren Zeitslots, macht hier ein stationärer Speicher Sinn

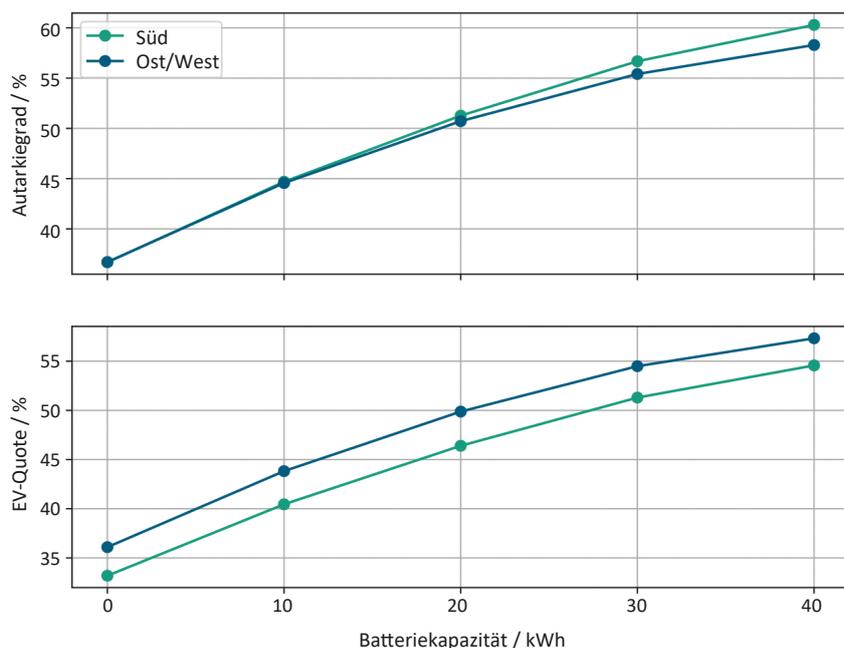


Bild 46: Simulationsergebnisse mit Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einer typischen Straßenmeisterei mit einem PV-Generator mit 30 kWp

4.3.4 Ergebnisse zum Eigenverbrauch mit elektrifizierter Flotte (Szenario A)

Im Vergleich zu den anderen Anwendungsfällen ist hier die Deckung von Erzeugung von Verbrauch und Erzeugung deutlich schlechter. Bei einer bilanziellen Autarkie von 100 % lässt sich lediglich eine EV-Quote von 12 erzielen. Der Einsatz eines stationären Speichers kann hier helfen diese Quote deutlich zu verbessern.

Ausgehend von der bilanziellen Autarkie wurde dem Modell ein Speichersystem mit konstanter Leistung und verschiedenen Energiekapazitäten hinzugefügt, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Grafik gezeigt und beziehen sich auf eine Generatorleistung von 90 kWp. Wie erwartet lässt sich eine deutliche Steigerung erzielen. Mit den ersten 10 kWh Kapazität kann der Autarkiegrad um ca. 5 %-Punkte gesteigert werden. Mit steigender Kapazität flacht die Kurve jedoch nicht ab, wie in den übrigen Fällen.

Aus den Simulationsergebnissen lassen sich die folgenden Ergebnisse schlussfolgern:

- Pro 10 kWh Batteriespeicher lassen sich ca. 4-6 %-Punkte höherer Autarkiegrad erreichen
- Prinzipiell ist eine Südausrichtung zu favorisieren, falls der Überschuss durch Speicher oder Netzeinspeisung genutzt wird
- Durch den Ausbau der Flotte mit E-Fahrzeugen werden die Bedarfe deutlich steigen
- Aufgrund des tagsüber nur wenig für das Aufladen nutzbaren Zeitslots, macht hier ein stationärer Speicher Sinn

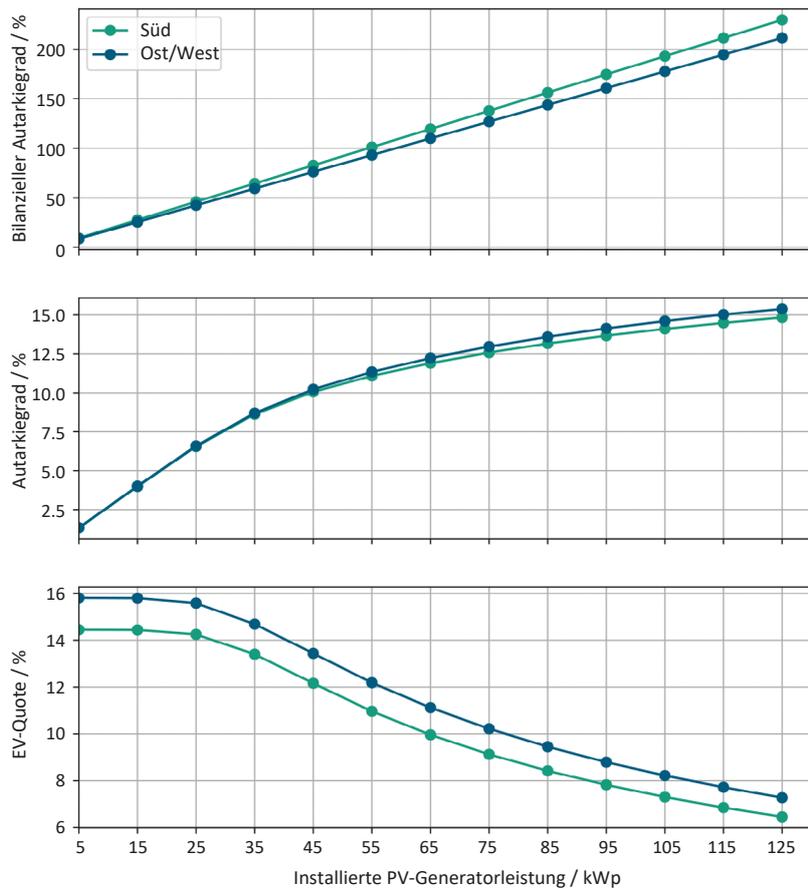


Bild 47: Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung des Bedarfes einer elektrifizierten Flotte einer durchschnittlichen Straßenmeisterei ohne Lademanagement (sonstiger Verbrauch nicht berücksichtigt)

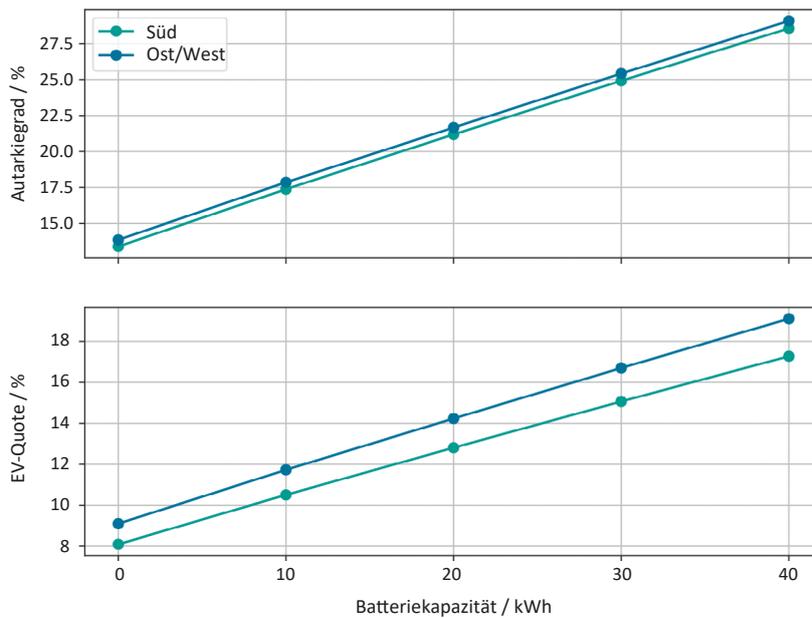


Bild 48: Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung des Bedarfes einer elektrifizierten Flotte einer durchschnittlichen Straßenmeisterei ohne Lademanagement mit einem PV-Generator mit 90 kWp (sonstiger Verbrauch nicht berücksichtigt)

4.3.5 Ergebnisse zum Eigenverbrauch mit elektrifizierter Flotte (Szenario B)

Im Vergleich zu Szenario A verbessert sich die Deckungsquote hier deutlich mehr durch den Einsatz eines stationären Speichers. Bei einer bilanziellen Autarkie von 100 % lässt sich so eine EV-Quote von 40 % erzielen.

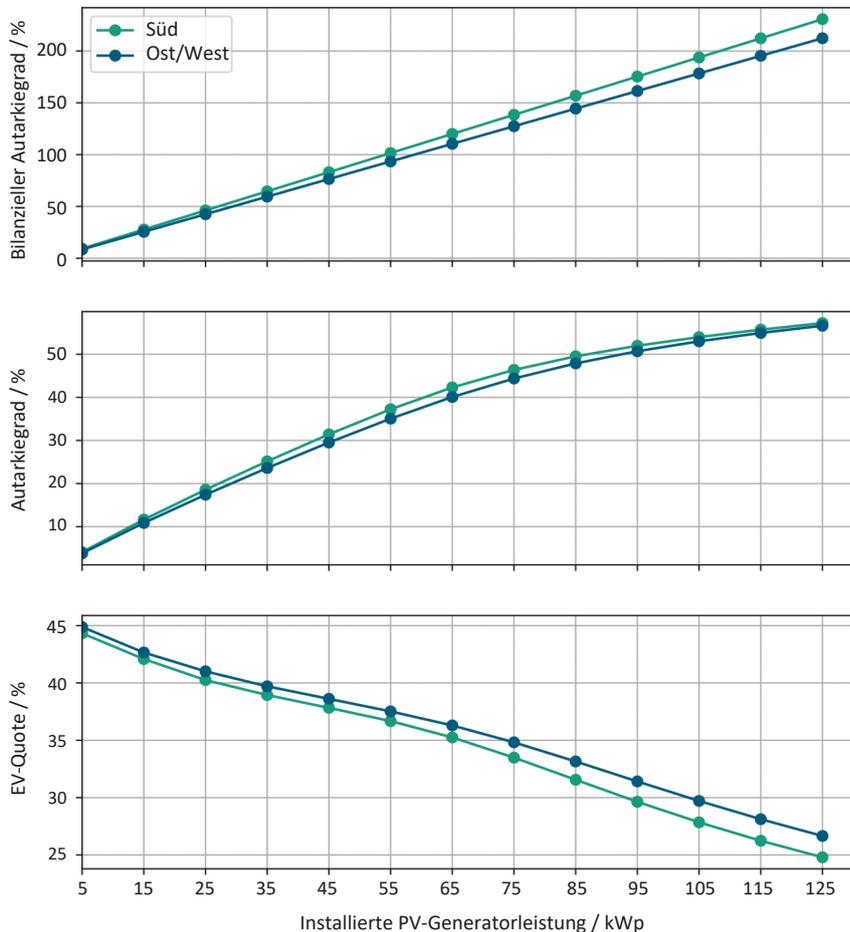


Bild 49: Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung des Bedarfes einer elektrifizierten Flotte einer durchschnittlichen Straßenmeisterei mit Lademanagement (sonstiger Verbrauch nicht berücksichtigt)

Ausgehend von der bilanziellen Autarkie wurde dem Modell ein Speichersystem mit konstanter Leistung und verschiedenen Energiekapazitäten hinzugefügt, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Grafik gezeigt und beziehen sich auf eine Generatorleistung von 90 kWp. Wie erwartet lässt sich eine deutliche Steigerung erzielen. Mit den ersten 10 kWh Kapazität kann der Autarkiegrad um ca. 5 %-Punkte gesteigert werden. Mit steigender Kapazität flacht die Kurve jedoch nicht ab, wie in den übrigen Fällen.

Aus den Simulationsergebnissen lassen sich die folgenden Ergebnisse schlussfolgern:

- Pro 10 kWh Batteriespeicher lassen sich ca. 4-6 %-Punkte höherer Autarkiegrad erreichen
- Prinzipiell ist eine Südausrichtung zu favorisieren, falls der Überschuss durch Speicher oder Netzeinspeisung genutzt wird

- Durch den Ausbau der Flotte mit E-Fahrzeugen werden die Bedarfe deutlich steigen
- Aufgrund des tagsüber nur wenig für das Aufladen nutzbaren Zeitslots, macht hier ein stationärer Speicher Sinn

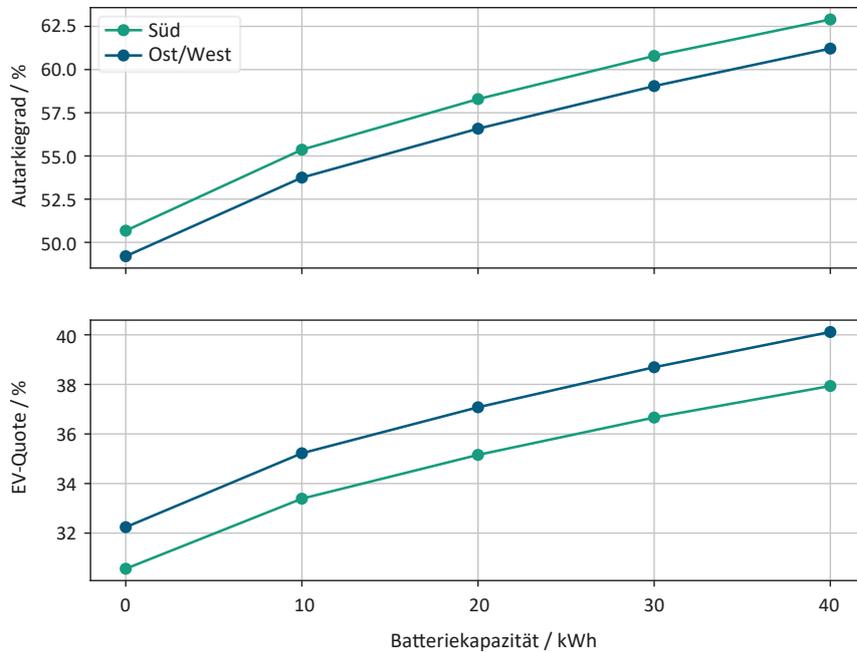


Bild 50: Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung des Bedarfes einer elektrifizierten Flotte einer durchschnittlichen Straßenmeisterei mit Lademanagement mit einem PV-Generator mit 90 kWp (sonstiger Verbrauch nicht berücksichtigt)

5 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der Potenzialberechnung dargestellt. Ein entsprechender Geodatensatz wurde an den Auftraggeber übergeben. Die gezeigten Grafiken stellen verschiedene Auswertungen dar, die mit den gewonnenen Ergebnissen erstellt wurden. Als Bezugswert wird die installierbare PV-Leistung in GWp/MWp (Leistungspotenzial) angegeben. Die Definition der entsprechenden Potenzialflächen ist abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall und wird daher im Rahmen der nachfolgenden nach Anwendungsfällen gegliederten statistischen Auswertungen beschrieben. Übergreifend wurden mehr als 250.000 Flächen hinsichtlich ihrer Eignung für die solare Energiegewinnung identifiziert. Die im Ergebnisteil gezeigten Ergebnisse stellen dabei keine Bewertung einzelner Flächen dar, sondern eine Abschätzung auf nationaler Ebene. Insbesondere ist hier noch einmal zu erwähnen, dass die Eigentumsverhältnisse der Flächen und damit einhergehende Zuständigkeiten nicht berücksichtigt worden sind.

Grundsätzlich sind auf das dargestellte berechnete Leistungspotenzial (jeweils in grau dargestellt) noch die in Tabelle 13 dargestellten Abschläge anzuwenden (erschließbares Leistungspotenzial in grün). Da es sich bei diesen Werten um geschätzte Werte handelt, wurde in den Grafiken jeweils auch der komplette Bereich inkl. der dazugehörigen Unsicherheit angegeben.

In den folgenden Grafiken ist das berechnete und das abgeschätzte erschließbare Leistungspotenzial dargestellt, wobei zunächst eine Gesamtdarstellung auf nationaler Ebene ohne Untergliederung in Bundesländer oder Anwendungsfälle erfolgt. Aufgrund der unterschiedlichen Zuständigkeitsbereiche wurde hingegen hinsichtlich der zugeordneten Straßenart unterschieden. Zu beachten ist jedoch, dass diese Zuordnung nicht für alle Flächen eindeutig vollzogen werden konnte, da insbesondere im Falle von Straßenbegleitflächen, z. T. an Kreuzungen bzw. Auffahrten gelegene Objekte – mit sowohl Autobahn als auch Bundesstraße – betrachtet wurden.

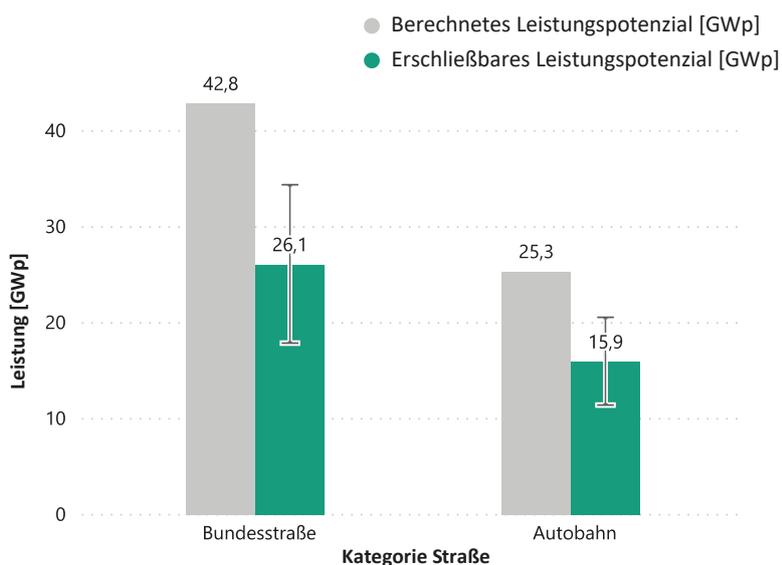


Bild 51: Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und mit Berücksichtigung des Abschlags zur Abschätzung des erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich für Deutschland

5.1 Gebäude

Im Vorfeld der Potenzialanalyse wurde ein Gebäudedatensatz zusammengestellt, bestehend aus ca. 9.600 Gebäudeumringen, und für die sich anschließenden Berechnungsschritte aufbereitet. Insbesondere ist hier noch ebenfalls noch einmal zu erwähnen, dass die Eigentumsverhältnisse der Gebäude und damit einhergehende Zuständigkeiten nicht berücksichtigt worden sind.

Abhängig von der Gebäudebeschaffenheit sowie den verfügbaren, sich teils in Qualität und Auflösung unterscheidenden digitalen Oberflächenmodellen wurden anschließend Dachteilflächen und sonstige Dachstrukturen identifiziert. Die sich im Zuge der durchgeführten Solarpotenzialanalyse (SPA) ergebenden Outputflächen sind demzufolge als dachteilflächenscharf zu bezeichnen, umfassen zusätzlich aber auch z. T. Flächenfragmente, die beispielsweise von Gauben, Schornsteinen o. ä. herrühren können und somit letztlich für eine Modulbelegung nicht in Frage kommen. Ebenso sind jene Teilflächen im Outputdatensatz der Gebäude zu finden, welche aufgrund übermäßiger Verschattung entsprechend ebenso als ungeeignet gekennzeichnet wurden. In Summe umfasst dieser Datensatz ca. 60.000 Teilflächen-Features. Die entsprechende Einteilung einer jeden SPA-Outputfläche in ungeeignet und geeignet ist in den Ergebnisdatensätzen (aller Anwendungsfälle) als eigenes Attribut aufgeführt. Außerdem lässt sich jede einzelne Teilfläche über eine Gebäude-ID ("geb_ID") ihrer jeweiligen Input-Gebäudefläche eindeutig zuordnen. Die Dachteilflächen eines Gebäudes besitzen dementsprechend dieselbe "geb_ID".

Nachfolgend werden für die statistischen Auswertungen jene Outputflächen betrachtet und graphisch dargestellt, welche als geeignete Potenzialflächen klassifiziert wurden. Hierbei handelt es sich also weiterhin um eine gegenüber den Eingangsdaten differenzierte, d. h. dachteilflächenscharfe Betrachtung von insgesamt ca. 21.000 geeigneten Outputflächen.

Der folgende Boxplot zeigt die statistische Verteilung der geeigneten Flächen. Innerhalb der Box liegt jeweils das untere und obere Quartil der Flächen bezogen auf den Median. Die Grenzen der Antennen geben die Grenzen der milderer Ausreißer an. Als Definition wurde hier das 1,5-fache des Interquartilabstandes gewählt. Angegeben ist somit der letzte Wert, der noch innerhalb dieses Bereiches liegt.

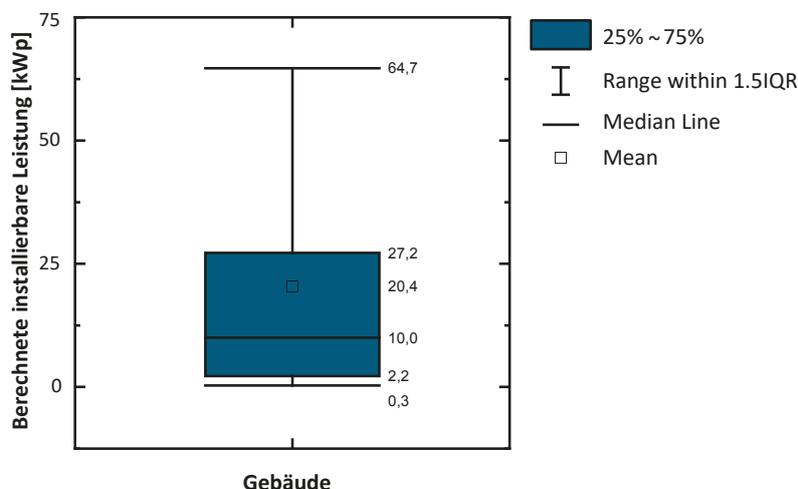


Bild 52: Statistische Verteilung der untersuchten Gebäude nach Größe des berechneten Leistungspotenzials

Insgesamt wurden somit bei den untersuchten Gebäuden Dachflächen mit einem berechneten Leistungspotenzial von 150 MWp ermittelt. Aufgrund der guten Datenlage der Flächen und der damit einhergehenden hohen Genauigkeit der Simulation, kann bei den untersuchten Dachflächen von einem erschließbaren Leistungspotenzial zwischen 128 und 143 MWp ausgegangen werden. Der geringe Abschlag lässt sich wie in Kapitel 2.8 dargestellt vor allem durch die kaum vorhandenen Flächennutzungskonflikte begründen. Da bei den untersuchten Gebäuden im Allgemeinen ein Netzanschluss vorhanden ist, kann seitens der Netzanbindung mit eher geringen Kosten gerechnet werden. Außerdem besteht bei vielen der Gebäude ein lokaler Bedarf an elektrischer Energie. Dieser führt im Allgemeinen zu einer guten Wirtschaftlichkeit der Anlagen, da die Einspeisevergütung geringer ist als der Strombezugspreis. Insgesamt sind die diesem Anwendungsfall zugeordneten Potenziale daher als wirtschaftlich attraktiv zu erachten, auch wenn die absoluten Zahlen geringer sind als die der anderen Anwendungsfälle (vgl. Bild 63).

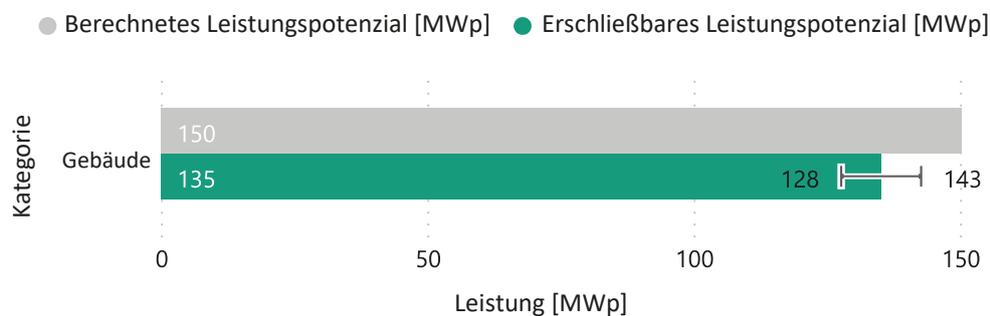


Bild 53: Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und geschätztes erschließbares Leistungspotenzial (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag auf den Dachflächen der untersuchten Gebäude

5.2 Lärmschutzwände

Für die Solarpotenzialanalyse (SPA) der entlang der Bundesfernstraßen befindlichen Lärmschutzinfrastruktur wurde das im Rahmen dieses Forschungsprojektes neu zusammengestellte Lärmschutzkataster herangezogen. Aufgrund der mitunter starken Abweichungen bei der sowohl quantitativen als auch qualitativen Datengrundlage für dessen Erstellung liegen in einigen Fällen Lärmschutzwände nicht einheitlich, d. h. als zusammenhängende Geometrien, sondern in Teilbauwerke aufgesplittet vor. Demgegenüber steht jedoch der überwiegende Fall einer in sich abgeschlossenen Lärmschutzwandgeometrie. Beide vorkommenden Fälle bei den Lärmschutzeinrichtungen wurden im Zuge der SPA als individuell zu betrachtende Objekte mit eigener eindeutigen "LSE_ID" behandelt. So umfasste der Inputdatensatz, welcher anstelle der Linien-Geometrien die festgelegten Modulaufsatzflächen als langgezogene Polygone abbildet, beinahe 23.000 einzelne Wandmodulflächen.

Anders als bei den Gebäuden wurden für die Lärmschutzwände zu stark verschattete Bereiche der Modulaufsatzflächen direkt entnommen und sind daher nicht im Outputdatensatz zu finden. Die zu Stande kommenden Outputflächen – in Summe ca. 39.000 – sind darauf zurückzuführen, dass herausfallende Modulaufsatzabschnitte eine Lücke in der untersuchten Input-Modulaufsatzfläche reißen, wodurch im Falle einer Lärmschutzwand mitunter mehrere Teilflächen entstehen können. Hiervon sind jedoch einige aufgrund der für eine Modulbelegung zu geringen Flächengröße ebenso als ungeeignet gekennzeichnet worden. Überdies sind alle Teilflächen-Features mit einer "geb_ID" versehen, welche eine entsprechende eindeutige Zuordnung zu der jeweiligen Input-Modulaufsatzfläche ermöglicht.

Der nachfolgend behandelte und ausgewertete Datensatz bezieht sich auf alle (insgesamt ca. 26.500) geeigneten Potenzialflächen der Lärmschutzwände.

Der folgende Boxplot zeigt die statistische Verteilung der geeigneten Flächen. Innerhalb der Box liegt jeweils das untere und obere Quartil der Flächen bezogen auf den Median. Die Grenzen der Antennen geben die Grenzen der milderer Ausreißer an. Als Definition wurde hier das 1,5-fache des Interquartilabstandes gewählt. Angegeben ist somit der letzte Wert, der noch innerhalb dieses Bereiches liegt.

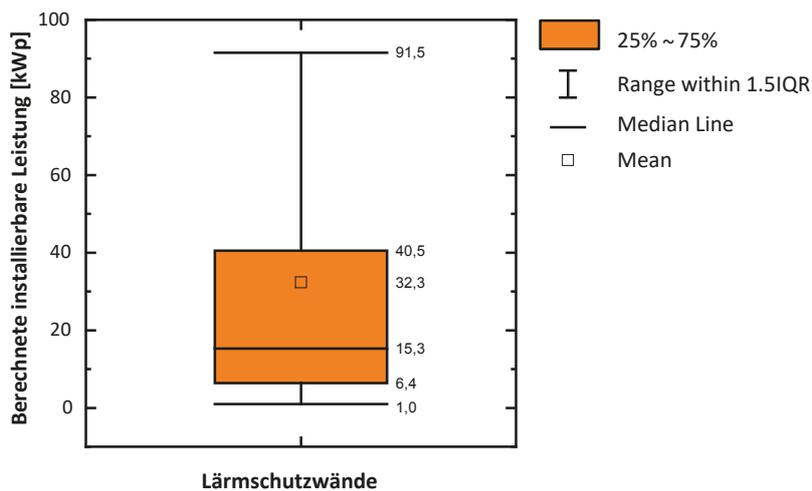


Bild 54: Statistische Verteilung der Lärmschutzwände nach Größe des berechneten Leistungspotenzials

Das gesamte berechnete Leistungspotenzial bei Lärmschutzwänden summiert sich auf 664 MWp für ganz Deutschland. Durch die Berücksichtigung der ermittelten Abschläge ergibt sich ein geschätztes erschließbares Leistungspotenzial von 465 bis 597 MWp und ist damit ca. viermal so groß wie bei den untersuchten Gebäuden. Wie bei den Gebäuden auch, ist bei den Lärmschutzwänden von wenigen Nutzungskonflikten bei einer Umsetzung der in der Studie angenommenen Installationsart mit PV-Aufsätzen auszugehen (vgl. Kapitel 2.3.1). Einschränkungen entstehen vor allem durch eine durchschnittlich größere Entfernung zum nächsten Netzanschlusspunkt. Da Lärmschutz im Allgemeinen aber immer in der Nähe von Siedlungen umgesetzt wird, ist die Entfernung in den allermeisten Fällen im Bereich von weniger als 2 km anzusehen. Eine genaue Einschätzung der Netzanschlusskosten kann nur im Einzelfall zusammen mit dem zuständigen Netzbetreiber gemacht werden. Oftmals findet sich in der direkten Umgebung der Bauwerke auch Bewuchs und Gehölz, die zu Nahverschattungseffekten führt. Dieser Aspekt wurde in der Simulation berücksichtigt. Flächen mit zu hoher Verschattung wurden aufgrund des geringen spezifischen Ertrages kategorisch ausgeschlossen.

Aufgrund möglicher baulicher und lärmschutztechnischer Einschränkungen wurde bei der in der Simulation zugrunde gelegten Belegungsart ein als konservativ anzusehender Ansatz mit einem Quadratmeter PV-Fläche pro m Lärmschutzwand gewählt. Mit anderen Belegungsarten könnte sich dieser Wert auch verdoppeln bis verdreifachen. Dafür würden aber bedingt durch potenzielle Blendungen zusätzliche Einschränkungen entstehen. Durch umgebende Bauwerke und Vegetation stark verschattete Lärmschutzwände wurden methodisch in der Simulation aussortiert. Bautechnische Einschränkungen hinsichtlich der Tragfähigkeit bedürfen einer Einzelfalluntersuchung. Hierdurch sind Einschränkungen zu erwarten. Dies wurde durch einen entsprechend hohen Abschlag (Tabelle 13) pauschal berücksichtigt.

Insgesamt handelt es sich bei Lärmschutzwänden auch um attraktive Potenziale. Durch die Mehrkosten bei der nachträglichen Installation im Vergleich zu Dach- oder Freiflächenanlagen spielen bei der Erschließung dieser Potenziale vor allem wirtschaftliche Aspekte eine Rolle. Neue und geplante Lärmschutzwände sind im berechneten Leistungspotenzial nicht enthalten.

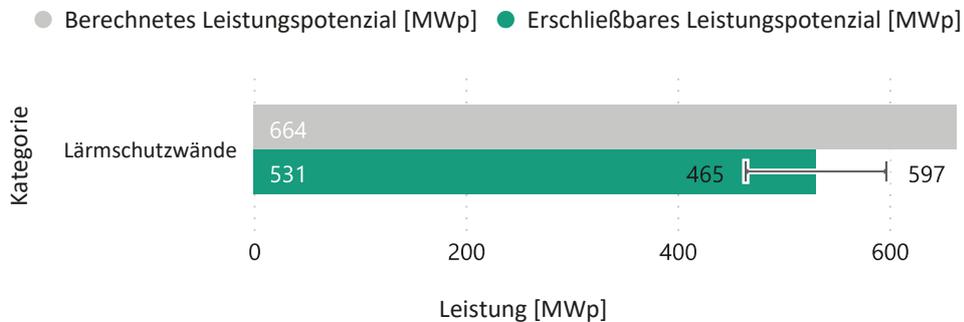


Bild 55: Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag auf den untersuchten Lärmschutzwänden

5.3 Parkflächen

Im Rahmen der Solarpotenzialanalyse (SPA) für die Parkflächen wurden insgesamt ca. 12.300 Parkflächen als installierbare Überdachungsflächen untersucht. Der daraus generierte Outputdatensatz umfasst – ähnlich wie bei den übrigen Anwendungsfällen – durch das Herausfallen zu stark verschatteter Bereiche neu entstandene und z. T. als ungeeignet gekennzeichnete Teilflächen. Jede Teilfläche lässt sich über die “geb_ID” der Eingangsfläche zuordnen. In Summe beinhaltet dieser Outputdatensatz ca. 14.500 Features. Als geeignete Potenzialflächen der betrachteten Parkplatzüberdachungen wurden etwa 10.400 Objekte identifiziert. Bezogen auf diese geeigneten Potenzialflächen schließt sich im Folgenden die weitergehende Auswertung an.

Der folgende Boxplot zeigt die statistische Verteilung der geeigneten Flächen. Innerhalb der Box liegt jeweils das untere und obere Quartil der Flächen bezogen auf den Median. Die Grenzen der Antennen geben die Grenzen der milderer Ausreißer an. Als Definition wurde hier das 1,5-fache des Interquartilabstandes gewählt. Angegeben ist somit der letzte Wert, der noch innerhalb dieses Bereiches liegt.

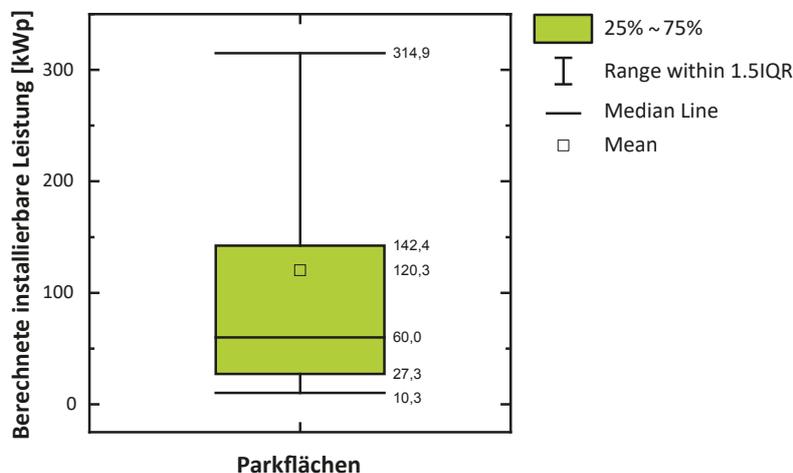


Bild 56: Statistische Verteilung der Parkflächen nach Größe des berechneten Leistungspotenzials

Das drittgrößte Potenzial in den untersuchten Anwendungsfällen stellen potenzielle Überdachungen von Parkflächen dar. In der Simulation wurde dieses berechnete Leistungspotenzial mit 1,2 GWp ermittelt. Durch die Anwendung der Abschläge ergibt sich ein geschätztes erschließbares Leistungspotenzial von 1.034 bis 1.155 MWp.

Da die hier betrachteten Flächen bereits versiegelt sind, ist von nur sehr wenigen ökologischen oder landschaftsplanerischen Konflikten auszugehen. Die notwendige Unterkonstruktion, um die Module in ausreichender Höhe zu installieren, erhöht jedoch die Installationskosten im Vergleich zu Dach- und Freiflächenanlagen deutlich, sodass Einschränkungen von wirtschaftlicher Seite zu erwarten sind.

Positiv ist zudem, dass bei Parkflächen mit hohen wirtschaftlichen Synergieeffekten mit schon vorhandener- und in den nächsten Jahren entstehender Ladeinfrastruktur zu rechnen ist. Gerade bei direktem lokalem Verbrauch in Schnellladestationen ist mit sehr hohen erzielbaren Preisen pro kWh im Vergleich zu Börsenstrompreisen zu rechnen. Außerdem besteht insbesondere an Rastanlagen eine räumliche Nähe zu Gebäuden mit zusätzlichem Eigenverbrauch.

Die vorhandenen Netzanschlüsse werden im Allgemeinen zum aktuellen Stand für die an diesen Standorten vorhandenen Potenziale nicht ausreichen. Da aber auch durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur für Pkw und künftig auch Lkw erheblicher zusätzlicher Bedarf an Netzanschlusskapazität besteht, ist auch a. d. S. eine große Synergiewirkung zu erwarten.

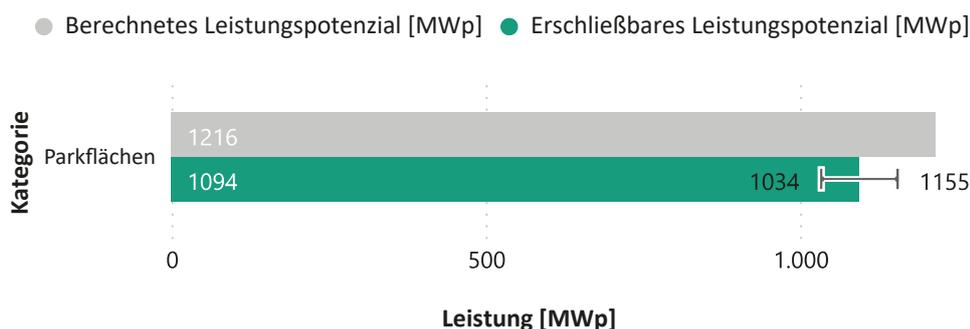


Bild 57: Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der Parkflächen

5.4 Lärmschutzwälle

Ähnlich wie für die Lärmschutzwände wurde auch bei der Analyse der Lärmschutzwälle das aktualisierte Lärmschutzkataster als Grundlage herangezogen. Die darin enthaltenen Linien-Geometrien, welche im Optimalfall den exakten Verlauf des Wallkamms darstellen, wurden entsprechend genutzt, um straßenab- und straßenzugewandte Wallteilflächen zu erstellen (das zugehörige Vorgehen ist in Kapitel 2.2 beschrieben). Die beiden modellierten Wallteilflächen einer Wall-(Linien)-Geometrie sind zwecks Zuordenbarkeit mit einer entsprechenden "LSE_ID" versehen.

Der für die SPA verwendete Inputdatensatz enthält aber folglich die doppelte Anzahl an im LSE-Kataster vorhandenen Wall-Geometrien, abzüglich jener Wallteilflächen, welche aufgrund einer für die Modulbelegung zu geringen Breite bereits vorab ausgeschlossen wurden. Die Objektanzahl des Input-Datensatzes beträgt etwa 29.500. Im Zuge der durchgeführten SPA, inklusive einer rasterbasierten Einstrahlungs- und Verschattungsanalyse, wurden insbesondere entlang der Grenzen zweier modellierter Wallteilflächen Polygonfragmente generiert, welche aufgrund ihrer geringen Größe jedoch im Outputdatensatz als

ungeeignet ausgewiesen sind. Insbesondere hierdurch beträgt die Objektanzahl des Outputdatensatzes mit etwa 485.000 ein Vielfaches des Inputdatensatzes. Auch durch Nahverschattungseffekte wurden neue Teilflächen innerhalb einer Wallteilfläche kreiert, da zu stark verschattete Pixelzellen im Zuge der SPA herausgefiltert wurden. Sämtliche Teilflächen bzw. Features des Outputdatensatzes sind in geeignet oder aber ungeeignet unterteilt und besitzen jeweils eine entsprechende "geb_ID", welche ihre Zugehörigkeit zu einer Input-Wallteilfläche eindeutig angibt.

Nachfolgend werden als Ergebnisdaten all jene Potenzialflächen betrachtet, die als geeignet gekennzeichnet wurden, demnach also für eine Modulbelegung in Frage kommen. Hierbei handelt es sich um insgesamt etwa 24.000 Objekte.

Der folgende Boxplot zeigt die statistische Verteilung der geeigneten Flächen. Innerhalb der Box liegt jeweils das untere und obere Quartil der Flächen bezogen auf den Median. Die Grenzen der Antennen geben die Grenzen der mildereren Ausreißer an. Als Definition wurde hier das 1,5-fache des Interquartilabstandes gewählt. Angegeben ist somit der letzte Wert, der noch innerhalb dieses Bereiches liegt.

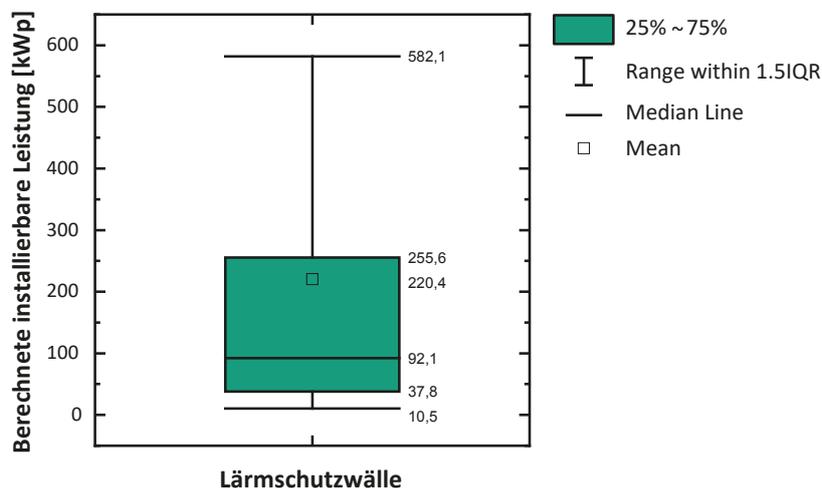


Bild 58: Statistische Verteilung der Lärmschutzwälle nach Größe des berechneten Leistungspotenzials

Die Lärmschutzwälle stellen mit einem berechneten Leistungspotenzial von 5,3 GWp das zweitgrößte Potenzial innerhalb der untersuchten Anwendungsfälle dar. Durch die Anwendung der geschätzten Abschläge ergibt sich das erschließbare Leistungspotenzial zu 3,2 – 4,3 GWp. Im Vergleich zu den drei zuvor gezeigten Anwendungsfällen handelt es sich hier um nicht versiegelte Flächen mit Bewuchs. Diese haben in vielen Fällen auch einen ökologischen Wert und sind ggf. auch Teil von landschaftsplanerischen Maßnahmen. Für eine Erschließung dieser bestehenden Potenziale der Wälle müssen diese Aspekte daher im Einzelfall genau betrachtet und gegeneinander aufgewogen werden. Durch einen im Vergleich zu den anderen Anwendungsfällen höheren Abschlag wurde dies versucht zu berücksichtigen.

Prinzipiell haben Wälle jedoch gerade bei Ausrichtung nach Süden, Osten oder Westen eine gute Eignung für die Belegung mit einem photovoltaischen Generator. Der Aufstellwinkel ist dabei bereits durch den Wall vorgegeben. Hierdurch lassen sich die Anlagen mit günstigen Unterkonstruktionen errichten. Ergänzend kommt die sehr gute Flächenausnutzung, da aufgrund der topologischen Gegebenheiten des Walles kein Reihenabstand notwendig ist. Zusätzlich besteht die im Allgemeinen geringe Entfernung zu Agglomerationen

und damit zum nächsten Netzanschlusspunkt. Bei Neuplanungen von Lärmschutzwällen sollte die Photovoltaik also unbedingt mitbetrachtet werden.

Um etwaige Einschränkungen im Betriebsablauf der Meistereien und potenzielle Beschädigungen der Module durch Steinflug zu vermeiden, wurde bei der straßenzugewandten Seite der Wälle ein Abstand zur Fahrbahn implementiert. In der Simulation wurde dieser aufgrund der sehr ungenauen Datenlage bzgl. der Verortung der Wälle pauschal implementiert. Bei der Sichtung von Einzelfällen zu Satellitenbildern hat sich jedoch gezeigt, dass dieser Ansatz an manchen Stellen auch als eher konservativ anzusehen ist.

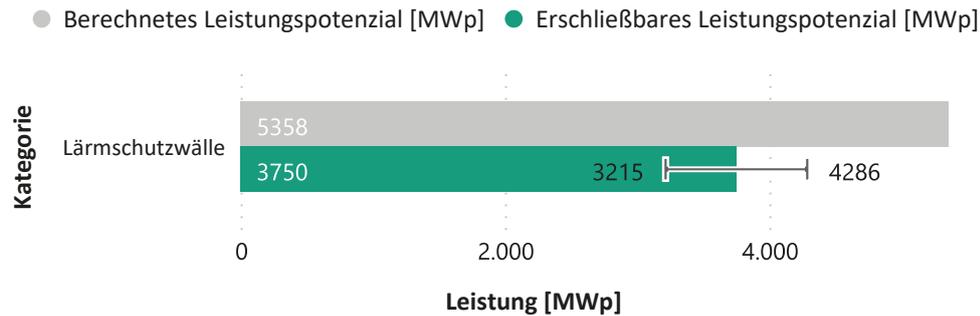


Bild 59: Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der untersuchten Lärmschutzwälle

5.5 Straßenbegleitflächen

Für die SPA für Straßenbegleitflächen, welche auch einige Rastanlagenflächen inkludiert, wurde ein ca. 208.000 Features umfassender Inputdatensatz verwendet. Wie bei anderen Anwendungsfällen umfasst der resultierende Outputdatensatz durch die Entnahme zu stark verschatteter Bereiche eine differenziertere Flächenausweisung, wobei auch hier einzelne kleine Teilflächen teils als ungeeignet gekennzeichnet wurden. Auch hier gilt, dass sich jede der Teilflächen im Outputdatensatz eindeutig über die "geb_ID" der zugrunde liegenden Eingangsfläche zuordnen lässt. In Summe beinhaltet dieser Outputdatensatz knapp 333.000 Features. Als geeignete Potenzialflächen der betrachteten Straßenbegleitflächen wurden ca. 202.000 Objekte identifiziert. Bezogen auf diese geeigneten Potenzialflächen schließt sich im Folgenden die weitergehende Auswertung an. Informationen zur im Zuge der Datenaufbereitung erstellten Flächenkulisse, welche für die SPA genutzt wurde, sind dem vorangegangenen Kapitel 2.1.4 zu entnehmen.

Der folgende Boxplot zeigt die statistische Verteilung der geeigneten Flächen. Innerhalb der Box liegt jeweils das untere und obere Quartil der Flächen bezogen auf den Median. Die Grenzen der Antennen geben die Grenzen der milderer Ausreißer an. Als Definition wurde hier das 1,5-fache des Interquartilabstandes gewählt. Angegeben ist somit der letzte Wert, der noch innerhalb dieses Bereiches liegt.

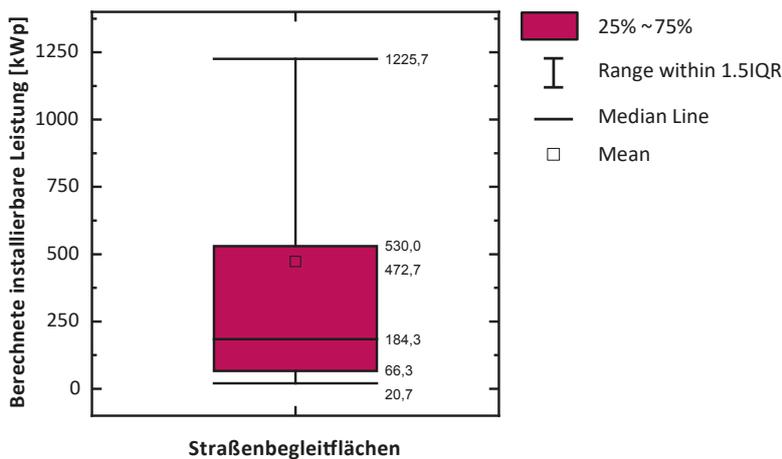


Bild 60: Statistische Verteilung der Straßenbegleitflächen nach Größe des berechneten Leistungspotenzials

Das berechnete Leistungspotenzial der Straßenbegleitflächen stellt mit 60,8 GWp mit großem Abstand das größte der untersuchten Anwendungsfälle dar. Gleichzeitig ist aber mit aufgrund der ökologischen Wertigkeit der Flächen und den in vielen Fällen großen Entfernungen zum nächsten Netzanschlusspunkt mit der größten Unsicherheit und den größten Abschlägen beaufschlagt. Insgesamt ergibt sich mit der dargestellten Methodik bei den Straßenbegleitflächen ein erschließbares Potenzial zwischen 24,3 und 48,6 GWp. Eine Erschließung ist daher vor allem in größeren Clustern und in der Nähe von Umspannwerken oder einem hohen Eigenverbrauch sinnvoll (z. B. Tunnel oder Schnelladestationen).

Eine abschließende Bewertung und Abwägung der o. g. Konflikte kann nur im Einzelfall getroffen werden. Bei Berücksichtigung von photovoltaischen Erzeugungsanlagen bei der Anlage bzw. Planung solcher Flächen lassen sich diese Konflikte jedoch deutlich reduzieren. Agrivoltaikanlagen erlauben die Integration von ökologischer bzw. landwirtschaftlicher Funktion einer Fläche und die Nutzung einer Fläche für die Stromerzeugung. Die Ergebnisse in den aktuellen Pilotanlagen sind sehr vielversprechend (TROMMSDORFF, 2022). Erste Ergebnisse haben gezeigt, dass sich gerade in Zeiten der globalen Erwärmung und des Klimawandels eine Agrivoltaikanlage positiv auf den Wasserhaushalt auswirken kann (HASSANPOUR, 2018). Dies ist vor allem in Gegenden mit hoher Sonneneinstrahlung und damit einhergehender Verdunstung der Fall. Durch die zusätzliche Verschattung durch die Module kann die Austrocknung des Bodens in heißen trockenen Monaten reduziert werden. Die Forschung steht hier aufgrund der zeitlich begrenzten Betrachtungszeiträume aber noch am Anfang.

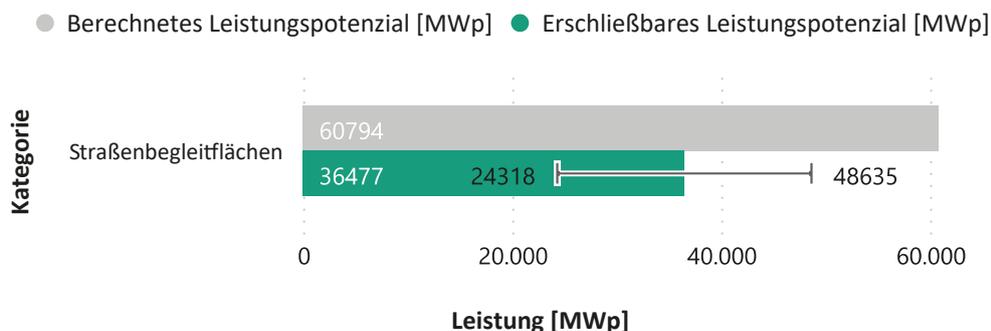


Bild 61: Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der untersuchten Straßenbegleitflächen

5.6 Verteilung auf Anwendungsfälle

Grundsätzlich sind auf das berechnete Leistungspotenzial noch die in Tabelle 13 dargestellten Abschläge anzuwenden. Da es sich bei diesen Werten um geschätzte Werte handelt, wurde in den Grafiken jeweils auch der komplette Bereich inkl. der dazugehörigen Ungenauigkeit angegeben.

In den folgenden Grafiken ist das gesamte Leistungspotenzial mit und ohne Anwendung der pauschalen Abschläge dargestellt. Zunächst erfolgt eine Gesamtdarstellung auf nationaler Ebene ohne Untergliederung in Bundesländer oder Anwendungsfälle. Das Gesamtpotenzial reduziert sich durch die Anwendung der pauschalen Abschläge von 68,2 GWp auf 29,2 – 54,8 GWp. Eine Aufteilung auf die Anwendungsfälle zeigt, dass die größten Potenziale trotz der größten Abschlagsfaktoren im Bereich der Straßenbegleitflächen liegen. An zweiter Stelle die Wälle mit 3,2 GWp.

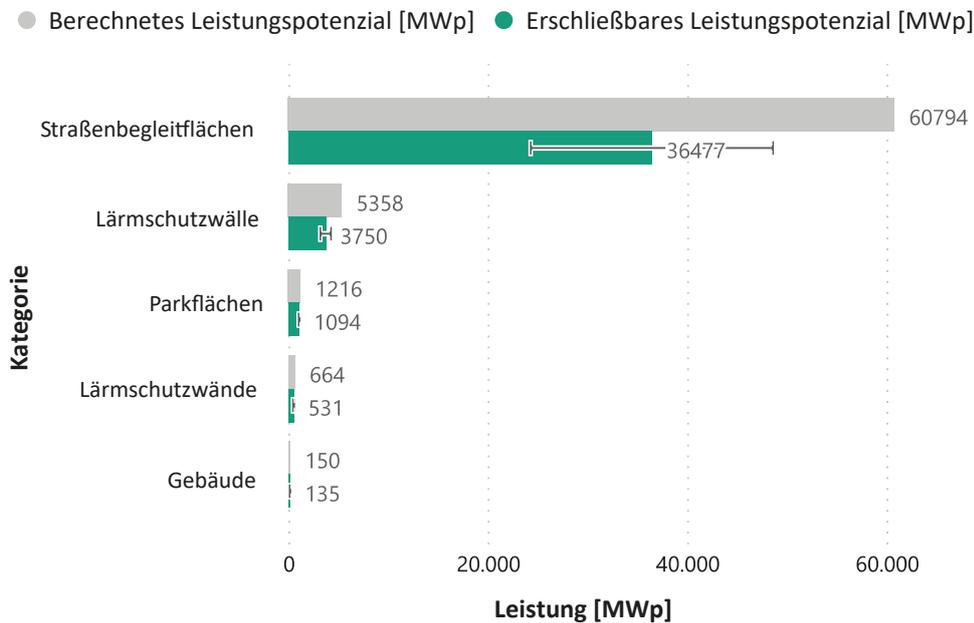


Bild 62: Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der untersuchten Flächenarten

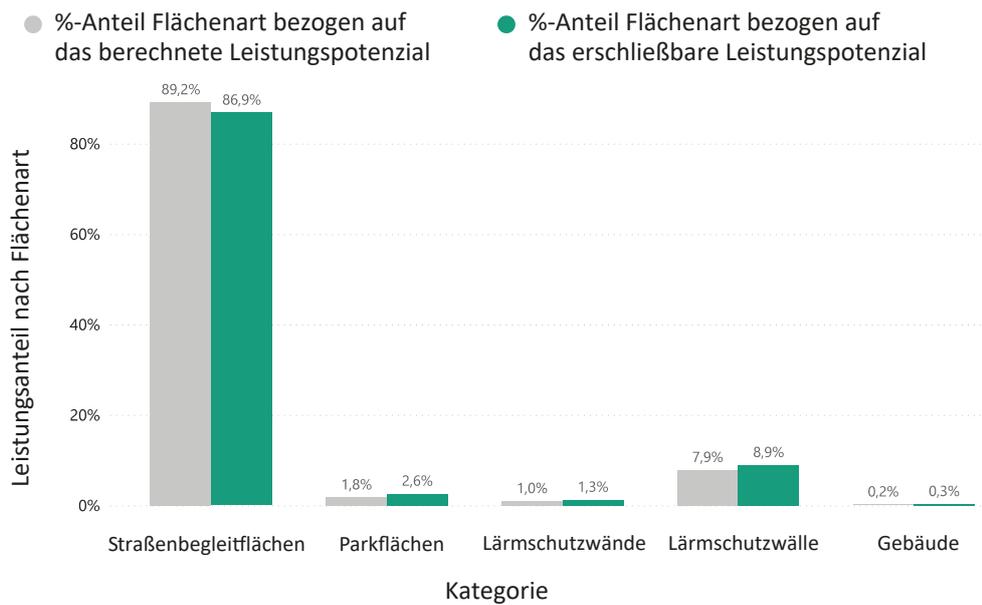


Bild 63: Relativer Anteil der berechneten Leistungspotenziale (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün)

In absoluten Zahlen ist das berechnete Leistungspotenzial der Straßenbegleitflächen mit Abstand am größten. Das bleibt auch unter Berücksichtigung der Abschläge und Unsicherheiten der Fall (geschätztes erschließbares Potenzial). Bei Berücksichtigung der Abschläge steigt der relative Anteil der anderen Anwendungsfälle, ändert die Leistungsanteile aber nur geringfügig. So erhöht sich etwa der Leistungsanteil der Gebäude von 0,2 % in Bezug auf die berechnete installierbare Leistung auf 0,4 % und in Bezug auf die maximalen Abschläge. Der Leistungsanteil der Straßenbegleitflächen sinkt von 89,2 % auf 83,4 %, wenn die maximalen Leistungsabschläge betrachtet werden. Festzuhalten an dieser Stelle ist, dass im betrachteten Untersuchungsraum auch mit Betrachtung der Abschläge, das Leistungspotenzial der Straßenbegleitflächen mit Abstand den größten Anteil hat. Die unterschiedlichen Größenordnungen sollen jedoch nicht davon ablenken, dass die Flächenarten unterschiedlich schwierig erschließbar sein können. Beispielsweise mag ein Netzanschlusspunkt oder Direktverbraucher bei den Gebäuden deutlich einfacher verfügbar sein als bei Straßenebenenflächen.

Um die Erschließung zu vereinfachen, könnten verschiedene Flächen in Clustern zusammengefasst werden. Auch Querfinanzierungen für kleine Projekte mit unrentablem Netzanschluss sind dadurch denkbar.

5.7 Aufteilung auf Bundesländer

In den folgenden Grafiken sind Potenziale nach Bundesland getrennt dargestellt. Zunächst erfolgt die Darstellung mit den absoluten Zahlen. Zu erkennen sind deutliche Unterschiede in den absoluten Zahlen, die prinzipiell auf die unterschiedlichen Länderflächen zurückzuführen sind. Außerdem ist zu erkennen, dass die flächengrößten Länder auch mit den größten relativen Abschlägen beaufschlagt werden. Dies lässt darauf schließen, dass hier auch die Straßenbegleitflächen einen größeren Anteil am Gesamtpotenzial haben. Die genauen Zahlen sind als Tabelle in Anhang 11.1 beigefügt. In dieser Tabelle finden sich auch die Zahlen für die Untergliederung in Anwendungsfälle, Bundesland und zugeordneter Straßenart. Die Zuordnung nach Straßenart kann wichtig sein, da hierdurch implizit auch die jeweilige Zuständigkeit hervorgeht. Neben der Tabelle ist diese Information aber auch im übergebenem Datensatz enthalten.

Grundsätzlich korreliert die installierbare Leistung mit der vorhandenen Straßenlänge des Bundeslandes. Daher kann auch eine hohe Ähnlichkeit bei der Größe der Balken zueinander zwischen Bild 64 und den Straßenlängen für 2023 des Statistischen Bundesamts in Bild 65 erkannt werden.

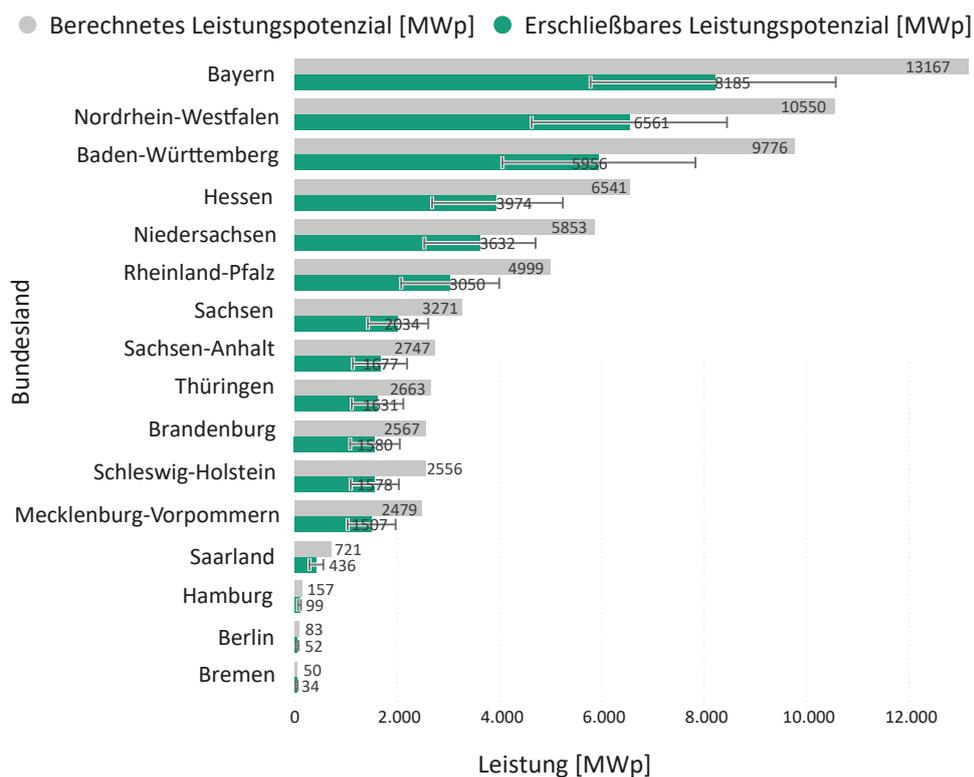


Bild 64: Gesamtpotenzial der berechneten Leistung der Bundesländer (grau) und mit Berücksichtigung des mittleren Abschlags (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag

● Bundesstraßen ● Autobahnen

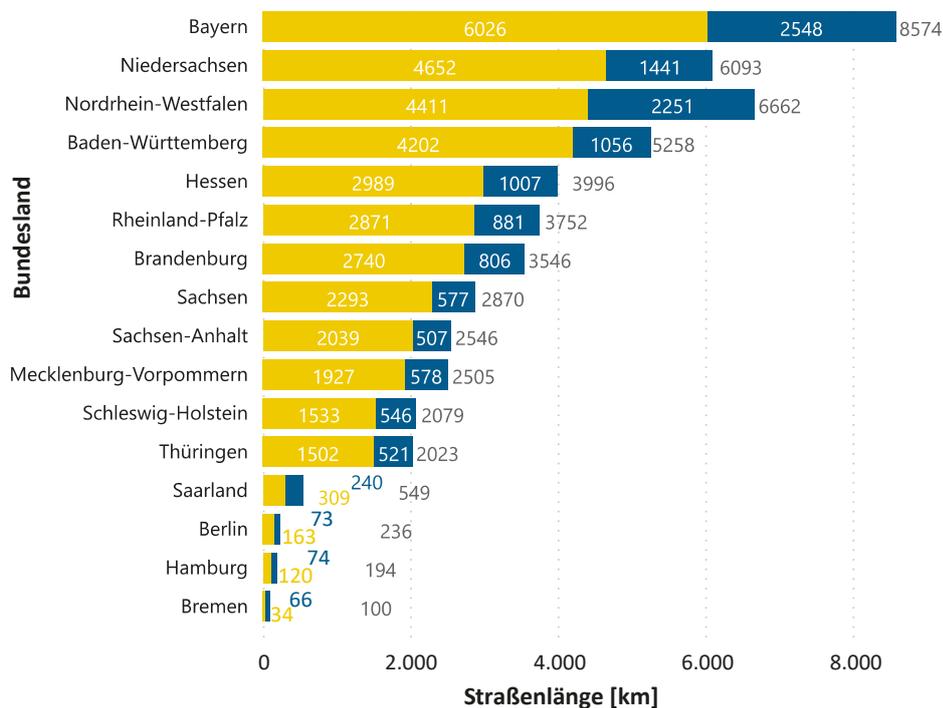
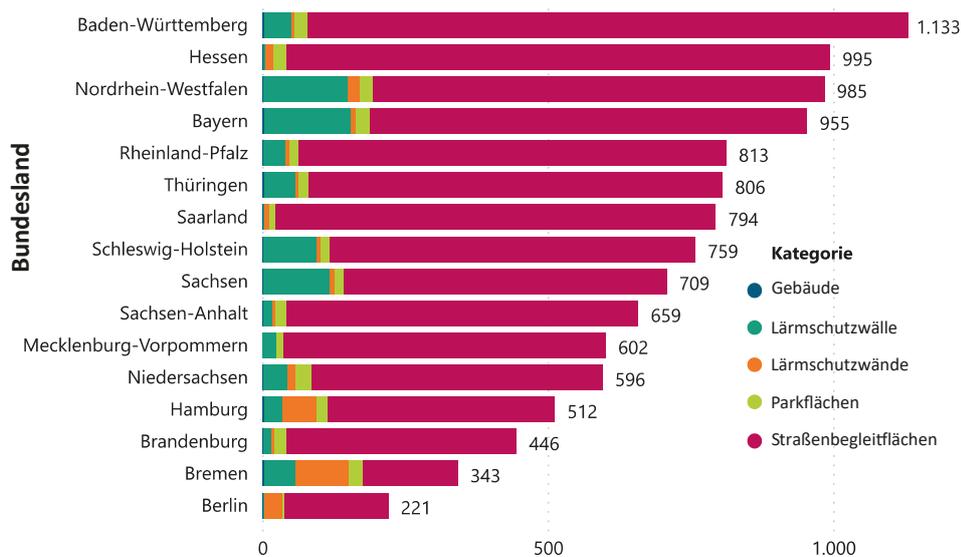


Bild 65: Straßenlängen 2023 von Autobahn und Bundesstraße nach Bundesländern (STATISTA, 2023)

Um jedoch die unterschiedlich großen Bundesländer besser miteinander ins Verhältnis zu setzen und eine Art von Potenzialdichte zu erkennen, kann die Leistungsdichte bezogen auf die Straßenlänge des Bundeslandes betrachtet werden. Andere Dichten mit Bezug auf die Größe der Bundesländer, die Einwohnerzahl oder den Energieverbrauch der Bundesländer wurden nicht analysiert, können mit den erzeugten Daten jedoch im Nachgang betrachtet werden.

Die Streuung zwischen den Bundesländern ist in Bild 66 deutlich geringer als bei Betrachtung der absoluten Zahlen, da die unterschiedlichen Landesflächen weniger ins Gewicht fallen. Auch andere Faktoren wie generelle landschaftliche Aspekte (etwa viel ländlicher Raum), das Alter der Straße und den damit beim Bau gewählten Infrastruktureinrichtungen können eine Rolle spielen.

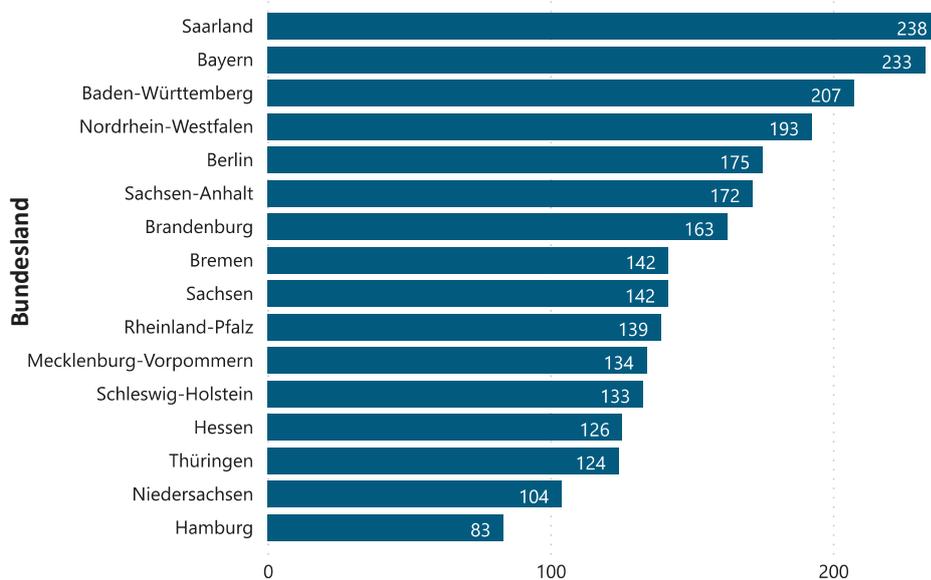
Die Anteile der fünf untersuchten Anwendungsfälle sind ebenfalls stark unterschiedlich ausgeprägt. Insgesamt ist die Tendenz zu erkennen, dass der Anteil der Straßenbegleitflächen mit der Dichte der Besiedlung und Größe des Bundeslandes abnimmt. Entsprechend vergrößert sich der Anteil der anderen Anwendungsfälle. Überraschenderweise ist Hessen im Bereich der Straßenbegleitflächen an erster Stelle. Dies liegt daran, dass Hessen den höchsten Anteil an Straßenbegleitflächen pro Fläche besitzt und mit dem Ballungszentrum um Frankfurt viele Straßen hat. An zweiter Stelle folgt Nordrhein-Westfalen mit einem ebenfalls sehr dichten Straßennetz in der Metropolregion Rhein und Ruhr.



Erschließbares Leistungspotenzial pro km Bundesland [kWp/km]

Bild 66: Spezifisches erschließbares Leistungspotenzial mit mittlerem Abschlag der einzelnen Bundesländer bezogen auf die Länge der Bundesfernstraßen (Autobahn und Bundesstraßen) pro Bundesland

Zwecks Einordnung der Zahlen sind im Folgenden noch die aktuellen Ausbautzahlen der verschiedenen Bundesländer zum Stand 2021 dargestellt. Interessanterweise liegen die aktuell installierten PV-Erzeugungsleistungen in einer ähnlichen Größenordnung wie die ermittelten Potenziale. Die untersuchten Flächen können daher einen relevanten Beitrag für die angestrebten Zubauraten in den nächsten Jahren darstellen.



2021 installierte PV-Leistung pro km² Bundesland [kWp/km²]

Bild 67: Spezifische installierte PV-Leistung der einzelnen Bundesländer bezogen auf die jeweilige Landesfläche in 2021 gemäß (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [4], 2023)

6 Zusammenfassung

Durch die in diesem Abschlussbericht dargestellte Studie wurden verschiedene Flächenkategorien adressiert. Zunächst ging es um die Berechnung der Potenziale und die Erzeugung eines entsprechenden Geodatensatzes mit allen untersuchten Flächen. Die dort enthaltene Verortung der Potenzialflächen kann dazu genutzt werden, um relevante Standorte zu identifizieren und zu priorisieren und so die Erschließung der zur Verfügung stehenden Potenziale zu erleichtern. Anhand umfangreicher Simulationen mit der dargestellten Methodik wurde dieser Datensatz erzeugt und an die Bundesanstalt für Straßenwesen übergeben. Jede Fläche ist neben den hauptsächlichen relevanten Eigenschaften wie der installierbaren Leistung und dem spezifischen Jahresertrag noch mit weiteren Attributen versehen, die eine ausführlichere Bewertung erlauben. Hier ist insbesondere die Entfernung und Zuordnung des nächsten Netzanschlusses zu nennen. Um die über 250.000 resultierenden Potenzialflächen sinnvoll zusammenzufassen, wurde eine Clusterung durchgeführt, um räumlich zusammenhängende Flächen an einem gemeinsamen Netzanschlusspunkt anzubinden. Hierzu wurde ebenfalls ein entsprechender Geodatensatz erzeugt. Außerdem enthält der Datensatz den simulierten Wert des spezifischen Ertrages der Potenzialflächen. Dieser kann ebenfalls für eine Priorisierung genutzt werden.

Die durchgeführten Berechnungen und damit verknüpften Ergebnisse stellen, wie in Kapitel 1.3 dargestellt, bereits eine Abschtichtung vom reinen technischen Potenzial dar, da weitere, in der Methodik dargestellte Einschränkungen wie z. B. vorhandene Vegetation, minimaler spezifischer Jahresertrag und weitere Kriterien berücksichtigt worden sind. Die durchgeführte Studie erfüllt jedoch nicht den Anspruch einer Machbarkeitsstudie für jede der untersuchten Flächen. Daher wurden für die Darlegung der in Kapitel 5 dargestellten erschließbaren Gesamtpotenziale in Deutschland sinnvolle pauschale Abschlagsfaktoren geschätzt, die eine Einschätzung des aus heutiger Sicht mit den heutigen Rahmenbedingungen vorhandenen erschließbaren Potenzials ermöglichen soll. Bei diesen handelt es sich um geschätzte pauschale Abschlagsfaktoren, die zusätzlich mit einer entsprechenden Unsicherheit beaufschlagt wurden. Zusammenfassend ergibt sich mit der dargestellten Methodik inkl. der geschätzten Abschläge auf nationaler Ebene ein erschließbares Gesamtpotenzial von 29,2 – 54,8 GWp. Der größte Anteil entfällt dabei auf die Straßenbegleitflächen (23,3 – 48,6 GWp) gefolgt von den Lärmschutzwällen (~ 3,2 – 4,2 GWp) und den Parkflächen (~ 1,0 – 1,2 GWp). Das Potenzial der Lärmschutzwände ist mit 0,5 – 0,6 GWp ermittelt worden. Auf den Dachflächen der untersuchten Gebäude ergibt sich ca. 0,13 – 0,14 GWp installierbare Photovoltaikleistung. Die Straßenflächen selbst, die z. B. durch Überdachungen erschlossen werden können, wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Auch wenn die Lärmschutzwände und die untersuchten Gebäude bzgl. der absoluten Zahlen eine kleinere Rolle spielen, kann die Erschließung dieser Potenziale äußerst attraktiv sein, da bei bestehenden Lärmschutzwänden Aufbau- und Bodenkosten eingespart werden können oder falls ein Eigenverbrauchsbedarf in näherer Umgebung besteht. Außerdem wurde bei der Belegung der Lärmschutzwände ein eher konservativer Ansatz mit Aufsätzen gewählt, um Beeinträchtigungen der Schallschutzwirkung zu vermeiden. Bei einem Teil der Lärmschutzwände könnten auch seitliche Konstruktionen in Betracht gezogen werden. Diese würden eine Erhöhung der installierbaren Leistung pro m Lärmschutzwand um den Faktor 2 – 3 bedeuten.

Bei Einbeziehung der ermittelten Leistungspotenziale entlang der Bundesfernstraßen in den Kontext der Energiewende ergeben sich unter Berücksichtigung der geschätzten Abschlagsfaktoren relevante Anteile am gesamten Zubaubedarf in Deutschland von 430 GWp bis 2045 (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [2], 2023).

Durch technologische Weiterentwicklungen und Wirkungsgradsteigerungen bei Photovoltaikmodulen sind die Potenziale perspektivisch sogar noch höher (siehe Kapitel 2.3.1). Historisch ist bei der Betrachtung der letzten Jahre zu sehen, dass die Zellwirkungsgrade von kommerziellen kristallinen Si-Zellen im Mittel um 0,3 – 0,5 %-Punkte pro Jahr gestiegen sind (WIRTH, 2021). Zusätzlich waren Flächen, wie die Straßenflächen selbst, die z. B. durch Überdachung erschlossen werden könnten, nicht Gegenstand der Aufgabenstellung der Studie und sind hier nicht mitberücksichtigt.

7 Ausblick

Bei der Erschließung der ermittelten Potenziale kann der erzeugte Datensatz mit Georeferenzierung der Potenzialflächen helfen, sinnvolle Priorisierungen aufzustellen. Auch wenn finale Aussagen zu jeder Fläche nur durch eine entsprechende Detailplanung eines Anlagenplaners getroffen werden können, sind über den Datensatz sinnvolle Vorauswahlen, räumliche Clusterungen oder Priorisierungen möglich. Eine hohe Relevanz haben hier Potenzialflächen unabhängig vom Anwendungsfall, die räumlich nah zu elektrischen Verbrauchern sind. Hier sind insbesondere Straßen-, Autobahnmeistereien und Tunnel zu nennen. Bei erstgenannten ist künftig durch mehr und mehr elektrifizierte Fahrzeugflotten von einer Erhöhung des Energiebedarfes auszugehen. Dies sollte bei den Planungen entsprechend berücksichtigt werden.

Im Kapitel 4 wurde dieser Aspekt qualitativ für Schnellladestationen, Tunnel und Meistereigehöfte untersucht. Die Erschließung der sich in diesem Umkreis befindlichen Potenziale ist daher als äußerst attraktiv anzusehen, da in den meisten untersuchten Fällen eine sehr gute zeitliche Übereinstimmung zwischen Erzeugung und Verbrauch vorliegt. Aufgrund der im Allgemeinen sehr geringen Stromgestehungskosten für photovoltaische Erzeugungsanlagen von 3,1 – 5,7 Cent/kWh für Standorte von Freiflächenanlagen in Deutschland (PHILIPPS, 2023) ist daher vor allem hier von einem großen wirtschaftlichen Potenzial auszugehen. Eine Quantifizierung und Clusterung dieser besonders attraktiven Potenziale kann mit dem erzeugten Geodatensatz durchgeführt werden.

Das Ziel dieser Studie ist die bundesweite Erfassung und Darstellung der Größenordnung der PV-Potenziale. Die flurstücksgenaue Erfassung der Eigentumsverhältnisse und damit der Zuständigkeiten hätte den Rahmen dieser Studie bei weitem überstiegen. Daher können die Ergebnisse nur Hinweise geben für die verschiedenen Akteure wie Bund, Autobahn GmbH des Bundes, Länder aber auch Kommunen und ggf. Privateigentümer, die die Erschließung dann allein oder mit Partnern, wie z. B. Energiegenossenschaften planen können.

Die Veröffentlichung des Datensatzes oder der relevanten Teile des Datensatzes kann dazu genutzt werden, potenzielle Anlagenerrichter und potenzielle Flächen zusammenzubringen. Da die Verantwortung für die entsprechende Detailplanung bei den Planern liegt, kann so eine zeitnahe Einbindung von diesen erreicht werden.

Hinsichtlich der Abwägung zwischen ökologischem Nutzen von Flächen für Flora und Fauna soll an dieser Stelle erwähnt sein, dass auch eine Kombination, wie sie bei Agrivoltaikanlagen gezielt durchgeführt wird, durchaus positive Effekte auf das Gesamtsystem haben kann (HASSANPOUR, 2018). Zu beachten ist bei der Planung derartiger Anlagen aber, dass der zerschneidende Charakter der Straßen selbst nicht noch weiter verstärkt werden sollte.

Literatur

(BAER, 2022)

BAER et al., 2022. Abschätzung des potenziellen jährlichen Energieertrags von PV-Anlagen an Lärmschutzeinrichtungen der Verkehrswege [online]. Verfügbar unter https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/Kurzberichte/TF5/Baer_et_al_07-2022.html?nn=1371986 (abgerufen am 19.07.2023)

(BMVI, 2020)

BMVI, 2020: Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf [online]. Verfügbar unter: <https://nationale-leitstelle.de/wp-content/pdf/broschuere-lis-2025-2030-final-web.pdf> (abgerufen am 19.07.2023)

(BMVI, 2021)

BMVI, 2021. Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen. 2017 – 2018 – 2019 [online]. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/statistik-des-laermschutzes-an-bundesfernstrassen.html> (abgerufen am 19.07.2023)

(BMWK, 2023)

BMWK, 2023: Photovoltaik-Strategie [online]. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 19.07.2023)

(BUNDESRAT DER CH, 2021)

BUNDESRAT der CH, 2021. Studie über das Potenzial der Lärmschutzwände entlang von Autobahnen und Bahnstrecken für die Produktion von Solarenergie [online]. Verfügbar unter: <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-85599.html> (abgerufen am 19.07.2023)

(DEUTSCHER WETTERDIENST, 2023)

DEUTSCHER WETTERDIENST: Globalstrahlung in Deutschland in dwd, 2023, https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/strahlungskarten/straka_de_g_mvs_17_1991-2020.png (abgerufen am 19.07.2023)

(ENERGIE- UND UMWELTPLANUNGSBÜRO PLANAIR SA)

ENERGIE- UND UMWELTPLANUNGSBÜRO PLANAIR SA, 27. Oktober 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 [online]. Bundesrat Schweiz. Verfügbar unter: <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/68659.pdf> (abgerufen am 19.07.2023)

(FORSTER, 2023)

FORSTER, TSUTZKIRIDZE, KOHLHAUER et al. (2023): Photovoltaic Noise Barriers as Energy Generating Infrastructure: Functional Overview about Five Solutions. WIP-Munich. In: 40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. DOI: 10.4229/EUPVS-EC2023/4DO.5.2.

(FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE[1])

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [1]: Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland in 2022 in energy-charts.info, 2023, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html> (abgerufen am 19.07.2023)

(FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [2])

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [2]: Fraunhofer ISE Studie 2021, Installierte Leistung fluktuierender Erneuerbarer Energien (fEE) zur Stromerzeugung, Szenario Referenz in energy-charts.info, 2023, https://www.energy-charts.info/charts/remod_installed_power/chart.htm?l=de&c=DE (abgerufen am 19.07.2023)

(FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [3])

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [3]: Fraunhofer ISE Studie 2021, Bereitstellung (positiv) und Verwendung (negativ) von Strom, Szenario Referenz in energy-charts.info, 2023, https://www.energy-charts.info/charts/remod_energies/chart.htm?l=de&c=DE&source=electricity_provision_and_use (abgerufen am 19.07.2023)

(FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [4])

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [4]: Installierte Wind- und Solarleistung pro Fläche in Deutschland in 2021 in energy-charts.info, 2023, https://www.energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm?l=de&c=DE&chartColumnSorting=default&expansion=p_inst_states_area&year=2021&legendItems=1010101010101010101010101010100&download-format=text%2Fcsv (abgerufen am 05.09.2023)

(FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [5])

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [5]: PVwins, 2023. [online]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pvwins.html> (abgerufen am 05.09.2023)

(GÜNDRA, 2015)

GÜNDRA ET AL., 2015. Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen. Bericht zum Forschungsprojekt: FE 09.0153/2011/LRB. Bremen: Fachverlag NW in der Carl-Schünemann-Verlag-GmbH. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik. 252. ISBN 978-3-95606-150-9.

(HAIDER, 2021)

HAIDER, PRAMMER, ALOIS et. al., 2021, PV-SÜD-K DACH Ergebnisbericht, <https://projekte.ffg.at/projekt/3725909> (abgerufen am 19.07.2023)

(HASSANPOUR, 2018)

HASSANPOUR ADEH, Elnaz; SELKER, John S.; HIGGINS, Chad W.: Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. PloS one, 2018, 13. Jg., Nr. 11, S. e0203256.

(KALTSCHMITT, 2003)

KALTSCHMITT, Martin; STREICHER, Wolfgang; WIESE, Andreas (Hg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003

(KELM, 2019)

KELM et al., 2019: Untersuchung zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen [online]. Verfügbar unter: https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Aktuelles/2019/politischer-dialog-pv-freiflaechenanlagen-studie-333788.pdf (abgerufen am 19.07.2023)

(NORDMANN, 2012)

NORDMANN, T.e.a., 2012. Potenzial von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen. TNC GmbH [online]. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Nr.1405. Verfügbar unter: https://www.baufachinformation.de/kostenlos.jsp?sid=14F6BA53DC1C24F78BDD258C561C46A1&id=2015059010005&link=https%3A%2F%2Fwww.mobilityplatform.ch%2Ffileadmin%2Fmobilityplatform%2Fnormenpool%2F21428_1405_Inhalt.pdf (abgerufen am 19.07.2023)

(ONKELBACH, 2012)

ONKELBACH, 2012. Lärmschutzanlagen an Straßen – Ersatzbaustoffe als Lösungsansatz [online]. Düsseldorf. Verfügbar unter: <https://trid.trb.org/view/1248389> (abgerufen am 19.07.2023)

(PHILIPPS, 2023)

PHILIPPS et al.: Photovoltaics Report in ise.fraunhofer.de, 2023, https://www.energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm?l=de&c=DE&chartColumnSorting=default&year=2022&stacking=stacked_absolute (abgerufen am 19.07.2023)

(STATISTA, 2023)

STATISTA: Statistisches Bundesamt, Straßenlänge: Bundesländer, Stichtag, Straßenklasse, Ortslage, Verfügbar unter: <https://www.govdata.de/daten/-/details/strassenlange-bundeslander-stichtag-strassenklasseortslage>, Stand 15.08.2023

(STATISTA, 2022)

Statistik PV Modulpreise, Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156490/umfrage/preis-fuer-eine-fertig-installierte-solaranlage-in-deutschland/> Stand: 30.06.2022

(SOLARANLAGEN-ABC, 2022)

SOLARANLAGEN-ABC: Statistik Preise Freiflächenanlagen, Verfügbar unter: <https://www.solaranlagen-abc.de/solaranlagen-fuer-freiflaechen/> Stand: 30.06.2022

(TROMMSDORFF, 2022)

TROMMSDORFF, Max, et al. Agrivoltaics: Solar power generation and food production. In: Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems. Academic Press, 2022. S. 159-210.

(WIRTH, 2023)

HARRY WIRTH, 27. September 2023. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html> (abgerufen am 27.09.2023)

Bilder

Bild 1:	Stufen der Potenzialbegriffe und ihre Nebenbedingungen inkl. Verortung des Beispiels Lärmschutzwand A.....	20
Bild 2:	Überblick über Datenlieferungen zu Lärmschutzeinrichtungen auf Länder-ebene.....	22
Bild 3:	Ausgewählte Beispiele je nach Datenquelle unterschiedlich räumlich verorteter LSE.....	23
Bild 4:	Überblick über die Lärmschutzeinrichtungen entlang BFStr nach Typ (inkl. Count).....	24
Bild 5:	Anteil der Datenquelle für LSE-Geometrie (links) und LSE-Höhe (rechts) bezogen auf die Geometrie-Gesamtzahl.....	25
Bild 6:	Überblick über die Lärmschutzeinrichtungen entlang von BFStr nach Herkunft der LSE-Geometrie (inkl. Count).....	25
Bild 7:	Überblick über die Lärmschutzeinrichtungen entlang von BFStr nach Datenquelle der LSE-Höhe (inkl. Count).....	26
Bild 8:	Vergleich der Verkehrsflächen eines ausgewählten Rasthofs inklusive Hausrumringen nach Basis-DLM- und OSM-Daten (jeweils Stand 2022).....	27
Bild 9:	Vergleich von Straßenbegleitflächen eines ausgewählten BFStr-Abschnitts nach Basis-DLM und OSM-Daten (jeweils Stand 2022).....	28
Bild 10:	Querschnitt PV-Lärmschutzwall.....	30
Bild 11:	Beispiel einer Rastanlage mit ermittelter jährlicher Einstrahlung auf den unterschiedlichen, dort vorhandenen Anwendungsfällen.....	31
Bild 12:	Konzept A mit vollflächiger solarer Überdachung © ClickCon GmbH & Co. KG.....	34
Bild 13:	Konzept B mit solarer Teilüberdachung über den Stellplätzen © ClickCon GmbH & Co. KG.....	35
Bild 14:	Installation von Straßenbegleitflächen.....	37
Bild 15:	Clusterbildung für PV-Anlagen mit selben Netzverknüpfungspunkt.....	38
Bild 16:	Standorte der Anlagen zur Simulation mit Zenit© (© DWD).....	39
Bild 17:	Simulierter spezifischer Ertrag der 5 Referenzstandorte und die verschiedenen Anwendungsfälle.....	40
Bild 18:	Interpolierter spezifischer Ertrag.....	41
Bild 19:	Wichtige Pilotprojekte von solaren Lärmschutzwänden.....	45
Bild 20:	Kategorisierung von technischen Umsetzungsvarianten von PV-LSW nach Elevationswinkel © Fraunhofer ISE.....	47
Bild 21:	Akustische Funktionsweisen einer Lärmschutzwand © Fraunhofer ISE.....	48

Bild 22:	Querschnitt eines Lärmschutzwalls und einer Lärmschutzwand im Vergleich nach RLS-90 © Fraunhofer ISE	52
Bild 23:	Häufigkeit von Leistungsbedarfen in einem typischen Schnelladehub an Achsen	57
Bild 24:	Zeitlicher Verlauf von PV, Last und Batterieleistung im Mai für den Standort Schnellladehub	59
Bild 25:	Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einem typischen Schnellladehub.....	60
Bild 26:	Simulationsergebnisse mit Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einem typischen Schnellladehub mit einem PV-Generator mit 3 MW _{peak}	61
Bild 27:	Jahresenergiebedarf der untersuchten Tunnel.....	63
Bild 28:	Jahresenergiebedarf pro m der untersuchten Tunnel	63
Bild 29:	Häufigkeit von Leistungsbedarfen am Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt.....	64
Bild 30:	Durchschnittlicher Energiebedarf pro Tag Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt	64
Bild 31:	Häufigkeit von Leistungsbedarfen am Tunnel L1182 Darmsheim	65
Bild 32:	Durchschnittlicher Energiebedarf pro Tag Tunnel L1182 Darmsheim	65
Bild 33:	Zeitlicher Verlauf von PV, Last und Batterieleistung im Mai für den Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt	67
Bild 34:	Zeitlicher Verlauf von PV, Last und Batterieleistung im Mai für den Tunnel L1182 Darmsheim.....	67
Bild 35:	Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung am Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt	68
Bild 36:	Simulationsergebnisse mit Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einem typischen Schnelladehub mit einem PV-Generator mit 250 kW _{peak} am Tunnel B535 Schwetzingen – Plankstadt	69
Bild 37:	Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung am Tunnel L1182 Darmsheim	70
Bild 38:	Simulationsergebnisse mit Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einem typischen Schnelladehub mit einem PV-Generator mit 100 kW _{peak} am Tunnel L1182 Darmsheim	71
Bild 39:	Längenverteilung der in der Bauwerksdatenbank enthaltenen Tunnel.....	72
Bild 40:	Häufigkeit von Leistungsbedarfen an einer typischen Straßenmeisterei	73
Bild 41:	Durchschnittlicher Energiebedarf pro Tag in einer durchschnittlichen Straßenmeisterei mit 32 MWh Jahresverbrauch	73
Bild 42:	Häufigkeit von Leistungsbedarfen im EV Szenario A – ohne Lastmanagement..	75
Bild 43:	Häufigkeit von Leistungsbedarfen im EV Szenario B – mit einfachem Lastmanagement	76

Bild 44:	Zeitlicher Verlauf von PV, Last und Batterieleistung im Mai einer durchschnittlichen Straßenmeisterei ohne elektrifizierte Flotte	77
Bild 45:	Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einer durchschnittlichen Straßenmeisterei	78
Bild 46:	Simulationsergebnisse mit Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung an einer typischen Straßenmeisterei mit einem PV-Generator mit 30 kWp	79
Bild 47:	Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung des Bedarfes einer elektrifizierten Flotte einer durchschnittlichen Straßenmeisterei ohne Lademanagement (sonstiger Verbrauch nicht berücksichtigt)	80
Bild 48:	Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung des Bedarfes einer elektrifizierten Flotte einer durchschnittlichen Straßenmeisterei ohne Lademanagement mit einem PV-Generator mit 90 kWp (sonstiger Verbrauch nicht berücksichtigt)	80
Bild 49:	Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung des Bedarfes einer elektrifizierten Flotte einer durchschnittlichen Straßenmeisterei mit Lademanagement (sonstiger Verbrauch nicht berücksichtigt)	81
Bild 50:	Simulationsergebnisse ohne Speicher für die Eigenverbrauchsdeckung des Bedarfes einer elektrifizierten Flotte einer durchschnittlichen Straßenmeisterei mit Lademanagement mit einem PV-Generator mit 90 kWp (sonstiger Verbrauch nicht berücksichtigt)	82
Bild 51:	Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und mit Berücksichtigung des Abschlags zur Abschätzung des erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich für Deutschland	83
Bild 52:	Statistische Verteilung der untersuchten Gebäude nach Größe des berechneten Leistungspotenzials	84
Bild 53:	Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und geschätztes erschließbares Leistungspotenzial (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag auf den Dachflächen der untersuchten Gebäude.....	85
Bild 54:	Statistische Verteilung der Lärmschutzwände nach Größe des berechneten Leistungspotenzials	86
Bild 55:	Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag auf den untersuchten Lärmschutzwänden.....	87
Bild 56:	Statistische Verteilung der Parkflächen nach Größe des berechneten Leistungspotenzials	87
Bild 57:	Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der Parkflächen	88

Bild 58:	Statistische Verteilung der Lärmschutzwälle nach Größe des berechneten Leistungspotenzials	89
Bild 59:	Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der untersuchten Lärmschutzwälle	90
Bild 60:	Statistische Verteilung der Straßenbegleitflächen nach Größe des berechneten Leistungspotenzials	91
Bild 61:	Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der untersuchten Straßenbegleitflächen	91
Bild 62:	Summe des berechneten Leistungspotenzials (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag der untersuchten Flächenarten	92
Bild 63:	Relativer Anteil der berechneten Leistungspotenziale (grau) und des geschätzten erschließbaren Leistungspotenzials (grün)	93
Bild 64:	Gesamtpotenzial der berechneten Leistung der Bundesländer (grau) und mit Berücksichtigung des mittleren Abschlags (grün) sowie Unsicherheitsbereich zum minimalen und maximalen Abschlag	94
Bild 65:	Straßenlängen 2023 von Autobahn und Bundesstraße nach Bundesländern (STATISTA, 2023)	95
Bild 66:	Spezifisches erschließbares Leistungspotenzial mit mittlerem Abschlag der einzelnen Bundesländer bezogen auf die Länge der Bundesfernstraßen (Autobahn und Bundesstraßen) pro Bundesland	96
Bild 67:	Spezifische installierte PV-Leistung der einzelnen Bundesländer bezogen auf die jeweilige Landesfläche in 2021 gemäß (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE [4], 2023)	96

Tabellen

Tab. 1:	In dieser Studie verwendete Potenzialbegriffe.....	19
Tab. 2:	In dieser Studie verwendete Größen zur Quantifizierung des PV-Potenzials	21
Tab. 3:	Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Lärmschutzwänden	33
Tab. 4:	Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Lärmschutzwällen.....	33
Tab. 5:	Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Dachflächen.....	34
Tab. 6:	Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Parkflächen.....	35
Tab. 7:	Angenommene Parameter zur Ermittlung des technischen Potenzials auf Straßenbegleitflächen	36
Tab. 8:	Angenommene Parameter zur Ermittlung möglicher Netzverknüpfungs- punkte. Einordnungen gemäß VDE 42.....	36
Tab. 9:	Kostenabschätzung Netzanschluss	37
Tab. 10:	In das GIS-Tool integrierte Gesetze.....	38
Tab. 11:	Varianten und Ausrichtung der Anlagen der Simulation	40
Tab. 12:	Differenz der simulierten Jahresenergie.....	41
Tab. 13:	Schätzung der pauschalen Abschlagsfaktoren die auf das berechnete Leistungspotenzial angewendet werden	42
Tab. 14:	Ermittelte Abschläge auf technische Flächenpotenziale anderer Studien und Veröffentlichungen.....	44
Tab. 15:	Bildreferenzen zu Pilotprojekten in Bild 19 (von links nach rechts).....	46
Tab. 16:	Absorptionsgruppen nach ZTV Lsw 22	48
Tab. 17:	Anforderungseigenschaften an die PV-Integration und resultierende Annahmen	50
Tab. 18:	Beispiele für PV-Aufsätze auf Lärmschutzwänden von Produkten und Prototypen.....	51
Tab. 19:	Beispiele PV-Wälle in Freising und Töging am Inn	53
Tab. 20:	Anforderungen und Funktionen an PV-Lärmschutzwälle	55
Tab. 21:	Referenzprojekte für PV-Überdachungen/PV-Lärmschutzeinhausungen	56
Tab. 22:	Grundsätzliche Simulationsparameter	58
Tab. 23:	Jahresverbrauch von 10 Tunneln in Baden-Württemberg (Quelle: Verkehrsministerium BaWü)	62

Tab. 24:	Grundsätzliche Simulationsparameter	66
Tab. 25:	Jahresverbrauch von 9 Straßenmeistereien in Baden-Württemberg (Quelle: Verkehrsministerium BaWü)	73
Tab. 26:	Vorhandene Fahrzeuge und durchschnittliche Kilometerleistung in den 9 Straßenmeistereien in Baden-Württemberg (Quelle: Verkehrsministerium BaWü)	74
Tab. 27:	Grundsätzliche Simulationsparameter	76

Anhang

Leistungspotenziale nach Bundesland, Straßenart und Flächenkategorie

Bundesland lang	Kategorie Straße	Kategorie Fläche	Berechnete installierbare Leistung [MWp]	Leistung minimaler Abschlag [MWp]	Leistung mittlerer Abschlag [MWp]	Leistung maximaler Abschlag [MWp]
Baden-Württemberg	Autobahn	Gebäude	13,61	12,93	12,25	11,57
		Lärmschutzwand	247,26	197,81	173,08	148,36
		Lärmschutzwand	17,65	15,88	14,12	12,35
		Parkflächen	114,05	108,35	102,64	96,94
		Straßenbegleitfläche	2.423,15	1.938,52	1.453,89	969,26
	Autobahn Ergebnis		2.815,72	2.273,49	1.755,98	1.238,48
	Bundesstraße	Gebäude	4,70	4,46	4,23	3,99
		Lärmschutzwand	107,97	86,38	75,58	64,78
		Lärmschutzwand	26,88	24,19	21,51	18,82
		Parkflächen	19,01	18,06	17,11	16,16
		Straßenbegleitfläche	6.802,11	5.441,69	4.081,27	2.720,84
Bundesstraße Ergebnis		6.960,67	5.574,78	4.199,68	2.824,59	
Baden-Württemberg Ergebnis		9.776,38	7.848,26	5.955,67	4.063,07	
Bayern	Autobahn	Gebäude	23,98	22,78	21,58	20,38
		Lärmschutzwand	589,35	471,48	412,55	353,61
		Lärmschutzwand	54,34	48,91	43,47	38,04
		Parkflächen	220,39	209,37	198,35	187,33
		Straßenbegleitfläche	4.209,44	3.367,55	2.525,66	1.683,77
	Autobahn Ergebnis		5.097,50	4.120,09	3.201,61	2.283,14
	Bundesstraße	Gebäude	6,34	6,02	5,70	5,39
		Lärmschutzwand	1.280,16	1.024,13	896,11	768,09
		Lärmschutzwand	32,11	28,90	25,69	22,48
		Parkflächen	16,86	16,02	15,18	14,34
		Straßenbegleitfläche	6.734,03	5.387,22	4.040,42	2.693,61
Bundesstraße Ergebnis		8.069,50	6.462,29	4.983,10	3.503,91	
Bayern Ergebnis		13.167,00	10.582,38	8.184,71	5.787,05	
Berlin	Autobahn	Gebäude	0,30	0,29	0,27	0,26
		Lärmschutzwand	1,12	0,90	0,79	0,67
		Lärmschutzwand	8,59	7,73	6,87	6,01
		Parkflächen	0,89	0,85	0,80	0,76
		Straßenbegleitfläche	45,32	36,26	27,19	18,13
	Autobahn Ergebnis		56,23	46,02	35,93	25,83
	Bundesstraße	Gebäude	0,00	0,00	0,00	0,00
		Lärmschutzwand	0,43	0,38	0,34	0,30
		Straßenbegleitfläche	26,44	21,15	15,86	10,58
	Bundesstraße Ergebnis		26,87	21,54	16,21	10,88
Berlin Ergebnis		83,10	67,56	52,13	36,71	

Bundesland lang	Kategorie Straße	Kategorie Fläche	Berechnete installierbare Leistung [MWp]	Leistung minimaler Abschlag [MWp]	Leistung mittlerer Abschlag [MWp]	Leistung maximaler Abschlag [MWp]
Brandenburg	Autobahn	Gebäude	6,53	6,20	5,88	5,55
		Lärmschutzwall	46,14	36,91	32,30	27,68
		Lärmschutzwand	14,24	12,82	11,39	9,97
		Parkflächen	85,85	81,56	77,26	72,97
		Straßenbegleitfläche	777,38	621,90	466,43	310,95
	Autobahn Ergebnis		930,14	759,39	593,26	427,13
	Bundesstraße	Gebäude	1,62	1,53	1,45	1,37
		Lärmschutzwall	26,45	21,16	18,52	15,87
		Lärmschutzwand	4,22	3,80	3,38	2,96
		Parkflächen	2,55	2,42	2,29	2,17
		Straßenbegleitfläche	1.602,48	1.281,98	961,49	640,99
	Bundesstraße Ergebnis		1.637,31	1.310,90	987,13	663,36
Brandenburg Ergebnis			2.567,45	2.070,29	1.580,39	1.090,48
Bremen	Autobahn	Gebäude	0,33	0,32	0,30	0,28
		Lärmschutzwall	5,58	4,46	3,90	3,35
		Lärmschutzwand	9,59	8,63	7,67	6,71
		Parkflächen	1,64	1,56	1,48	1,39
		Straßenbegleitfläche	26,52	21,21	15,91	10,61
	Autobahn Ergebnis		43,65	36,18	29,26	22,34
	Bundesstraße	Gebäude	0,02	0,02	0,02	0,02
		Lärmschutzwall	2,41	1,92	1,68	1,44
		Lärmschutzwand	1,93	1,74	1,54	1,35
		Parkflächen	1,21	1,15	1,09	1,03
Straßenbegleitfläche		1,12	0,89	0,67	0,45	
Bundesstraße Ergebnis		6,69	5,73	5,01	4,29	
Bremen Ergebnis			50,34	41,91	34,27	26,63
Hamburg	Autobahn	Gebäude	0,76	0,73	0,69	0,65
		Lärmschutzwall	4,68	3,74	3,28	2,81
		Lärmschutzwand	10,76	9,69	8,61	7,53
		Parkflächen	2,28	2,17	2,06	1,94
		Straßenbegleitfläche	91,03	72,83	54,62	36,41
	Autobahn Ergebnis		109,52	89,15	69,25	49,34
	Bundesstraße	Gebäude	0,07	0,07	0,06	0,06
		Lärmschutzwall	4,00	3,20	2,80	2,40
		Lärmschutzwand	4,12	3,71	3,30	2,89
		Parkflächen	1,60	1,52	1,44	1,36
Straßenbegleitfläche		37,56	30,05	22,54	15,03	
Bundesstraße Ergebnis		47,36	38,55	30,14	21,74	
Hamburg Ergebnis			156,88	127,70	99,39	71,08

Bundesland lang	Kategorie Straße	Kategorie Fläche	Berechnete installierbare Leistung [MWp]	Leistung minimaler Abschlag [MWp]	Leistung mittlerer Abschlag [MWp]	Leistung maximaler Abschlag [MWp]
Hessen	Autobahn	Gebäude	9,76	9,27	8,79	8,30
		Lärmschutzwall	7,24	5,79	5,07	4,34
		Lärmschutzwand	50,06	45,06	40,05	35,05
		Parkflächen	86,02	81,72	77,42	73,11
		Straßenbegleitfläche	1.585,62	1.268,50	951,37	634,25
	Autobahn Ergebnis		1.738,71	1.410,34	1.082,69	755,05
	Bundesstraße	Gebäude	2,98	2,83	2,68	2,53
		Lärmschutzwall	7,61	6,09	5,33	4,57
		Lärmschutzwand	24,06	21,65	19,25	16,84
		Parkflächen	13,28	12,62	11,95	11,29
		Straßenbegleitfläche	4.754,27	3.803,42	2.852,56	1.901,71
	Bundesstraße Ergebnis		4.802,20	3.846,61	2.891,77	1.936,94
	Hessen Ergebnis		6.540,91	5.256,95	3.974,47	2.691,99
Mecklenburg-Vorpommern	Autobahn	Gebäude	1,74	1,65	1,56	1,48
		Lärmschutzwall	50,46	40,37	35,33	30,28
		Lärmschutzwand	0,71	0,64	0,57	0,50
		Parkflächen	27,12	25,76	24,40	23,05
		Straßenbegleitfläche	870,19	696,15	522,11	348,08
	Autobahn Ergebnis		950,22	764,57	583,98	403,38
	Bundesstraße	Gebäude	1,90	1,81	1,71	1,62
		Lärmschutzwall	32,81	26,25	22,97	19,68
		Lärmschutzwand	2,61	2,35	2,09	1,83
		Parkflächen	4,98	4,73	4,48	4,23
Straßenbegleitfläche		1.486,33	1.189,06	891,80	594,53	
Bundesstraße Ergebnis		1.528,63	1.224,20	923,05	621,90	
Mecklenburg-Vorpommern Ergebnis		2.478,85	1.988,77	1.507,02	1.025,27	
Niedersachsen	Autobahn	Gebäude	9,04	8,59	8,14	7,69
		Lärmschutzwall	252,25	201,80	176,57	151,35
		Lärmschutzwand	77,62	69,86	62,10	54,34
		Parkflächen	159,77	151,78	143,79	135,80
		Straßenbegleitfläche	1.748,68	1.398,95	1.049,21	699,47
	Autobahn Ergebnis		2.247,37	1.830,98	1.439,81	1.048,65
	Bundesstraße	Gebäude	5,91	5,62	5,32	5,03
		Lärmschutzwall	115,15	92,12	80,61	69,09
		Lärmschutzwand	33,29	29,96	26,63	23,30
		Parkflächen	29,40	27,93	26,46	24,99
Straßenbegleitfläche		3.421,99	2.737,59	2.053,19	1.368,80	
Bundesstraße Ergebnis		3.605,74	2.893,22	2.192,21	1.491,20	
Niedersachsen Ergebnis		5.853,11	4.724,20	3.632,02	2.539,85	

Bundesland lang	Kategorie Straße	Kategorie Fläche	Berechnete installierbare Leistung [MWp]	Leistung minimaler Abschlag [MWp]	Leistung mittlerer Abschlag [MWp]	Leistung maximaler Abschlag [MWp]
Nordrhein-Westfalen	Autobahn	Gebäude	16,26	15,45	14,64	13,82
		Lärmschutzwall	749,36	599,49	524,55	449,62
		Lärmschutzwand	150,34	135,31	120,27	105,24
		Parkflächen	157,06	149,21	141,35	133,50
		Straßenbegleitfläche	3.127,51	2.502,01	1.876,51	1.251,00
	Autobahn Ergebnis		4.200,54	3.401,46	2.677,32	1.953,18
	Bundesstraße	Gebäude	4,95	4,70	4,46	4,21
		Lärmschutzwall	646,33	517,06	452,43	387,80
		Lärmschutzwand	32,61	29,35	26,09	22,83
		Parkflächen	6,43	6,11	5,79	5,47
		Straßenbegleitfläche	5.658,80	4.527,04	3.395,28	2.263,52
	Bundesstraße Ergebnis		6.349,13	5.084,27	3.884,05	2.683,82
Nordrhein-Westfalen Ergebnis			10.549,66	8.485,73	6.561,37	4.637,01
Rheinland-Pfalz	Autobahn	Gebäude	5,44	5,17	4,90	4,63
		Lärmschutzwall	145,30	116,24	101,71	87,18
		Lärmschutzwand	13,85	12,47	11,08	9,70
		Parkflächen	59,73	56,74	53,75	50,77
		Straßenbegleitfläche	1.658,24	1.326,59	994,94	663,30
	Autobahn Ergebnis		1.882,56	1.517,21	1.166,39	815,56
	Bundesstraße	Gebäude	3,15	2,99	2,84	2,68
		Lärmschutzwall	64,58	51,66	45,20	38,75
		Lärmschutzwand	12,81	11,53	10,25	8,97
		Parkflächen	12,86	12,22	11,57	10,93
Straßenbegleitfläche		3.022,97	2.418,38	1.813,78	1.209,19	
Bundesstraße Ergebnis		3.116,37	2.496,78	1.883,64	1.270,51	
Rheinland-Pfalz Ergebnis			4.998,92	4.013,98	3.050,03	2.086,07
Saarland	Autobahn	Gebäude	0,40	0,38	0,36	0,34
		Lärmschutzwall	1,06	0,84	0,74	0,63
		Lärmschutzwand	5,20	4,68	4,16	3,64
		Parkflächen	5,36	5,09	4,82	4,55
		Straßenbegleitfläche	383,53	306,82	230,12	153,41
	Autobahn Ergebnis		395,54	317,82	240,20	162,58
	Bundesstraße	Gebäude	0,66	0,62	0,59	0,56
		Lärmschutzwall	0,19	0,15	0,13	0,11
		Lärmschutzwand	1,55	1,39	1,24	1,08
		Parkflächen	0,85	0,81	0,76	0,72
Straßenbegleitfläche		322,07	257,66	193,24	128,83	
Bundesstraße Ergebnis		325,31	260,63	195,97	131,30	
Saarland Ergebnis			720,85	578,44	436,16	293,88

Bundesland lang	Kategorie Straße	Kategorie Fläche	Berechnete installierbare Leistung [MWp]	Leistung minimaler Abschlag [MWp]	Leistung mittlerer Abschlag [MWp]	Leistung maximaler Abschlag [MWp]	
Sachsen	Autobahn	Gebäude	3,74	3,55	3,37	3,18	
		Lärmschutzwall	340,01	272,01	238,01	204,01	
		Lärmschutzwand	22,18	19,96	17,75	15,53	
		Parkflächen	42,63	40,50	38,37	36,23	
		Straßenbegleitfläche	1.085,19	868,15	651,12	434,08	
	Autobahn Ergebnis		1.493,76	1.204,18	948,60	693,03	
	Bundesstraße	Gebäude	1,84	1,75	1,66	1,56	
		Lärmschutzwall	139,61	111,69	97,73	83,77	
		Lärmschutzwand	8,41	7,57	6,73	5,89	
		Parkflächen	7,96	7,57	7,17	6,77	
		Straßenbegleitfläche	1.619,67	1.295,73	971,80	647,87	
	Bundesstraße Ergebnis		1.777,49	1.424,31	1.085,08	745,85	
	Sachsen Ergebnis			3.271,25	2.628,48	2.033,68	1.438,88
	Sachsen-Anhalt	Autobahn	Gebäude	3,92	3,73	3,53	3,33
Lärmschutzwall			38,38	30,71	26,87	23,03	
Lärmschutzwand			7,82	7,04	6,25	5,47	
Parkflächen			51,41	48,84	46,27	43,70	
Straßenbegleitfläche			1.086,97	869,58	652,18	434,79	
Autobahn Ergebnis			1.188,51	959,89	735,11	510,33	
Bundesstraße		Gebäude	4,28	4,06	3,85	3,64	
		Lärmschutzwall	17,46	13,97	12,22	10,48	
		Lärmschutzwand	7,11	6,40	5,69	4,98	
		Parkflächen	6,97	6,62	6,27	5,93	
		Straßenbegleitfläche	1.523,03	1.218,43	913,82	609,21	
Bundesstraße Ergebnis			1.558,85	1.249,47	941,85	634,22	
Sachsen-Anhalt Ergebnis			2.747,35	2.209,36	1.676,96	1.144,55	
Schleswig-Holstein		Autobahn	Gebäude	2,41	2,29	2,17	2,05
	Lärmschutzwall		152,02	121,61	106,41	91,21	
	Lärmschutzwand		13,12	11,81	10,50	9,18	
	Parkflächen		28,50	27,08	25,65	24,23	
	Straßenbegleitfläche		767,56	614,05	460,54	307,02	
	Autobahn Ergebnis		963,62	776,84	605,27	433,70	
	Bundesstraße	Gebäude	3,29	3,13	2,96	2,80	
		Lärmschutzwall	124,98	99,99	87,49	74,99	
		Lärmschutzwand	5,05	4,55	4,04	3,54	
		Parkflächen	7,69	7,31	6,92	6,54	
		Straßenbegleitfläche	1.451,44	1.161,15	870,86	580,58	
	Bundesstraße Ergebnis		1.592,46	1.276,12	972,28	668,44	
	Schleswig-Holstein Ergebnis			2.556,07	2.052,96	1.577,55	1.102,14

Bundesland lang	Kategorie Straße	Kategorie Fläche	Berechnete installierbare Leistung [MWp]	Leistung minimaler Abschlag [MWp]	Leistung mittlerer Abschlag [MWp]	Leistung maximaler Abschlag [MWp]
Thüringen	Autobahn	Gebäude	5,82	5,53	5,24	4,95
		Lärmschutzwall	87,07	69,66	60,95	52,24
		Lärmschutzwand	7,53	6,77	6,02	5,27
		Parkflächen	38,99	37,04	35,09	33,14
		Straßenbegleitfläche	1.085,42	868,34	651,25	434,17
	Autobahn Ergebnis		1.224,83	987,34	758,55	529,77
	Bundesstraße	Gebäude	4,48	4,25	4,03	3,80
		Lärmschutzwall	70,74	56,59	49,51	42,44
		Lärmschutzwand	2,75	2,48	2,20	1,93
		Parkflächen	2,58	2,45	2,32	2,19
		Straßenbegleitfläche	1.358,12	1.086,50	814,87	543,25
	Bundesstraße Ergebnis		1.438,66	1.152,26	872,94	593,61
	Thüringen Ergebnis		2.663,49	2.139,60	1.631,49	1.123,38
Deutschland Gesamtergebnis		68.181,63	54.816,59	41.987,32	29.158,04	

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2023

V 366: Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen

Schüller, Niestegge, Hantschel, Kühn, Gerike, Huber

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 367: In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen

Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 368: Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen

Friedrich, Bawidamann, Peter, Waßmuth

€ 20,00

V 369: Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen

Fritz, Grigoropoulos, Kaths, Baier, Reinartz, Schuckließ, Junghans, Lücken, Leonhardt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 370: Wissenschaftliche Begleitung des digitalen Testfelds auf der A9 zwischen München und Nürnberg

Vierkötter, Mischnick, Spangler, Gerstenberger, Windmann, Nedkov, Emmermann, Haspel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 371: Begleitende Systemevaluation der Maßnahme: Sicheres Ausleiten bei BAG-Standkontrollen

Fehn, Margreiter, Spangler, Bogenberger, Emmermann, Bengler, Vierkötter, Nedkov, Feldges, Holst

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 372: Autonome Systeme für Straßenbetriebsdienste (AETAS BAB)

Lüpges, Kleer, Holldorb, Zielke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 373: Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen

Jakobs, Schneider, Toenges-Schuller, Düring, Hoffmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 374: Kriterien für die Beurteilung des Gefährdungspotenzials für Motorradfahrer durch scharfkantige Konstruktionsteile in Fahrzeug-Rückhaltesystemen

Kathmann, von Heel, Schimmelpfennig, Reglitz, Kammel, Goergen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 375: Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation

Fröhlich, Schwedhelm, Kübler, Balzer-Hebborn, Yu

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 376: Innovative Datenerfassung und -nutzung im Straßenbetriebsdienst

Hess, Best, Lohmeier, Temme

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2024

V 377: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen

Geistefeldt, Hohmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 378: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Geistefeldt, von der Heiden, Oeser, Kemper, Diner, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 379: Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst (WinRad)

Holldorb, Riel, Wiesler, Cypra, März

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 380: Maßnahmen zum Umgang mit japanischem Staudenknöterich

Molder, Gaar, Münch, Alberternst

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 381: Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Lindner, Ruhnau, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 382: Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

Ludwig, Tegeler, Schmedes, Tomhave, Hensel, Forster, Kleinhans, Heinrich, John, Schill

€ 19,50

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen · Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-797-6
<https://doi.org/10.60850/bericht-v382>

www.bast.de