



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen ent- lang der Nationalstrassen

**Le potentiel de photovoltaïque le long des routes Natio-
nales près des dispositifs anti-bruit**

**Potential of photovoltaic plants in combination with noi-
se barriers on highways**

**TNC Consulting AG, Feldmeilen
Thomas Nordmann
Thomas Vontobel
Ralph Lingel**

**Forschungsauftrag ASTRA 2010/009 auf Antrag des
Bundesamtes für Strassen (ASTRA)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen

Le potentiel de photovoltaïque le long des routes Nationales près des dispositifs anti-bruit

Potential of photovoltaic plants in combination with noise barriers on highways

**TNC Consulting AG, Feldmeilen
Thomas Nordmann
Thomas Vontobel
Ralph Lingel**

Forschungsauftrag ASTRA 2010/009 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA)

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Thomas Nordmann

Mitglieder

Thomas Vontobel

Beat Fleischli

Ralph Lingel

Begleitkommission

Präsident

Dr. Cédric Joseph, ASTRA

Mitglieder

Prof. Dr. Heinrich Häberlin, FH Burgdorf

Dr. Kurt Heutschi, EMPA

Dr. Stefan Kunz, Meteotest

Antragsteller

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	9
	Résumé	10
	Summary	11
1	Einführung	12
1.1	Grundidee Photovoltaik Schallschutz	12
1.1.1	Synergieeffekt – Lärmschutz und Energieproduktion auf gleichem Raum	12
1.1.2	Doppelnutzen und Substitution in der Konstruktion	12
1.1.3	Serienproduktion und Rationalisierungspotential	12
1.1.4	Wachsende Sensibilisierung für Schallschutzvorhaben	12
1.1.5	Öffentliche Bauherrschaft und Publikumswirksamkeit	12
1.2	Kategorisierung technischer Lösungen für bestehende und geplante LSW	13
1.2.1	Aufgesetzt	13
1.2.2	Angebaut	14
1.2.3	Schindeln	14
1.2.4	Zick-Zack	15
1.2.5	Kassetten	15
1.2.6	Doppelseitig / bifacial senkrecht (Nord-Süd Verlauf)	16
1.2.7	Lärmschutzwand	17
1.3	Technische Anforderungen an PV-Schallschutz	18
1.3.1	Schallschutz	18
1.3.2	Einheitliches Rastermass	18
1.3.3	Rationelle Montage	18
1.3.4	Sicherheit	18
1.3.5	Eigenverschattung	18
1.3.6	Diebstahlschutz	19
1.3.7	Wechselrichter	19
1.3.8	Einspeisepunkt	19
1.3.9	Verkabelung	19
1.3.10	Überspannungsschutz und Erdung	19
1.4	Nicht-technische Anforderungen an PV Schallschutz	20
1.4.1	Landschafts- und Ortsbild	20
1.4.2	Fauna und Flora	20
1.4.3	Grösse der PV Anlage	20
1.4.4	Lokale Umgebung und Horizont	20
2	Methodik	21
2.1	Allgemeines	21
2.2	Ausgangslage	21
2.3	PV Potentiale: Definitionen	21
2.3.1	Theoretisches PV Potential	21
2.3.2	Technisches PV Potential	21
2.3.3	Kurzfristiges und mittelfristiges Potential	21
2.3.4	Erschliessbares Potential	21
2.4	Ablauf Bewertung LSW zur Eignung PV-Nutzung	22
2.4.1	Minimal notwendige Parameter zu den Lärmschutzwänden zur Beurteilung für die Eignung zur Kombination mit Photovoltaik	22
2.4.2	Erweiterte Kriterien für die Beurteilung zur Eignung von LSW auf die Kombination mit PV Anlagen	29
2.4.3	Unterscheidung Sanierung und Neubau	30
2.4.4	Zusammenfassung Kapitel Methodik	30
3	Beschreibung Anwendung der Methodik	31
3.1	Einleitung	31

3.2	Ausgangslage Daten:	31
3.2.1	SonBase	31
3.2.2	KUBA	31
3.2.3	MISTRA LBK Sofortlösung	32
3.3	Vollständigkeit der verfügbaren Daten	32
3.4	Umsetzung PV Potentiale	32
3.4.1	Allgemeines	32
3.4.2	Theoretisches Potential	32
3.4.3	Technisches Potential	33
3.4.4	Kurzfristiges und mittelfristiges Potential	33
3.4.5	Erschliessbares Potential	33
3.5	Minimal notwendige Parameter zu den Lärmschutzwänden	33
3.5.1	Verlauf und Ausrichtung der LSW RBBS-Segmente (LSW-Segmente)	33
3.5.2	Höhe der LSW	36
3.5.3	Strassenseite der LSW und der PV Anlage	36
3.5.4	Schallschutzfunktion LSW	36
3.6	Annahmeset Parameter:	36
3.6.1	Freier Abstand vom Boden bis Solarmodul Unterkante	36
3.6.2	Horizontaler Abstand von LSW bis Modulrand (Lichtraumprofil)	37
3.6.3	Neigung der Solarmodule	37
3.6.4	Modulbreite	39
3.6.5	Gesamte zulässige Breite Aufgesetzt	39
3.7	Visualisierung der notwendigen Parameter unterschiedlicher PV Anlagentypen	39
3.7.1	Strassenzugewandte PV-Anlagentypen	40
3.7.2	Strassenabgewandte PV-Anlagentypen	42
3.7.3	Anlagentyp Bifacial	44
3.8	Erweiterte Kriterien und nicht-technische Parameter für die Beurteilung von LSW	45
3.8.1	Allgemeines	45
3.8.2	Landschafts- und Ortsbildschutz und Akzeptanz	45
3.8.3	Fauna und Flora	45
3.8.4	Minimale Anlagengrösse	45
3.8.5	Material LSW und konstruktive Einschränkungen	45
3.8.6	Elektrische Einspeisung	46
3.8.7	Lokale Umgebung und Horizont	46
3.9	Zusammenfassung Umsetzung Bewertung LSW zur Eignung PV Nutzung	46
4	Technische Umsetzung	47
4.1	Repräsentativität der Daten	47
4.1.1	Geographische Verteilung	48
4.1.2	Hauptparameter	49
4.1.3	Zusammenfassung Repräsentativität	50
4.2	Bestehende/Projektierte Massnahmen	51
4.3	Verifizierung und Bearbeitung einzelner Datensätze	51
4.4	Beeinflussung der Resultate durch das angewendete Modell	51
5	Potentiale und Einschränkungen.....	53
5.1	Annahmesets	54
5.1.1	Technische Parameter	54
5.2	Hochrechnung des Potentials auf flächendeckende Resultate	55
5.3	Berechnung des potentiellen Stromertrags	55
5.4	Theoretisches Potential	56
5.5	Technisches Potential	57
5.5.1	Resultate technisches Potential kurzfristig	57
5.5.2	Resultate technisches Potential mittelfristig	57
5.6	Nicht-technische Parameter	58
5.6.1	Szenarien für die nicht-technischen Annahmen	58
5.7	Realisierbares Potential	59
5.8	Aussagegenauigkeit der gemachten Potentialabschätzung	59
5.9	Zusammenfassung Potentiale	60

6	Vorgehen	61
6.1	Einleitung	61
6.2	Planungsablauf Photovoltaik	61
6.2.1	Vorprojekt / Machbarkeitsstudie	61
6.2.2	Projektphase.....	62
6.2.3	Ausschreibungsphase	62
6.2.4	Realisierungsphase	62
6.2.5	Abschlussphase	63
6.2.6	Inhalt einer typischen PV Vorstudie zur Abklärung der Eignung von LSW für die Kombination mit PV	63
6.2.7	Betrieb und Unterhalt.....	65
7	Ökonomische Prozesse und Modelle	68
7.1	Einleitung	68
7.2	Investitionskosten PV	68
7.3	Refinanzierungsmodelle/Erlöse aus der Stromproduktion	69
7.3.1	Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV).....	69
7.3.2	Vermarktung des ökologischen Mehrwertes	69
7.3.3	Eigenverbrauch	69
7.4	Betreibermodelle	70
7.4.1	Das Astra	70
7.4.2	Unabhängiger Projektträger	70
7.4.3	Entschädigungen	71
7.4.4	Finanzierung.....	71
7.5	Beispiele für Betreibermodelle von Photovoltaik Schallschutzanlagen	71
7.5.1	Verkauf und Heimfall	73
7.6	Zusammenfassung	73
8	Empfehlungen.....	74
	Anhänge	75
	Abkürzungen.....	85
	Literaturverzeichnis	86
	Projektabschluss	87
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	90

Zusammenfassung

Photovoltaik (PV) Anlagen zur Gewinnung von Solarstrom können ohne zusätzlichen Flächenbedarf in Kombination mit verschiedenen schon vorhandenen Infrastrukturbauwerken realisiert werden. Die Kombination von Photovoltaik und Schallschutz eignet sich insbesondere sehr gut, weil die modulare Bauweise der Lärmschutzwände einer rationalen Montage von PV Anlagen entgegenkommt und keine Konkurrenzanwendung besteht.

Für verschiedene Typen von PV Anlagen wurden im Rahmen dieser Studie Modelle entwickelt, welche anhand verschiedener Parameter beschrieben werden können. Basierend auf den Datensätzen der vorhandenen MISTRA LBK Datenbank des ASTRA, welche Angaben zu den Lärmschutzmassnahmen enthält, wurden die für die Beurteilung zur Eignung zur Kombination von PV und Lärmschutzwänden notwendigen Parameter untersucht. Es wurde festgestellt, dass 236 Datensätze in der MISTRA LBK Datenbank vollständige Angaben enthalten, insbesondere Angaben zum Standort und Verlauf der LSW. Der gesamte Datensatz von 1'299 Massnahmen beschreibt die vorhandenen LSW in der Schweiz gemäss den gemachten Abklärungen recht gut. Die vollständigen 236 Datensätze wiederum repräsentieren die 1'299 Datensätze betreffend der untersuchten Parameter gut.

Es wurden Parametersets für die Anlagentypen für das theoretische, das technische und das realisierbare Potential definiert. Dabei wurde auch versucht, nicht-technische Parameter mit entsprechenden Faktoren zu berücksichtigen. Die Studie zeigt, dass für die meisten Verläufe von Lärmschutzwänden eine sinnvolle Kombination mit PV denkbar ist. Für die mit den gemachten Annahmen als geeignet ermittelten LSW wurde automatisiert derjenige PV Anlagentyp ermittelt, welcher die grösstmögliche nutzbare PV Fläche ergibt. Daraus ergeben sich die ermittelten Potentiale als Fläche, elektrische Nennleistung und erwarteter elektrischer Jahresertrag.

Für das theoretische Potential wurde eine Fläche von ca. 2.2 Mio m² ermittelt, was einer elektrischen Nennleistung von etwa 440 MW_p und einem erwarteten elektrischen Jahresertrag von ca. 410 GWh entspricht. Für das technische Potential wurde unter Berücksichtigung von Einschränkungen durch real existierende Produkte, zum Beispiel Modulabmessungen, eine Fläche von 1.3 - 1.5 Mio m² ermittelt. Dies entspricht einer elektrischen Nennleistung von 210 – 240 MW_p und einem erwarteten elektrischen Jahresertrag von 200 – 230 GWh. Mit Berücksichtigung der nicht-technischen Parameter reduziert sich das realisierbare Potential auf 0.7 - 1.0 Mio m² oder 110 – 165 MW_p Nennleistung, was zu einem elektrischen Jahresertrag von 100 – 160 GWh führt.

Das ermittelte realisierbare Potential an Photovoltaik an Lärmschutzwänden entlang der Nationalstrassen des Bundes ist ausreichend, um den Jahresbedarf an elektrischer Energie für den Betrieb der Nationalstrassen in der Jahresbilanz decken zu können. (145 GWh im 2010, inklusive Tunnel und Beleuchtung). Zum Vergleich, die Nennleistung von 165 MW_p entspricht etwa der bis Ende 2011 total in der Schweiz installierten PV Leistung (190 MW_p gem. BfE Umfrage 2011).

Résumé

Les installations photovoltaïques (PV) pour la production d'électricité solaire peuvent être réalisées en combinaison avec diverses infrastructures existantes, sans devoir mettre à contribution des surfaces supplémentaires. Les parois antibruit conviennent particulièrement bien au placement de panneaux photovoltaïques, car elles sont modulaires, ce qui permet un montage rationnel des installations PV. En outre, ces panneaux placés sur ces parois ne prennent la place d'aucune autre application.

Au cours de la présente étude, on a développé des modèles destinés à différents types d'installations PV, modèles qui peuvent être décrits à l'aide de divers paramètres. Le point de départ de l'étude a été la base de données MISTRA LBK de l'OFROU sur les parois antibruit. On a examiné les paramètres permettant l'identification des parois adaptées à la pose d'installations PV. 236 enregistrements de la base de données MISTRA LBK ont été trouvés complets; ils contiennent en particulier des données sur l'emplacement et la configuration des parois antibruit. Il ressort de nos investigations que l'ensemble des 1'299 enregistrements de la base de données décrit bien les parois antibruit existantes en Suisse et que les 236 enregistrements complets constituent un échantillon représentatif des 1'299 enregistrements, pour ce qui concerne les paramètres considérés.

On a défini un ensemble de paramètres permettant d'évaluer les potentialités théorique, technique et pratique de ces installations, selon leur type. Ce faisant, on a tenté de prendre en compte également divers paramètres non techniques en introduisant différents facteurs. L'étude montre que la configuration de la plupart des parois antibruit permet en principe une combinaison intéressante avec le photovoltaïque. Par un procédé automatisé, on a déterminé le type d'installation PV offrant, pour les parois antibruit satisfaisant aux critères de sélection adoptés, la plus grande surface PV utile. Il en est résulté la surface totale pouvant être installée, ainsi que la puissance électrique nominale et la production annuelle correspondantes.

On a ainsi obtenu une surface de 2,2 millions de m² environ qui pourrait théoriquement être installée, correspondant à une puissance nominale d'environ 440 MW_p et à une production annuelle d'environ 410 GWh. Compte tenu des limitations imposées par les caractéristiques des produits actuels du marché, comme par exemple les dimensions des panneaux PV, la surface techniquement réalisable se réduit à 1,3 – 1,5 millions de m², correspondant à une puissance nominale de 210 – 240 MW_p et à une production annuelle de 200 – 230 GWh. Si, de plus, on tient compte des paramètres non techniques, la surface effectivement réalisable se monte à 0,7 – 1,0 million de m², soit une puissance nominale de 110 – 165 MW_p et une production annuelle de 100 – 160 GWh.

Les panneaux PV qui peuvent être effectivement installés sur les parois antibruit le long du réseau des routes nationales de la Confédération suffiraient à couvrir en valeur annuelle la totalité de la consommation d'électricité de ces routes. Celle-ci se montait en 2010 à 145 GWh, éclairage et ventilation des tunnels compris. A titre de comparaison, la puissance nominale de 165 MW_p correspond grosso modo à la puissance PV totale installée en Suisse jusqu'à la fin de 2011, qui se montait à 190 MW_p selon l'enquête 2011 de l'OFEN.

Summary

Photovoltaic (PV) power plants can be realized on a rather large scale without the need of additional space if the PV installations are combined with existing infrastructure. The combination of PV and noise barriers is especially suitable, due to the modular construction of the noise barriers. Modular arrays of PV modules can be prepared and preconstructed before on-site installation. PV is one of the few possible double uses for noise barriers.

For this study different models for possible PV plant designs have been developed. The models have been simplified and described with a set of parameters. The existing database called MISTRA LBK from the FEDRO contains datasets for various noise barrier constructions along highways. These datasets have been examined by setting the most significant parameters for the use of PV. The essential information for the location and the course of the highway is fully available for 236 datasets out of a total of 1'299 datasets. Evaluations of the datasets available have shown, that the 1'299 datasets represent the noise barrier constructions along the Swiss highways rather well. The 236 datasets with all the geographical information are a representative sample for the 1'299 datasets.

For the different potentials such as theoretical and technical potentials, corresponding parameter sets have been set and evaluated. Non-technical parameters were also taken into account. The study shows, that for almost all possible orientations of noise barriers along highways there is a technical solution to install PV power plants. For each noise barrier in the database, the PV construction type with the highest feasible PV module area has been assigned. This results in potentials in terms of PV module area, nominal power and expected annual energy production.

With these assumptions a theoretical potential of about 2.2 Mio m² has been calculated, corresponding to a nominal power of about 440 MW_p and an annual energy production of approximately 410 GWh. For the technical potential, limitations by existing products such as dimensions of PV modules have been taken into account, leading to a technical potential of 1.3-1.5 Mio m² or 210-240 MW_p. The annual energy production is estimated at 200-230 GWh. With the non-technical limitations taken into account, the usable potential leads to 0.7-1.0 Mio m² module area corresponding to 110-165 MW_p and an annual energy production of 100-160 GWh.

The evaluated usable potential of around 150 GWh annual energy production for PV installations in combination with noise barriers along the national highways could match the energy needed for the operation of the national highways. In 2010, the total energy consumption for the operation of the national highways including illumination and ventilation of tunnels, was 145 GWh. The nominal power of around 165 MW_p of PV on noise barriers evaluated as a realistic potential is similar to the amount of installed PV power in Switzerland by the end of 2011.

1 Einführung

1.1 Grundidee Photovoltaik Schallschutz

1.1.1 Synergieeffekt – Lärmschutz und Energieproduktion auf gleichem Raum

Photovoltaikanlagen sind auf grosse Flächen angewiesen, wenn sie langfristig zur energiewirtschaftlichen Stromversorgung dienen sollen. Wenn dafür bereits vorhandene oder ohnehin notwendige Einrichtungen genutzt werden, müssen keine weiteren Freiflächen verbaut werden.

1.1.2 Doppelnutzen und Substitution in der Konstruktion

Durch die Kombination mit der Lärmschutzwand können zwei Bauwerke die auf ähnlichen konstruktiven Konzepten bestehen, kostensparend kombiniert werden. Aufständersysteme, die ohnehin gebaut werden, erfüllen ihren Nutzen in zweifacher Hinsicht. Die Photovoltaikmodule können unter Umständen durch gekonnte Ausrichtung Aufgaben des Lärmschutzes übernehmen und gleichzeitig zur Energiegewinnung beitragen.

1.1.3 Serienproduktion und Rationalisierungspotential

PV-Anlagen, wie auch viele Lärmschutzwände bestehen oft aus immer gleichen Modulen, welche aneinander angebracht werden. Durch den identischen additiven Aufbau sind beide für die Vorfabrikation prädestiniert. Dies ermöglicht Ersparnisse sowohl bei der Produktion wie auch beim Aufbau der Anlagen, welche verglichen mit anderen Energiequellen in sehr kurzer Zeit bewerkstelligt werden können.



Abb. 1.1: PV-Schallschutzanlage



Abb. 1.2: Steingabionen als Lärmschutz

1.1.4 Wachsende Sensibilisierung für Schallschutzvorhaben

Bauvorhaben zwecks Lärmschutz werden zur Zeit in hohem Mass ausgeführt. Die einmalige Gelegenheit, die Bauten mit einem zusätzlichen Nutzen zu versehen, sollte genutzt werden.

1.1.5 Öffentliche Bauherrschaft und Publikumswirksamkeit

Der öffentlichen Bauherrschaft, die für die Nationalstrassen zuständige ASTRA, entsteht die Möglichkeit, die wegen ihres Aussehens oft nachteilig empfundenen Lärmschutzwände (LSW) mit positiven Attributen zu besetzen. Während die Atomenergie in der Krise steckt, geniesst die Solarenergie unterdessen eine Breite Unterstützung in der Bevölkerung. Durch die exponierte Lage der Anlagen entlang der Nationalstrassen kann auf publikumswirksame Weise auf die nachhaltige Produktion von Energie hingewiesen werden.

1.2 Kategorisierung technischer Lösungen für bestehende und geplante LSW

Grundsätzlich wird zwischen angebauten und integrierten Photovoltaik-Anlagen unterschieden. Eine integrierte PV-Anlage ersetzt einen integralen Bestandteil der Schallschutzkonstruktion und/oder übernimmt eine Schallschutzfunktion. Ein Photovoltaikmodul ist in einem Schichtaufbau realisiert. Dabei werden die elektrisch aktiven Solarzellen auf ein Trägermaterial aufgebracht (Folie oder Glas) und auf der Vorderseite mit einer optisch durchlässigen Schutzschicht vor mechanischer Beschädigung geschützt. Diese Schutzschicht besteht bei kristallinen Solarzellen üblicherweise aus eisenarmem Glas, kann aber auch aus einer weiteren Folie bestehen. Aus Sicht des Schallschutzes ist die Oberfläche des Solarmoduls deshalb immer schallreflektierend und nicht schallabsorbierend. Werden die PV-Module aber mit schallabsorbierenden Elementen kombiniert, können die gewünschten schallabsorbierenden Eigenschaften grösstenteils erreicht werden.

1.2.1 Aufgesetzt

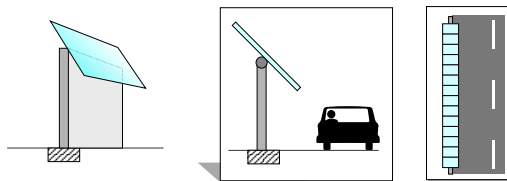


Abb. 1.3: Typ 1 Aufgesetzt. Die PV Anlage wird auf die bestehende Schallschutzwand aufgesetzt.

Bei diesem Konzept werden die Module auf die Lärmschutzwand aufgesetzt. Es eignet sich insbesondere für die Ausrüstung schon bestehender Lärmschutzwände. Es wurde schon mehrmals realisiert, erstmals 1989 an der N13 bei Chur durch die TNC Consulting AG.



Abb. 1.4: Auf die bestehende Lärmschutzwand aufgebaute PV-Anlage an der A13 bei Domat/Ems nahe Chur

1.2.2 Angebaut

Bei dieser Variante des aufgesetzten Anlagentyps wird typischerweise die strassenabgewandte Seite der Lärmschutzwand genutzt. Dabei werden die Module ganzflächig mit der entsprechenden Neigung an die Schallschutzwand montiert.



Abb. 1.5: An die strassenabgewandte Seite der Schallschutzwand angebaute PV-Anlage bei Giebenach BL

1.2.3 Schindeln

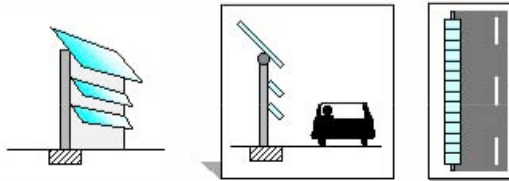


Abb. 1.6: Typ 2 Schindeln. Es werden mehrere Modulreihen übereinander angeordnet.

Die Belegung der Wand erfolgt mit Solarzellen gegenüber einer Anlage vom Typ aufgesetzt um mehrere Lagen erweitert. Dieses Konzept eignet sich vor allem für die Nachrüstung hoher bestehender Schallschutzwände, welche nicht viel Platz haben.



Abb. 1.7: Schindelanlage an der A2 bei Safenwil

1.2.4 Zick-Zack

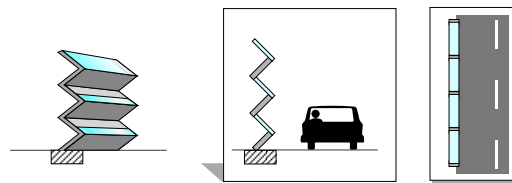


Abb. 1.8: Typ 3 Zick-Zack. Die Module und die LSW ist in Zick Zack Form aufgebaut.

Das Konzept der wechselweise geneigten Flächenstreifen (Zick-Zack) verspricht durch den hohen Integrationsgrad niedrige Kosten. Es handelt sich dabei um reine Stahlkonstruktionen. Hier besteht die Möglichkeit, die PV mit schallabsorbierenden Materialien zu kombinieren.



Abb. 1.9: Beispiel einer Zick-Zack-Anlage in Wallisellen entlang einer S-Bahn Linie. die Photovoltaik Module sind direkt in die schallabsorbierenden Metallkassetten integriert

1.2.5 Kassetten

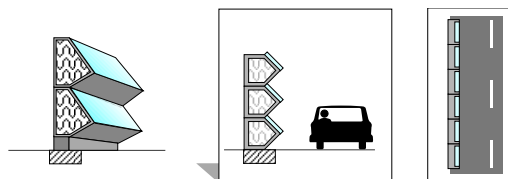


Abb. 1.10: Typ 4 Kassetten. Die PV Module sind direkt auf die Schallschutzkassettem angebracht.

Das Konzept der Lärmschutzkassetten vereint die Anforderungen an Lärmschutz und Photovoltaik in hohem Masse. Es handelt sich um eine „Lärmschutzkassette“, welche die für die Photovoltaik nutzbare Fläche mit einem optimalen Anstellwinkel besitzt. Die Solarzellen werden direkt auf die Kassette auflaminiert. Es handelt sich dabei um eine Variation des Zick-Zack Prinzips.

1.2.6 Doppelseitig / bifacial senkrecht (Nord-Süd Verlauf)

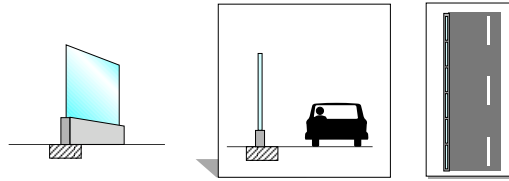


Abb. 1.11: Typ 5 Bifacial. Bifaciale PV Module sind senkrecht angeordnet und verlaufen von Nord nach Süd.

Bei dem innovativen Konzept bifacialer Photovoltaik Anlagen werden beidseitig aktive Solarmodule eingesetzt, die zusätzlich Lärmschutzfunktion übernehmen. Im Gegensatz zu konventionellen PV Anlagen, welche idealerweise nach Süden ausgerichtet sind, kann eine bifaciale PV Anlage Nord-Süd verlaufend sein. Am Morgen fängt sie das Sonnenlicht auf der Ostseite und am Nachmittag auf der Westseite ein. So kann auch eine von Norden nach Süden verlaufende senkrechte Lärmschutzwand mit der Zusatzfunktion Stromproduktion kombiniert werden.



Abb. 1.12: Typ Bifacial entlang der Autobahnüberführung in Zürich

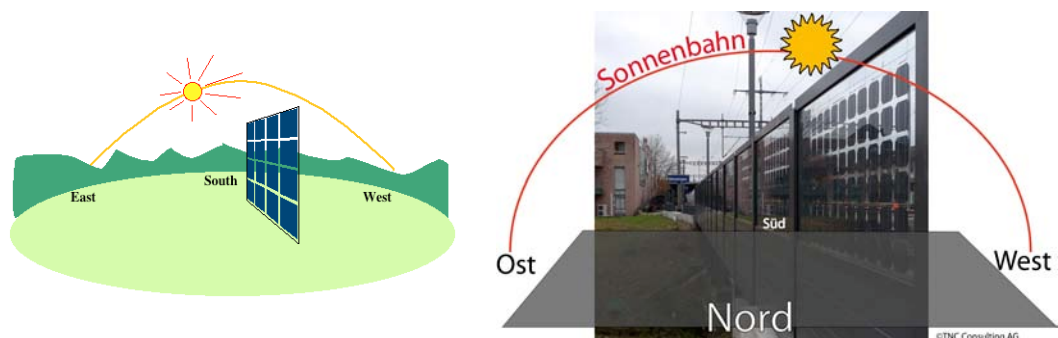


Abb. 1.13: Funktionsprinzip der bifacialen PV-Anlage; links als schematische Skizze und rechts anhand einer realisierten Anlage in Münsingen dargestellt

Durch die Kumulation der Solarstrahlung auf der senkrechten, Ost orientierten Fläche mit der Solarstrahlung der senkrechten, West orientierten Fläche ist dasselbe Solarstrahlungsangebot erreichbar, wie wenn die Fläche ideal nach Süden ausgerichtet und geneigt ist. Dieses Prinzip wurde messtechnisch mit realisierten bifacialen PV Schallschutzanlagen nachgewiesen. Für eine optimale Ausnutzung müssen die beiden Seiten der bifacialen PV Module möglichst gleichmässig nach Ost und West ausgerichtet sein.

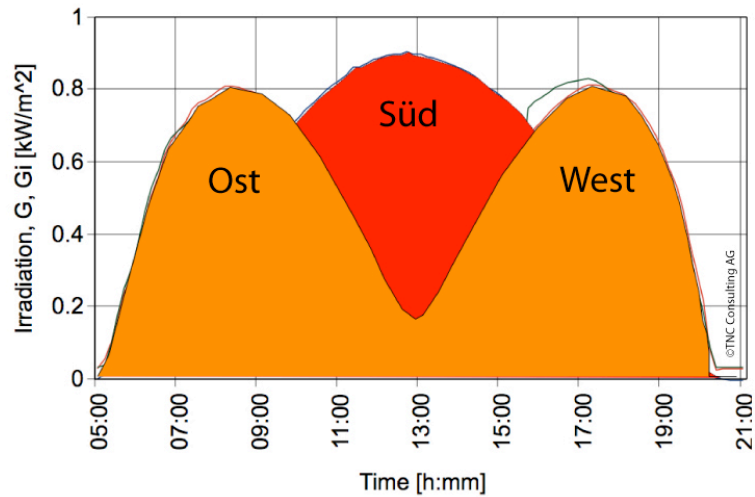


Abb. 1.14: Darstellung der Messwerte der Solarstrahlung einer bifacialen PV Anlage. Die Fläche unter der ideal nach Süden ausgerichteten Kurve ist gleich gross wie die Fläche unter den beiden Maxima, welche am Morgen im Osten und am Abend im Westen entstehen.

1.2.7 Lärmschutzwall

Auch Lärmschutzwälle sind für die gleichzeitige Nutzung mit PV-Anlagen geeignet. Das PV-Feld ist nicht gleichzeitig Lärmschutzanlage, sondern es geht hier in erster Linie um eine zusätzliche Flächennutzung. Gleichwohl kann das PV-Feld den Lärmschutzwall in einem gewissen Masse überragen und somit auch seinen Beitrag zum Lärmschutz leisten.



Abb. 1.15: Bei Freising (DE) realisierte Variante. Die Neigung des Schallschutz-Erddamms wurde für die parallel Anbringung einer Unterkonstruktion für die Photovoltaik-Anlage genutzt.

1.3 Technische Anforderungen an PV-Schallschutz

Bei der Realisierung von Lärmschutzanlagen mit Photovoltaik müssen eine Vielzahl weiterer technischer Anforderungen beachtet werden. Viele dieser Anforderungen beziehen sich spezifisch auf PV Anlagen und haben keinen direkten Zusammenhang mit dem Schallschutz.

1.3.1 Schallschutz

Photovoltaik-Lärmschutzanlagen müssen dieselben schalltechnischen Anforderungen wie herkömmliche Schallschutzbauwerke erfüllen. Primäre Funktion ist die Einführung eines Hindernisses, das die direkte Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger unterbricht. Das Hindernis selbst muss eine genügend grosse Schalldämmung aufweisen, so dass der durch das Hindernis hindurchtretende Schall im Vergleich zum über die Kante gebeugten Anteil vernachlässigt werden kann. Genügend grosse Schalldämmung erfordert ein minimales Flächengewicht von rund 10 kg/m^2 und vollständige Dichtigkeit, d.h. es dürfen keine Spalten oder Risse vorhanden sein. Am Schallschutzbauwerk entstehen in der Regel Reflexionen auf die gegenüberliegende Seite. Wenn diese Reflexionen lärmempfindliche Zonen erreichen und zu einer Pegelerhöhung führen, müssen diese durch absorbierende Gestaltung der Oberfläche reduziert werden.

Wird der photovoltaische Teil der Anlage auf der strassenabgewandten Seite realisiert, können die Anforderungen an die Schallabsorption auf der Strassenseite durch herkömmliche Schallschutzelemente erfüllt werden. Aber auch wenn die PV-Anlage der Strasse zugewandt und neben Schalldämmung auch Schallabsorption erforderlich ist, so kann dies durch konstruktive Massnahmen, wie absorbierende Sockelelemente, angepasste Rahmenausführungen, Kombination mit absorbierenden Elementen oder Anpassungen in der Geometrie erreicht werden. Entsprechende Lösungen sind bereits auf dem Markt erhältlich und die Erfüllung der schalltechnischen Anforderungen konnten bereits in der Praxis erfolgreich messtechnisch nachgewiesen werden.

1.3.2 Einheitliches Rastermass

Das einheitliche Rastermass der Schallschutzelemente sollte für die Photovoltaikmodule beibehalten werden. Dies erlaubt einen hohen Grad an Rationalisierung und Effizienz in der Herstellung und Montage der Module. Der einfache Ersatz von bestehenden konventionellen Elementen auch nach längerer Zeit ist mit einem festen Rastermass deutlich einfacher.

1.3.3 Rationelle Montage

Die Montagezeiten auf der Baustelle variieren stark. Eine weitgehende mechanische und elektrische Vormontage in der Werkhalle erweist sich als sehr rationell und qualitätsfördernd. Auf der vom Wetter abhängigen Baustelle sollten nur noch wenige Arbeitsschritte notwendig sein (Befestigung und Gesamtverkabelung). Hinderlich für eine Vormontage kann sein, dass die sperrigen Elemente nicht auf einem üblichen Lastwagen Platz finden und viele Fahrten notwendig sind. Hier ist eine Optimierung zu suchen.

1.3.4 Sicherheit

Sicherheitsüberlegungen müssen in jeder Projektphase angestellt werden. Bei der Autobahn sind vor allem die Fragen des Lichtraumes und der Elastizität der Konstruktion sowie die Blendung ein wichtiges Thema. Auch das zusätzliche Vorhandensein von elektrischen Installationen an der Strasse ist zu berücksichtigen. Für Montage und Wartung der PV Anlage sind die spezifischen Sicherheitsanforderungen im Bereich der Strassen zu berücksichtigen.

1.3.5 Eigenverschattung

Das Problem der Abschattung von untenliegenden Modulreihen durch obenliegende Module wird im Allgemeinen unterschätzt. Der Effekt lässt sich auch bei einem sehr grossen Abstand der Modulreihen voneinander nicht immer eliminieren, da das Hauptproblem darin besteht, dass die Sonne im Sommer im Nordosten aufgeht und im Nordwesten unter-

geht. In den Randstunden ist deshalb immer eine Abschattung vorhanden. Wird die Geometrie so gewählt, dass die obere Reihe bei Sonnenhöchststand im Sommer (ca. 67°) gerade keinen Schatten auf der unteren Reihe verursacht, kann der Jahresminderertrag der unteren Reihen aber minimiert werden. Zusätzliche elektrische Massnahmen können sinnvoll sein.

1.3.6 Diebstahlschutz

Eine gute Integration der PV-Module heisst in der Regel, dass die Art der Befestigung eine unerlaubte Demontage schwierig macht. Dies bedeutet aber auch, dass das Auswechseln von defekten Modulen schwierig wird. Zum Diebstahlschutz gibt es heute mehrere Möglichkeiten wie Videoüberwachung, spezielle Verkabelung und Verschraubungen etc. Hier gilt es eine standortabhängige Abwägung zu finden, abhängig von der Zugänglichkeit.

1.3.7 Wechselrichter

Kleinwechselrichter haben den Vorteil, dass sie sich für modulare Anlagen, wie sie Photovoltaik Lärmschutzanlagen sind, gut einsetzen lassen. Da jedoch eine grosse Wahrscheinlichkeit vorhanden ist, dass einmal ein Wechselrichter ausfällt, sollen sie nur dort eingesetzt werden, wo sie einerseits geschützt (Diebstahl / Wetter) und andererseits gut zugänglich sind. Dieser Widerspruch ist nicht immer einfach zu lösen. Grossinverter erfordern demgegenüber eine eigene Inverter-Kabine. Die Wartung und Fehlerbehebung der Wechselrichter ist heute unkompliziert. Etwa nach 10-15 Jahren muss der Inverter voraussichtlich ersetzt werden.

1.3.8 Einspeisepunkt

Der von den Solarmodulen produzierte Gleichstrom wird durch die Wechselrichter in netzkonformen Wechselstrom umgewandelt. Dieser kann ins lokale Stromnetz des EVU eingespeist und so zu den Verbrauchern transportiert werden. Eine entsprechende Er-schliessung durch ein vorhandenes Stromnetz, welches die produzierte Leistung der PV Anlage aufnehmen kann, ist von Vorteil. Ist dies nicht der Fall, können aufwendige Er-schliessungs- oder Netzverstärkungsmassnahmen notwendig werden.

Entlang von Nationalstrassen ist der Infrastrukturausbau aber meistens gut, da die Stromversorgung auch für die Strasseninfrastruktur notwendig ist. Zudem werden Schallschutzmassnahmen grösstenteils in direkter Umgebung von bewohnten und damit auch elektrisch erschlossenen Gebieten erstellt.

1.3.9 Verkabelung

Die Verkabelung der PV Anlage muss vor Licht- und Wetter-Einfluss geschützt werden. Auch Nagetiere können zum Problem werden. Es ist auf den Einsatz geeigneter Produkte für Gleichstrom im Ausseneinsatz über die Lebensdauer der PV Anlage zu achten.

1.3.10 Überspannungsschutz und Erdung

Grundsätzlich müssen alle elektrischen Leiter gegen Überspannung geschützt sein. Es sollte ggf. ein Experte beigezogen werden. Für die elektrische Sicherheit muss zusätzlich ein Erdungskonzept erarbeitet werden. Die Blitzschutzvorschriften und die aktuellen Sicherheitsvorschriften für Elektroinstallationen sowie die lokalen Werkvorschriften des Elektrizitätsversorgungsunternehmens EVU sind zu berücksichtigen.

1.4 Nicht-technische Anforderungen an PV Schallschutz

Es gibt weitere, nicht-technische Anforderungen an PV Schallschutzprojekte, welche es ebenfalls zu berücksichtigen gilt. Einige davon sind nachfolgend aufgelistet.

1.4.1 Landschafts- und Ortsbild

Andere Einflüsse auf die Machbarkeit, wie Landschafts- und Ortsbildschutz sollten ebenfalls in Betracht gezogen werden bei der Wahl möglicher Standorte. Die Ästhetik von PV-Anlagen scheint jener von herkömmlichen LSW jedoch adäquat oder sogar anmutender zu sein. Es handelt sicher aber trotzdem um eine technische Installation.

1.4.2 Fauna und Flora

Standortspezifisch können auch zusätzliche Anforderungen betreffend Erhaltung von speziellen Bedingungen zur Erhaltung der Flora und Fauna auftreten. Diesbezügliche Abklärungen sind rechtzeitig zu treffen, um die Erkenntnisse in der Auslegung der PV Anlage berücksichtigen zu können.

1.4.3 Grösse der PV Anlage

Die Frage der möglichen Grösse der PV-Anlage beeinflusst deren Wirtschaftlichkeit. Durch eine rationalisierte Planung, Einkauf und Montage einer Anlage, ist deren ökonomischer Reiz und möglichen Energieertrag bei grösseren Anlagen interessanter. Installationskosten und Erschliessungskosten steigen nicht proportional mit der Anlagengrösse und können bei kleinen Anlagen einen unverhältnismässig hohen Anteil der Gesamtkosten ausmachen.

1.4.4 Lokale Umgebung und Horizont

Die lokale Umgebung hat einen erheblichen Einfluss auf eine PV Anlage. Vegetation oder Infrastruktur in direkter Umgebung der PV Anlage kann zu einer Verschattung der PV Anlage führen. Damit ist ein Minderertrag in Kauf zu nehmen, welcher je nach Ausmass die Wirtschaftlichkeit der PV Anlage in Frage stellt.

Nicht bewirtschaftete Vegetation kann ausserdem auch zu Schäden an den Installationen führen. Je nach Art der Vegetation kann sich der Unterhaltsaufwand deutlich erhöhen. Zu berücksichtigen ist der Betrieb der PV Anlage über die gesamte Lebensdauer.

2 Methodik

2.1 Allgemeines

Um bestehende LSW entlang der Schweizer Nationalstrassen auf die Eignung für die Kombination mit PV Anlagen zu beurteilen, ist nachfolgende Methodik entwickelt worden. Die wichtigsten Elemente der Methodik werden in diesem Kapitel erläutert. Die Anpassungen und Annahmen für eine Anwendung auf die Daten der Lärmschutzwände der Nationalstrassen erfolgt im Kapitel 3. Im Kapitel 4 ist die technische Umsetzung beschrieben.

2.2 Ausgangslage

Entlang von Schweizer Nationalstrassen befinden sich zahlreiche LSW zum Schutz gegen den Strassenlärm. An einer LSW besteht grundsätzlich die Möglichkeit, eine PV-Anlage zu errichten um damit elektrischen Strom zu erzeugen ohne zusätzliche, freie Fläche zu beanspruchen. Um das PV Potential auf den bestehenden und geplanten LSW zu ermitteln, werden die LSW auf ihre Eignung für mögliche PV-Anlagentypen anhand eines Beurteilungsschemas überprüft.

2.3 PV Potentiale: Definitionen

2.3.1 Theoretisches PV Potential

Unter dem theoretischen PV Potential versteht man die gesamthaft realisierbare PV Leistung ohne Berücksichtigung von technischen Rahmenbedingungen der Komponenten oder wirtschaftlichen/zeitlichen Faktoren.

2.3.2 Technisches PV Potential

Das technische Potential beschreibt den Anteil am theoretischen Potential, welches mit technisch realen im Markt vorhandenen Möglichkeiten genutzt werden kann. Dabei werden die Einschränkungen durch typische marktübliche Komponenten mit berücksichtigt. Nicht berücksichtigt sind nicht-technische Einschränkungen zur Nutzung von LSW für PV Anlagen.

2.3.3 Kurzfristiges und mittelfristiges Potential

Mit der Weiterentwicklung der PV Technologie, Neuentwicklungen von Technologien und der weiteren zu erwartenden Preissenkung der PV Systeme kann zwischen den kurzfristig sinnvollsten PV Anlagen und Anlagen, welche zu einem späteren Zeitpunkt realisiert werden können, unterschieden werden. Damit entsteht eine zeitliche Staffelung.

2.3.4 Erschliessbares Potential

Das erschliessbare Potential spiegelt den zu erwartenden tatsächlichen Beitrag der Nutzung von Photovoltaik wieder. Es werden zusätzlich nicht technische Faktoren berücksichtigt:

Psychologischer Faktor: Hier spielt insbesondere die Akzeptanz der Anwohner und der Verbände eine Rolle. Eine PV Anlage kann als störend, als technischer Eingriff in die Landschaft verstanden werden. Ist diese Akzeptanz bei den Anwohnern nicht gegeben, kann ein Teil der PV Anlagen an Lärmschutzwänden nicht realisiert werden.

Politischer Faktor: Damit die Installation von PV Anlagen an Schallschutzwänden entlang von Schweizer Nationalstrassen grossflächig umsetzbar ist, bedarf es politischer Rahmenbedingungen, welche den Bau und Betrieb von PV Anlagen an LSW ermöglichen. So haben zum Beispiel vereinfachte Bewilligungsverfahren, Regelungen für die Einspeisung von Solarstrom ins lokale Stromnetz respektive die Nutzung vorhandener Strasseninfrastruktur und weitere Forschung und Entwicklung im Bereich Photovoltaik und Lärmschutz

einen Einfluss auf das erschliessbare Potential.

2.4 Ablauf Bewertung LSW zur Eignung PV-Nutzung

Um eine bestehende LSW auf die Eignung der PV-Nutzung zu überprüfen, wird die LSW nach verschiedenen Kriterien bewertet bzw. ausgewählt. Dazu gehören neben allgemeinen physikalischen Eigenschaften auch standortspezifische Eigenschaften und Einschränkungen, welche durch verschiedene PV Anlagentypen entstehen. In Abb 2.1 ist der Ablauf der Bewertung schematisch dargestellt:

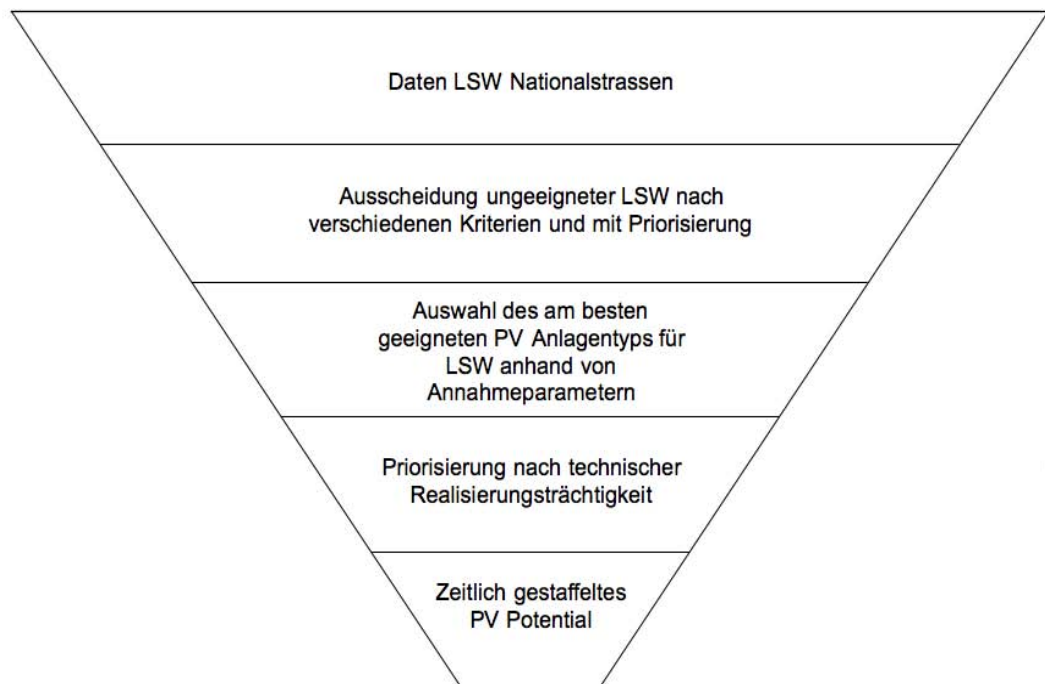


Abb. 2.1: Schematischer Ablauf LSW Filterung zur Ermittlung des Potentials von PV an Lärmschutzwänden

Als Eingabe werden Daten zu den Lärmschutzwänden des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) eingesetzt. Für eine Anwendung mit Photovoltaik ungeeignete LSW werden basierend auf verschiedenen Kriterien ausgefiltert. Anschliessend wird anhand von technisch relevanten Parametern der geeignetste Anlagentyp für einen Lärmschutzwandabschnitt ermittelt. Mit der Annahme von unterschiedlichen Parametern können die unterschiedlichen Potentiale ermittelt werden. Durch Festlegung von Toleranzbändern für die Parameter kann auch eine Priorisierung der potentiellen PV Anlagen erreicht werden und damit auch eine zeitliche Staffelung einer Umsetzung.

2.4.1 Minimal notwendige Parameter zu den Lärmschutzwänden zur Beurteilung für die Eignung zur Kombination mit Photovoltaik

Die minimal notwendigen Angaben zu einer Lärmschutzwand für die Beurteilung zur Eignung für die Kombination mit Photovoltaik sind:

- Geografische Lage der Lärmschutzwand zur Beurteilung des Solarstrahlungsangebots am spezifischen Standort
- Verlauf der Lärmschutzwand zur Feststellung der Ausrichtung der LSW und damit der PV Module
- Höhe der Lärmschutzwand um die theoretisch nutzbare Fläche zu ermitteln

Standort/Geographische Lage

Zur Beschreibung des Standortes der LSW sind die Koordinaten der LSW (Start- und Endpunkt) erforderlich. Anhand des Standortes kann das Solarstrahlungsangebot in der horizontalen Ebene als Beurteilungskriterium für die grundsätzliche Eignung für den Einsatz von Photovoltaik verwendet werden. Standorte, welche zum Beispiel in einem engen, verschatteten Tal liegen, sind nicht geeignet für die Nutzung von PV. Sie werden entsprechend einen tieferen Wert für das Solarstrahlungsangebot in der horizontalen Ebene aufweisen. Es kann ein Schwellwert festgelegt werden, um die Selektivität dieses Kriteriums zu beeinflussen. In Abb. 2.2 ist eine Karte der Schweiz mit dem Solarstrahlungsangebot auf der horizontalen Ebene visualisiert.

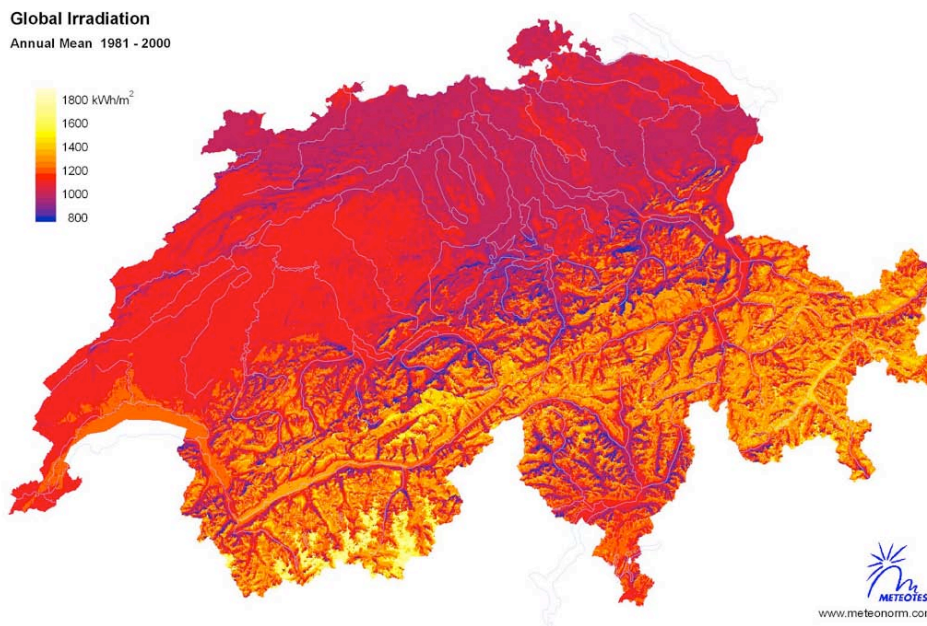


Abb. 2.2: Globale Einstrahlung in der Schweiz im Jahresmittel von 1981 bis 2000 für die horizontale Ebene. Die helleren Regionen weisen eine höhere Sonneneinstrahlung auf, so zum Beispiel die Alpenregionen. © METEOTEST; basierend auf www.meteonorm.com

Verlauf der Lärmschutzwand und Ausrichtung

Damit eine PV-Anlage im Betrieb ein Maximum an Energie erzeugen kann, soll möglichst viel Solarstrahlungsleistung auf das Solarmodul eintreffen. Das vorhandene Solarstrahlungsangebot ist nicht nur vom geographischen Standort abhängig, sondern auch von der Ausrichtung der Module und dem Neigungswinkel der Module. Auf der Nordhalbkugel der Erde ist eine Ausrichtung nach Süden ideal. Eine Abweichung von der idealen Südausrichtung wirkt sich aber nicht proportional auf das Solarstrahlungsangebot aus. So kann auch eine Ausrichtung nach Südwest oder Südost noch gut für eine PV Anlage geeignet sein.

Basierend auf den in Kapitel 1.2 beschriebenen PV Anlagentypen für die Kombination von PV Anlagen mit Lärmschutzwänden sollte damit der Verlauf der Lärmschutzwand idealerweise von Ost nach West sein. Damit sind die montierten Module ideal nach Süden ausgerichtet. Da mit dem Konzept der bifacialen PV Anlage auch auf Nord Süd verlaufenden LSW grundsätzlich die Möglichkeit besteht, eine effiziente PV Anlage zu betreiben, kann auch dieser Bereich der möglichen Ausrichtungen abgedeckt werden. PV Anlagen können grundsätzlich sowohl auf der strassenzugewandten Seite als auch auf der strassenabgewandten Seite der LSW installiert werden. Damit ist es möglich, in allen vier Quadranten der möglichen Ausrichtungen von LSW einen PV Anlagentyp zu finden, welcher sinnvoll und effizient eingesetzt werden kann.

Es resultiert ein Bereich von Verläufen für die LSW, welcher nicht sinnvoll mit den vorhandenen Möglichkeiten zur Kombination mit PV Anlagen abgedeckt werden kann. Je nach Selektivität der zugelassenen Abweichung aus der idealen Südausrichtung (respektive für bifacial aus dem Nord-Süd-Verlauf) ist der Bereich der Verläufe der LSW, welche nicht für eine Kombination mit PV geeignet sind, grösser oder kleiner.

In Abb. 2.3 ist links der Verlauf von Lärmschutzwänden für konventionelle PV-Anlagen schematisch dargestellt. Die Ausrichtung der PV Anlage ist grundsätzlich senkrecht zum Verlauf der Lärmschutzwand. Abb. 2.3 zeigt die beispielhafte Einteilung in drei Bereiche, welche mit den Farben grün, orange und rot dargestellt sind. Der grüne Bereich stellt denjenigen Bereich dar, welcher eine geringe Abweichung des Verlaufs der LSW von Ost nach West hat und damit für die PV Anlage eine nahezu ideale Südausrichtung. Der orange und der rote Bereich stellen entsprechend grössere Abweichungen dar. Eine Abwägung der zulässigen Abweichung aus der Idealausrichtung ist nur unter Berücksichtigung der Modulneigung und dem angestrebten Ertrag möglich.

In Abb. 2.3 rechts ist die analoge Aufteilung von Lärmschutzwänden mit Nord-Süd-Verlauf für eine Anwendung mit bifacialen PV Anlagen in drei Bereiche dargestellt. Die Bereiche für eine bifaciale PV Anlage sind deutlich enger, da eine möglichst gleichmässige Verteilung der Solarstrahlung auf die Ostseite und auf die Westseite angestrebt wird. Dies ist notwendig um die elektrischen Komponenten, insbesondere den Wechselrichter, korrekt dimensionieren zu können.

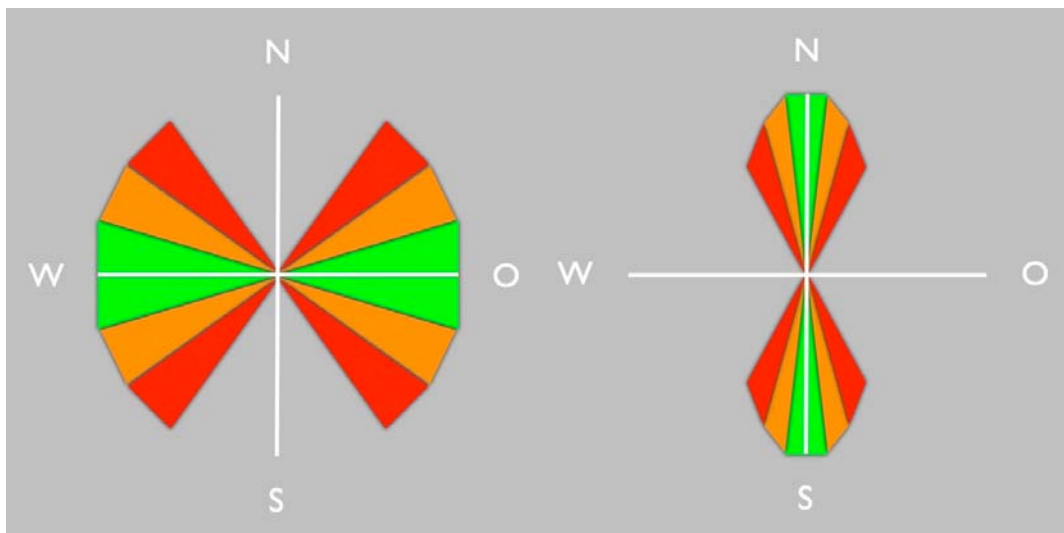


Abb. 2.3: Links: Schematische Darstellung von 3 Bereichen von Verläufen der Lärmschutzwände für die Kombination mit konventionellen PV Anlagen. Die Ausrichtung der PV Module ist senkrecht zum Verlauf der Lärmschutzwände. Rechts: Darstellung des Verlaufs von LSW für bifaciale PV Anlagen. Bifaciale PV-Module sind auf beiden Seiten solaraktiv und nehmen am Morgen und am Abend Sonnenenergie auf. (TNC, 2012)

Kombiniert man die Bereiche aus Abb. 2.3, so ergibt sich die Grafik in Abb. 2.4 mit allen Bereichen von möglichen Verläufen von LSW die entweder mit einer Standard PV Anlage oder mit einer bifacialen PV Anlage kombiniert werden können. Die vier grauen Bereiche, die zwischen den farbigen Bereichen liegen, stellen die Verläufe derjenigen Lärmschutzwände dar, welche aufgrund ihrer Ausrichtung nicht weiter berücksichtigt werden.

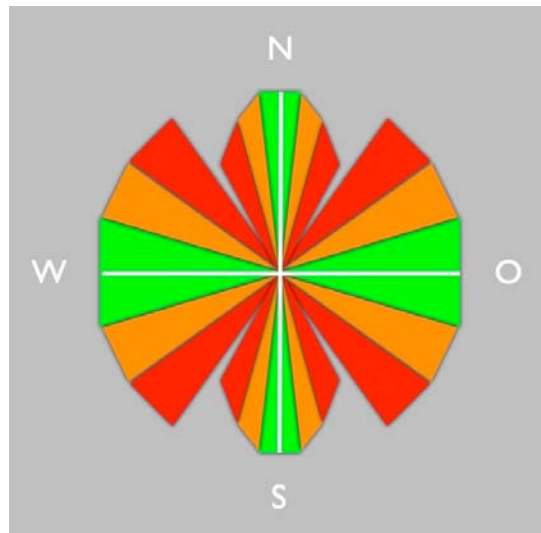


Abb. 2.4: Kombination der Bereiche von Verläufen für LSW die mit der Standard PV Anlage oder mit der bifacialen PV Anlage kombiniert werden können. Die verbleibenden grauen Gebiete stellen diejenigen Verläufe von LSW dar, welche nicht für eine Kombination mit einer der untersuchten PV Anlagentypen geeignet sind. (TNC, 2012)

Abb. 2.4 zeigt, dass für einen Grossteil der möglichen Verläufe von Lärmschutzwänden eine Kombination mit einer PV Anlage betreffend Ausrichtung der PV Anlage möglich ist.

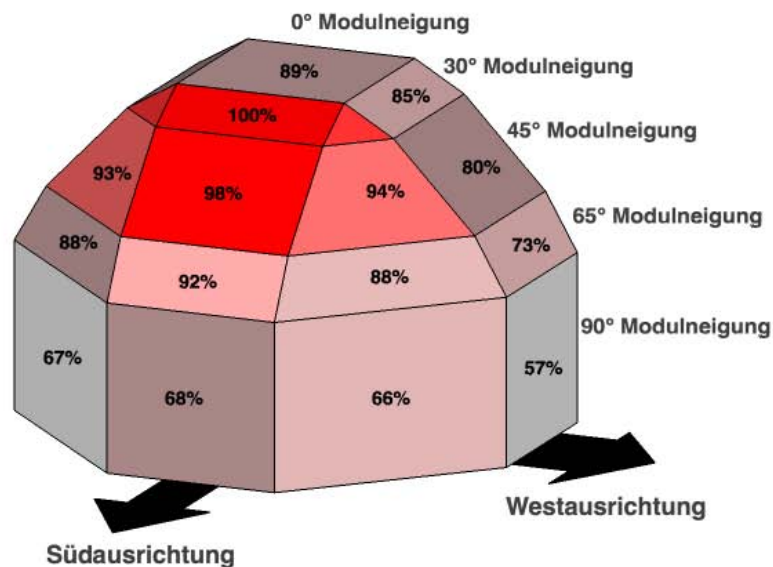


Abb. 2.5: Verschiedene Ausrichtungen von PV-Modulen am Standort Zürich. Die maximale Einstrahlung wird am Standort Zürich mit einer Südausrichtung und 30° Neigung erreicht. Bei einer Abweichung zur Südausrichtung von +/- 45° und mit einem Neigungswinkel von 45° ergibt sich ein Minderertrag des Solarstrahlungsangebotes von rund 6-7% auf. Bei einer Ost Ausrichtung (-90°) bei 30° Neigung ist der Minderertrag des Solarstrahlungsangebotes bei ca. 15% gegenüber einer ideal nach Süden orientierten und geneigten Fläche. (TNC, 2012)

Solarstrahlungsangebot

Der elektrische Ertrag einer PV Anlage ist direkt proportional zum vorhandenen Solarstrahlungsangebot. Um das Solarstrahlungsangebot in der Jahressumme zu maximieren, ist neben einer guten Südausrichtung auch die Neigung der Module entscheidend. Mit Hilfe einer Einstrahlungssimulations-Software (z.B. MeteoNorm) kann an einem beliebigen Standort das Solarstrahlungsangebot auf eine geneigte Fläche berechnet werden.

Um das Solarstrahlungsangebot simulieren zu können, müssen Annahmen für die Neigung der Module getroffen werden. Für südausgerichtete konventionelle Module im Schweizer Mittelland liegt der ideale Neigungswinkel bei ca. 35° ab Horizontal für einen maximalen Jahresertrag. In den alpinen Regionen der Schweiz liegt der ideale Neigungswinkel höher, bei etwa 45°. Der Neigungswinkel der Module hat aber nicht nur einen Einfluss auf das Solarstrahlungsangebot sondern auch auf die Konstruktionsweise der PV Anlagen an den LSW. Damit ist eine Kombination von maximiertem Solarstrahlungsangebot und optimierter Konstruktion der PV Anlage notwendig. Für bifaciale PV Anlagen muss der Neigungswinkel der Module 90° (vertikal) sein um ein möglichst gleichmässiges Solarstrahlungsangebot auf der Ost- und auf der Westseite zu erhalten.

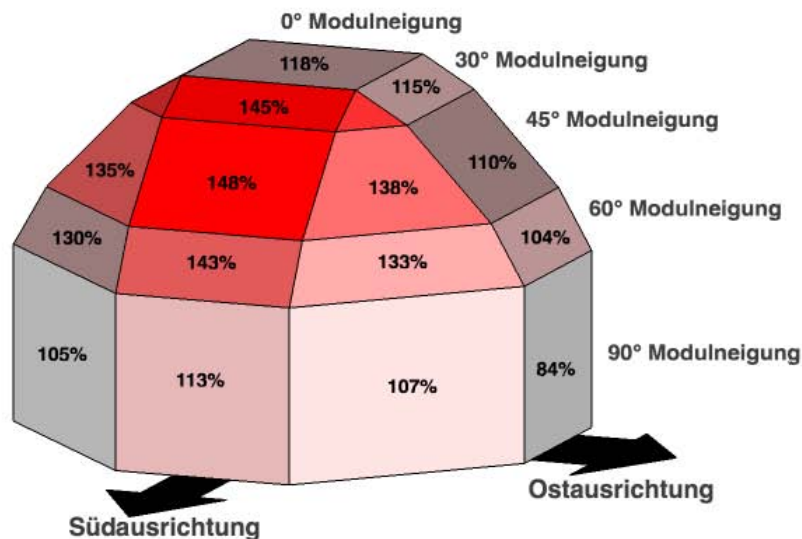


Abb. 2.6: Verschiedene Ausrichtungen und Neigungen von PV Modulen am Standort St. Moritz (Alpenregion) ohne Berücksichtigung des Horizonts. Im Gegensatz zum Standort Zürich ist am Standort St. Moritz das Solarstrahlungsangebot bei einer Neigung von 45° und Südausrichtung maximal (TNC, 2012).

In Abb. 2.5 ist das Solarstrahlungsangebot für den Standort Zürich für unterschiedliche Modulausrichtungen und –neigungen dargestellt. Als 100% Referenz wird dabei eine ideal nach Süden ausgerichtete, ca. 35° geneigte Fläche angenommen. Für den Standort Zürich entspricht dies etwa 1'240kWh/m²a Solarstrahlungsangebot. In Abb. 2.6 sind dieselben Ausrichtungen und Neigungen für den Standort St. Moritz dargestellt. Das maximale Solarstrahlungsangebot von ca. 1'840kWh/m²a wird dabei bei idealer Südausrichtung und einem Neigungswinkel von ca. 45° erreicht. Der höhere Neigungswinkel liegt in der Verteilung des Solarstrahlungsangebots begründet. Während im Flachland während den Wintermonaten häufig Nebel vorhanden ist und damit nur diffuses Licht vorhanden ist, ist in den alpinen Regionen die Verteilung zwischen Sommer und Winter gleichmässiger.

Da gleichzeitig im Winter die Sonnenbahnen tiefer sind als im Sommer, ist der mittlere Neigungswinkel für ein maximales Solarstrahlungsangebot über ein Jahr in den alpinen Regionen höher. Der Vergleich zeigt aber auch, dass in alpinen Regionen bei einer Ausrichtung von West oder Ost und einem damit verbundenen Solarstrahlungsangebot von etwa 70% des maximalen Solarstrahlungsangebot eine PV Anlage dasselbe Solarstrahlungsangebot wie eine ideal ausgerichtete und geneigte PV Anlage im Flachland zur Verfügung hat. Eine entsprechende Priorisierung bei der Umsetzung der PV Anlagen kann eingeführt werden.

Strassenseite der LSW und der PV Anlage

Die Strassenseite, auf welcher die LSW steht ist als Kriterium von Bedeutung, da für PV-Anlagen auf der strassenzugewandten Seite der horizontale Abstand von der LSW zum Modulrand entscheidend ist, um das Lichtraumprofil der Strasse nicht zu beeinträchtigen. (Abb. 2.7) Für PV-Anlagen auf der strassenabgewandten Seite einer LSW ist dieser Abstand weniger wichtig. Die nachfolgende Grafik zeigt das Lichtraumprofil einer Nationalstrasse als Prinzipskizze. Schematisch sind dabei sowohl auf der Nord- als auch auf der Südseite der Strasse Lärmschutzwände mit beispielhaft aufgesetzten PV Anlagen dargestellt.

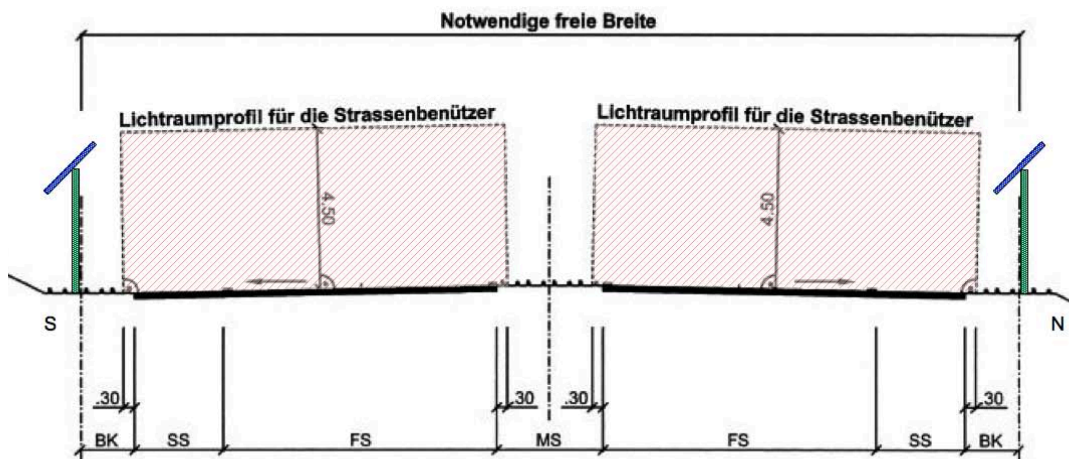


Abb. 2.7: Schematische Darstellung des Lichtraumprofils einer Strasse. Die Installation von PV Anlagen an der strassenabgewandten Seite einer LSW ist für eine mögliche Beeinträchtigung des Lichtraumprofils weniger kritisch. Hingegen ist bei einer Installation auf der strassenzugewandten Seite der LSW der Abstand von der LSW bis zur Modulaussenkante ein wichtiger Parameter (TNC, [1]).
Legende: BK: Bankett, SS: Standstreifen/Pannestreifen, FS: Fahrstreifen, MS: Mittelstreifen, N: Nord, S: Süd

Schallschutzklasse der LSW

Die Schallschutzklasse gibt an, welche Eigenschaften die LSW hat. Abb. 2.8 zeigt tabellarisch die Schallschutzklassen nach der Norm EN 1793-1:1997 (entspricht SN 640 571-1 Lärmschutzeinrichtungen an Strassen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 1: Produktspezifische Merkmale der Schallabsorption):

Beurteilungsgrundlage (Norm / Definition / Einheit)	Klasse/Gruppe (Stufe / Kategorie / Wert)				
Schallabsorptionsgruppe nach EN 1793-1:1997	A0	A1	A2	A3	A4
Einzahlangabe Schallabsorption $DL\alpha$ (dB) ¹	nicht geprüft	< 4	4 bis 7	8 bis 11	> 11
Schallabsorptionsgrad α gewichtet nach Strassenlärm EN 1793-1:1997	-	< 0.56	≥ 0.56 bis < 0.83	≥ 0.83 bis < 0.93	≥ 0.93
Schallabsorptionsklasse nach DIN EN ISO 11654:1997	-	D	C	B	A
Bewertung nach VDI 3755: 2000	-	absorbierend	hoch absorbierend	höchst absorbierend	höchst absorbierend

Abb. 2.8: Gruppen der Schallabsorptionseigenschaft für Strassenverkehrslärm gemäss Europäischer Norm 1793-1:1997, DIN EN ISO 11654:1997, VDI 3755:2000

Um die Schallschutzfunktion einer LSW durch die Installation einer Photovoltaikanlage nicht zu beeinträchtigen, ist es wichtig den richtigen PV-Anlagentyp zu wählen.

Kristalline PV Module sind üblicherweise mit einem Glas versehen zum Schutz der Solarzellen vor mechanischen Belastungen und Feuchtigkeit. Dadurch können die PV Module nur bestimmte Schallschutzeigenschaften aufweisen. Sie können aber auch mit schallabsorbierenden Materialien kombiniert werden oder müssen geometrisch so angeordnet werden, dass sie die Anforderungen an den Schallschutz erfüllt werden.

Folgende PV-Anlagentypen sind für die Installation an absorbierenden Lärmschutzwänden geeignet: Typ Bifacial als aufgesetzte Variante, da dieser Typ nur die Gesamthöhe der LSW beeinflusst und keine schallabsorbierende Fläche abdeckt. Es ist sicherzustellen, dass keine störenden Reflektionen an der bifacialen Anlage entstehen. Typ Aufgesetzt und Schindel, wenn der Modulneigungswinkel so gewählt wird, dass die Lärmquelle unterhalb der Achse der Module liegt und die Schallwellen an der LSW absorbiert werden können.

Der PV Anlagentyp Angestellt wird für absorbierende LSW auf der strassenzugewandten Seite als ungeeignet erachtet, da die PV-Module die Absorptionsfläche abdecken und der Schall an der Glasoberfläche reflektiert wird.

Weniger kritisch sind PV Anlagen auf der strassenabgewandten Seite von LSW. Bei Lärmschutzdämmen kann eine PV Anlage aus Sicht Schallschutz ganzflächig auch auf der strassenzugewandten Seite angebracht werden, da der Wall und/oder Vegetation schallreflektierend sind.

2.4.2 Erweiterte Kriterien für die Beurteilung zur Eignung von LSW auf die Kombination mit PV Anlagen

Zusätzliche Kriterien können für eine detailliertere Beurteilung der LSW zur Eignung für die Kombination mit PV genutzt werden. Die meisten dieser Faktoren sind aber nicht flächendeckend bekannt, respektive objektabhängig. Sie können erst in einer Machbarkeitsstudie respektive einem Vorprojekt ermittelt und beurteilt werden. Um die Potential-schätzung so realitätsnah wie möglich zu machen, können Faktoren für die Berücksichtigung basierend auf Erfahrungswerten und Annahmen festgelegt werden.

- **Material der LSW:** Das Material der LSW beeinflusst die möglichen Arten der mechanischen Verbindung zwischen PV Anlagen und LSW.
- **Statik der LSW:** Ein PV Anlage (PV Module und Unterkonstruktion) bringt zusätzliche Last und Kräfte auf/an die LSW. Die Statik der LSW gibt die entsprechenden Randbedingungen vor. Verstärkende Massnahmen sind grundsätzlich möglich, aber sehr aufwendig und teuer.
- **Zustand der LSW:** Der Zustand ist für die zeitliche Achse der Umsetzung der PV Anlagen bedeutend. Eine PV Anlage hat eine erwartete Lebensdauer von 25 bis 30 Jahren. Kann der Bau der PV Anlage mit baulichen Massnahmen an der LSW kombiniert werden, ergeben sich Synergieeffekte in den Bereichen der Planung und der Umsetzung, insbesondere zum Beispiel bei Baustelleneinrichtungen, etc. Wird die LSW gar erneuert, können auch integrierte PV Anlagen geprüft werden.
- **Wechselrichterstandort:** Der Wechselrichter Standort nach Möglichkeit so zu wählen, um bei Wartungsarbeiten guten Zugang zu haben und Leitungswege kurz zu gestalten. Es sollten kurze Leitungswege zwischen PV Anlage, Wechselrichter und Einspeisepunkt angestrebt werden.
- **Mögliche Einspeisepunkte für den produzierten Solarstrom:** Um die produzierte Solar-energie ins Stromnetz einspeisen zu können, sind Einspeisepunkte ins lokale Strom-netz notwendig. Dort wird der produzierte Solarstrom, nachdem er in netzkonformen Wechselstrom gewandelt worden ist, ins Stromnetz eingespeist. Der Standort der Ein-speisepunkte beeinflusst die Leitungslänge und damit die Verluste sowie die Kosten für die Erschliessung.
- **Sichtbarkeit/Blendwirkung:** Die Sichtbarkeit und Blendwirkung der PV Anlage sind durch die geometrischen Verhältnisse der PV Anlage und der Anlieger respektive der Strassennutzer gegeben. Die Sicherheit auf den Nationalstrassen darf nicht durch eine Blendwirkung der PV Anlage gefährdet werden. Dies kann zu Einschränkungen in der anwendbaren Geometrie der PV Anlage führen. Die Blendwirkung kann mit einer Neigungswinkelanpassung beeinflusst werden. Die Sichtbarkeit und die Leichtigkeit der PV Anlage kann auch die Akzeptanz einer PV Anlage bei den Anwohnern beeinflussen.
- **Rückbaubarkeit.** Nach der Lebensdauer einer PV Anlage soll die Rückbaubarkeit gewährleistet sein, ohne die LSW zu beschädigen.

Länge der LSW

Die Länge der LSW ist grundsätzlich bekannt. Für die Ermittlung des PV Potentials soll eine mögliche installierbare PV Nennleistung pro Laufmeter (l_{fm}) ermittelt werden. Dieser Wert kann dann für die Beurteilung des theoretischen Potentials mit der Länge der LSW verrechnet werden. Für das technische Potential kann eine minimale Modulfläche definiert werden, damit die PV Anlage eine minimale Nennleistung erreicht, so dass die weiteren notwendigen technischen Komponenten wie zum Beispiel Wechselrichter real einsetzbar sind. Für eine wirtschaftlich sinnvolle Realisierung der PV Anlage ist eine Mindestnennleistung der PV Anlage anzustreben. Dies einerseits weil die Systemkosten einer PV Anlage mit zunehmender Anlagengrösse kleiner werden und andererseits der Anteil von PV fremden Bauteilen und Leistungen weniger als proportional mit der zunehmenden Nennleistung einer PV Anlage steigt. Hier sind insbesondere die Baustelleneinrichtung und die Erschliessungsarbeiten Faktoren, die einen minimalen Sockelaufwand bedeuten, welcher unabhängig von der PV Anlagen Nennleistung ist. In der Beurteilung des zeitlichen Potentials kann die zusammenhängende Länge der LSW als zusätzliches Kriterium für die zeitliche Priorisierung der zu realisierenden PV Anlagen genutzt werden.

Höhe und Fläche der LSW

Die Fläche der LSW wird indirekt durch die Höhe der LSW berücksichtigt. Basierend auf der in einem LSW Abschnitt zur Verfügung stehenden Höhe wird nach dem optimalen PV Anlagentyp gesucht, der die notwendigen Rahmenbedingungen erfüllt und mit welchem eine möglichst grosse PV Nennleistung installierbar ist. Die Fläche der installierbaren PV Anlage pro Laufmeter stellt das Potential betreffend Nennleistung dar, da dieser Wert noch von der PV Technologie unabhängig ist. Der Ertrag ist ausserdem abhängig vom Standort und dem vorhandenen Solarstrahlungsangebot.

2.4.3 Unterscheidung Sanierung und Neubau

Für die Installation einer PV Anlage an einer LSW können unterschiedliche Zeitpunkte gewählt werden. Bei einem Neubau der LSW ist nicht nur die Kombination mit einer PV Anlage möglich, sondern eine echte Integration der PV Anlage in die LSW. Damit sind auch andere Bedingungen betreffend Schallschutzeigenschaften realisierbar, was den Einsatz von anderen PV Anlagentypen erlaubt. Eine PV Anlage kann aber auch mit einer bestehenden LSW kombiniert werden. Idealerweise wird in der zeitlichen Umsetzung die Kombination der PV Anlage mit der Sanierung der LSW angestrebt. Prinzipiell ist aber auch ein Retrofit einer PV Anlage auf eine bestehende und nicht sanierungsbedürftige LSW machbar. Die Faktoren Sanierung und Neubau beeinflussen damit den Zeitpunkt der Realisierung einer PV Schallschutzanlage und die möglichen PV Anlagentypen.

2.4.4 Zusammenfassung Kapitel Methodik

Für die Beurteilung des Potentials von PV Anlagen an Schallschutzwänden gibt es ein Set von minimal notwendigen Angaben zu den LSW. Basierend auf diesen Angaben soll für mehrere PV Anlagentypen derjenige Typ ermittelt werden, welcher die grösst mögliche Nennleistung für diesen Abschnitt bringt. Dieses Set von Angaben ist im Kapitel Methodik mit dem entsprechenden Einfluss auf die weitere Verwendung beschrieben und wird im Kapitel Umsetzung für die konkrete Anwendung weiter beschrieben.

3 Beschreibung Anwendung der Methodik

3.1 Einleitung

Im Kapitel 2 wurde die Methodik zur Beurteilung der Daten von Lärmschutzwänden zur Eignung für die Kombination mit Photovoltaik erläutert. In diesem Kapitel wird die Anwendung der Methodik beschrieben, insbesondere die einzelnen Parameter für die Potentialschätzung. Die technische Umsetzung wird separat beschrieben.

3.2 Ausgangslage Daten:

Bis Ende 2007 waren die Kantone für die Nationalstrassen und die zugehörigen Lärmschutzmassnahmen zuständig. Seit 2008 ist das ASTRA für alle Nationalstrassen und die Lärmschutzmassnahmen zuständig. Eine entsprechende Datenbank mit den Lärmschutzwänden befindet sich zur Zeit im Aufbau und die Datenstämme werden eingepflegt.

Grundlage für die PV Potential Analyse an den Lärmschutzwänden sind die Daten über die Lärmschutzwände. Die in der Methodik beschriebenen minimal notwendigen Parameter sind für eine Beurteilung mit der entwickelten Methode zwingend notwendig. Die Vollständigkeit der Daten der Lärmschutzwände ist für die Vollständigkeit der PV Potential Analyse entscheidend. Die in der Methodik beschriebenen erweiterten Kriterien können für eine Präzisierung der PV Potential Analyse genutzt werden.

Nachfolgend werden drei bestehende Datenbanken, welche in Zusammenhang mit Lärm an Nationalstrassen stehen, kurz erläutert.

3.2.1 SonBase

Mit der Lärmdatenbank SonBase können flächendeckende Auswertungen zur Lärmbelastung in der Schweiz berechnet werden. Die Lärmdatenbank SonBase wurde in mehrjähriger Entwicklungsarbeit erstellt und steht seit dem Jahr 2009 zur Verfügung. Grundlage ist ein Geographisches Informationssystem (GIS), welches auf den Daten der Landestopographie im Massstab 1 : 25'000 basiert. In SonBase sind räumlich aufgeschlüsselte Informationen wie Bevölkerung, beschäftigte Personen, Bauzonen, Liegenschaften, etc. abrufbar. SonBase enthält Verkehrszählungen, Lärmmessungen und Modellrechnungen von über 75'000 Kilometer Strassen, 3'000 km Bahnlinien und 70 Flugplätzen. Diese erfassten Daten werden mit entsprechenden Lärmmodellen ergänzt. SonBase fokussiert sich auf die Lärmbelastung und nicht auf die entsprechenden Schutzmassnahmen. SonBase dient als Grundlage für die Beurteilung der sanierungsbedürftigen Regionen wegen zu hohen Lärmbelastungen.

3.2.2 KUBA

Die KUBA Datenbank enthält Kunstbauten entlang der Nationalstrassen. Als Kunstbauten gelten: Brücken, Tagbautunnel, Galerien, Überdeckungen, Durchlässe, Schutzbauwerke, Stützbauwerke, Tunnel und Lärmschutzbauwerke. Lärmschutzwände gelten aber nicht zwingend als Kunstbauten und sind deshalb auch nicht flächendeckend erfasst in der KUBA Datenbank. Die KUBA Datenbank ist damit nutzbar für eine PV Potential Analyse, allerdings ist die Vollständigkeit der Lärmschutzwände nicht gegeben. Dafür verfügt die KUBA Datenbank über die Möglichkeit, den Zustand (Inspektionsberichte) der Bauten zu erfassen, was im Rahmen der Kombination mit möglichen PV Massnahmen im Sinne der erweiterten Kriterien nützlich sein kann. Es ist aber nicht vorgesehen alle Lärmschutzwände in der KUBA Datenbank aufzunehmen. Damit ist auch eine Beurteilung des PV Potentials für alle LSW nicht möglich.

3.2.3 MISTRA LBK Sofortlösung

Die MISTRA Lärmbelastungskataster LBK Sofortlösung ist eine Datenbank, welche zur strukturierten Erfassung von Daten für die Strassenlärmsanierung genutzt wird. In der Datenbank werden verschiedenste Parameter für Lärmsanierungsmassnahmen erfasst und verwaltet. In der Ablegerdatenbank besteht die Möglichkeit, die Daten zu bearbeiten, diese via Excel- oder Shapefile Format in Lärmberechnungsprogramme zu exportieren und die berechneten Immissionen wieder zurück zu importieren. Die ursprünglichen Daten sind in einer Back End Datenbank abgelegt.

Gemäss dem Benutzerhandbuch sind die minimal notwendigen Angaben zu den Lärmschutzwänden für eine Beurteilung zur Eignung für die Kombination mit PV wie in der Methodik beschrieben in der Datenbank vorhanden. Die LBK Sofortlösung stellt damit eine gute Grundlage für die Daten zu den Lärmschutzwänden dar und wird für die PV Potential Analyse verwendet.

Parameter LSW Daten von Mistra LBK Datenbank

In den Daten der MISTRA LBK Sofortlösung sind folgende Parameter enthalten, welche für die Beurteilung der LSW zur Kombination mit PV wichtig sind:

- Fläche LSW
- Länge LSW
- Maximale Höhe LSW
- Koordinaten LSW (Koordinaten der LSW bzw. Anfangs- und Endpunkt) im RBBS System
- Bestehende Massnahme (Bestehende LSW)
- Baujahr (Baujahr LSW)
- Zustand

3.3 Vollständigkeit der verfügbaren Daten

Die Vollständigkeit der notwendigen Angaben zu den LSW ist für die Präzision der PV Potential Analyse entscheidend. Sind die Daten noch nicht vollständig, weil die Stammdaten noch eingepflegt werden müssen, müssen Annahmen für eine Hochrechnung getroffen werden.

3.4 Umsetzung PV Potentiale

3.4.1 Allgemeines

Bei der Ermittlung des PV Potentials können, wie im Kapitel Methodik beschrieben, verschiedene Potentiale (Theoretisches Potential, Technisches Potential und erschliessbares Potential) unterschieden werden. Die Ermittlung der Potentiale erfolgt in der nachfolgend beschriebenen Reihenfolge für alle LSW.

3.4.2 Theoretisches Potential

Für die Ermittlung des theoretischen Potentials werden die technischen Einschränkungen, welche durch eingesetzte Komponenten und Erfahrungen mit existierenden PV Lärmschutz Anlagen bekannt sind, nicht berücksichtigt. So wird der Abstand der Modulunterkante vom Boden mit Null angenommen, die Modulbreite wird nicht auf ein marktübliches Format festgelegt sondern so gewählt, dass die maximale Fläche PV pro Laufmeter LSW erreichbar ist. Rahmenbedingungen wie zum Beispiel die maximale Breite der PV Konstruktion bleiben bestehen. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird eine Minimallänge des LSW Abschnittes für die PV Anlage. Es werden alle Abschnitte berücksichtigt.

3.4.3 Technisches Potential

Für die Ermittlung des technischen Potentials werden für Parameter wie die Modulbreite, der minimale Abstand der Modulunterkante vom Boden Werte angenommen. Auch eine minimale Abschnittslänge der LSW wird festgelegt, damit die PV Anlage eine minimale Nennleistung erreicht, so dass die eingesetzten Komponenten auch real auf dem Markt erhältlich sind.

3.4.4 Kurzfristiges und mittelfristiges Potential

Durch eine Priorisierung für die Umsetzung der PV Anlagen kann eine zeitliche Staffelung für das technische Potential erreicht werden. Dabei können die wirtschaftlichsten PV Anlagen anhand des Verlaufs der LSW und der Anlagengrösse sowie dem Anlagenstandort ermittelt werden. Eine zeitliche Staffelung kann auch durch die Unterscheidung zwischen Anbau der PV Anlage an eine bestehende LSW und Neubau einer LSW mit Integration einer PV Anlage entstehen, oder durch einen Wartungszyklus, welcher die möglichen Arbeiten an der LSW für eine Nutzung mit PV kombinieren lässt.

3.4.5 Erschliessbares Potential

Es werden Faktoren für nicht-technische Kriterien angenommen um das ermittelte Potential bezüglich Realisierbarkeit zu bewerten. So können Faktoren für die Akzeptanz in der Bewilligungsphase zum Beispiel hier mit berücksichtigt werden.

3.5 Minimal notwendige Parameter zu den Lärmschutzwänden

3.5.1 Verlauf und Ausrichtung der LSW RBBS-Segmente (LSW-Segmente)

Mit Hilfe des RBBS-Systems kann die Ausrichtung der LSW berechnet werden.

Beispiel:

Die untenstehende rote Linie ist folgendermassen definiert:

Strassenname: N1

Anfangspunkt: N1- 148 +105 Endpunkt N1- 152 + 30;

Anfangspunkt: N1+ 148 +105 Endpunkt N1+ 152 +30

Mit diesen Punkten ist es möglich, die Länge und die Ausrichtung der entsprechenden LSW zu ermitteln. Dazu wird mit den einzelnen Bezugspunkten, welche im Bereich eines LSW Abschnittes liegen, ein Vektor gebildet bestehend aus einer y-Komponente ($y\text{-Komponente Endpunkt} - y\text{-Komponente Anfangspunkt}$) und einer x-Komponente ($x\text{-Komponente Endpunkt} - x\text{-Komponente Anfangspunkt}$). Auf diesen kann dann ein senkrechter Vektor gebildet werden, welcher der Ausrichtung der LSW entspricht. Aus den beiden senkrechten Vektoren wird derjenige mit der kleineren Abweichung Richtung Süden ausgewählt, das heisst derjenige mit der negativen x-Komponente. Damit kann auch die Seite der LSW bestimmt werden, auf welcher die Ausrichtung besser geeignet ist (linker oder rechter Normalvektor). Im untenstehenden Beispiel kann zwischen den Bezugspunkten 148 und 150 und den Bezugspunkten 150 und 152 ein entsprechender Vektor aus den Landeskoordinaten erstellt werden.

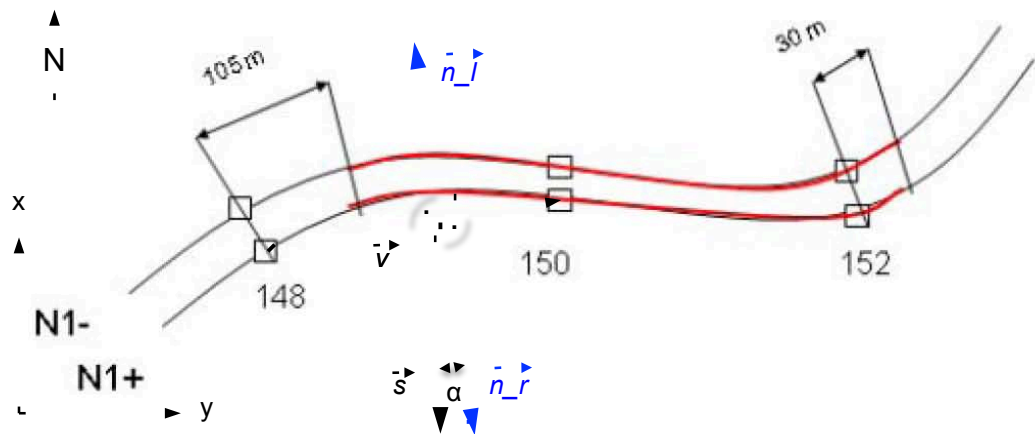


Abb. 3.1: RBBS System: Die weissen Quadrate stellen die RBBS-Punkte dar. Zu den Punkten wird jeweils der Abstand bis zum gesuchten Punkt angegeben [2].

Die Bezugspunkte 148 und 150 haben folgende Koordinaten:

148 (583 293/201 054); 150 (587 205/201 353)

Für den Startpunkt 148 und den Endpunkt 150 ergibt sich somit der Richtungsvektor \vec{v} :

$$\begin{aligned}\vec{v} &= \begin{pmatrix} y \text{ Komponente Endpunkt} - y \text{ Komponenten Startpunkt} \\ x \text{ Komponente Endpunkt} - x \text{ Komponente Startpunkt} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} y \text{ Komponente Vektor} \\ x \text{ Komponente Vektor} \end{pmatrix}\end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} y_{150} - y_{148} \\ x_{150} - x_{148} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 587205 - 583293 \\ 201353 - 201054 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3912 \\ 299 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \vec{v}$$

Damit ergeben sich die beiden Normalenvektoren links (\vec{n}_l) und rechts (\vec{n}_r) zu:

$$\vec{n}_l = \begin{pmatrix} -b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -299 \\ 3912 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{l_y} \\ n_{l_x} \end{pmatrix}$$

$$\vec{n}_r = \begin{pmatrix} b \\ -a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 299 \\ -3912 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{r_y} \\ n_{r_x} \end{pmatrix}$$

Aus den y-Werten der Normalenvektoren ist ersichtlich, dass der rechte Normalenvektor die kleinere Abweichung von der Südausrichtung hat, da er einen negativen x-Wert aufweist. Es kann für die weitere Klassifizierung der Eignung einer LSW für eine PV Anlage auch der Abweichungswinkel ab der Südausrichtung bestimmt werden.

Für einen Richtungsvektor nach Süden kann geschrieben werden:

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Der eingeschlossene Winkel zwischen dem Südvektor und dem rechten Normalenvektor berechnet sich wie folgt:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{s} \cdot \vec{n}_r}{|\vec{s}| \cdot |\vec{n}_r|} = \frac{0 \cdot 299 + (-1 \cdot -3912)}{\sqrt{0^2 + (-1)^2} \cdot \sqrt{299^2 + (-3912)^2}} = \frac{3912}{3923.4} = 0.997$$

$$\rightarrow \alpha = 4.4^\circ$$

Damit hat der Abschnitt zwischen Bezugspunkt 148 und Bezugspunkt 150 eine Abweichung von der optimalen Südausrichtung von 4.4° nach Osten (erkennbar an dem positiven y-Wert).

Mit Hilfe der Abweichung aus der idealen Ausrichtung einer LSW für die Nutzung mit PV kann die LSW für die Nutzung mit PV entweder ausgeschlossen oder bewertet werden. Eine Abweichung von bis zu 45° ab idealer Südausrichtung kann immer noch für eine gute PV Anlage genutzt werden. Die Ausrichtung der potentiellen PV Anlage an der LSW ergibt zusammen mit dem Standort und der Modulneigung zudem die Grundlagen für die Simulation des zu erwartenden Solarstrahlungsertrages.

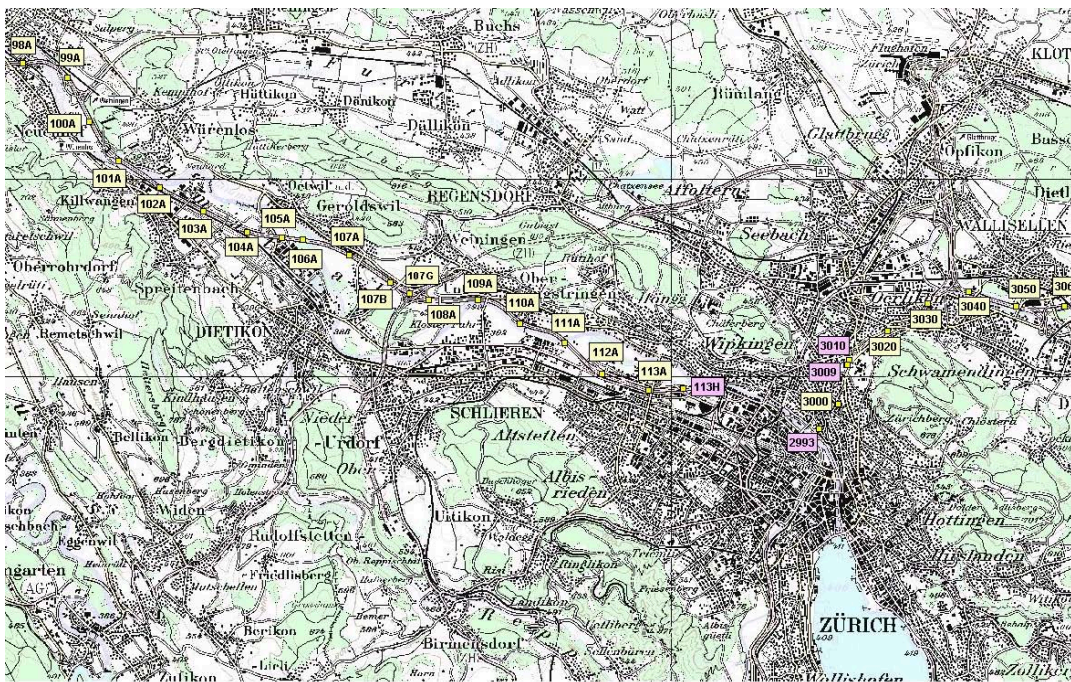


Abb. 3.2: RBBS Bezugspunkte entlang der Nationalstrasse N1 im Raum Zürich [3]

Axe	Canton	PR	Km	Coordonnées Nationales			Remarques
				Y	X	Précision [m]	
N1	ZH	112A	6	678343	250248	100	-
N1	ZH	113A	7	679246	249840	100	-
N1	ZH	113H	7.7	680'257	249'756	100	Fin segment
N1	ZH	2993		683'016	248'949	100	Début segment
N1	ZH	3000	5	683644	250402	100	-
N1	ZH	3009	4.1	683581	250238	100	Fin/Début segment
N1	ZH	3010	4	683349	249567	100	-
N1	ZH	3020	3	684401	250888	100	-
N1	ZH	3030	2	685208	251476	100	-
N1	ZH	3040	304	686116	251714	100	-
N1	ZH	3050	305	687075	251435	100	-
N1	ZH	3060	306	688059	251459	100	-
N1	ZH	3070	307	688983	251812	100	-
N1	ZH	3080	308	689734	252443	100	-
N1	ZH	3090	309	690503	253089	100	-

Abb. 3.3: : Beispiel für die Bezugspunkte aus Abb. 3.2 mit den entsprechenden Landeskoordinaten [4]

3.5.2 Höhe der LSW

Die Höhe der LSW ist ein wichtiger Parameter für die PV Potential Abschätzung, da die installierbare Nennleistung von der zur Verfügung stehenden Lärmschutzwandfläche abhängt. In der MISTRA LBK Sofortlösung ist die Maximalhöhe der LSW festgehalten. Daneben sind die Fläche und die Länge eines Abschnittes gegeben, womit sich eine durchschnittliche Höhe berechnen lässt.

3.5.3 Strassenseite der LSW und der PV Anlage

Die Strassenseite der LSW wird mit den Parametern RL-L (Linke Strassenseite) und RL-R (Rechte Strassenseite) in der MISTRA LBK erfasst. Kennt man den Verlauf bzw. die Ausrichtung der LSW und die Strassenseite der LSW, so kann bestimmt werden, ob die PV Anlage strassenzugewandt oder strassenabgewandt montiert werden soll. Je nach Ausrichtung der PV Anlage zur Strasse ergeben sich weitere Einschränkungen, wie zum Beispiel ein maximaler Abstand der Modulaussenkante zur LSW (Lichttraumprofil). Die möglichen Kombinationen sind in nachstehender Tabelle zusammengefasst.

	Lärmschutzwand auf der linken Strassenseite	Lärmschutzwand auf der rechten Strassenseite
Linker Normalenvektor ist besser ausgerichtet	PV Anlage ist strassenabgewandt	PV Anlage ist strassenzugewandt
Rechter Normalenvektor ist besser ausgerichtet	PV Anlage ist strassenzugewandt	PV Anlage ist strassenabgewandt

Abb. 3.4: Tabellarische Zusammenstellung der Kombinationen der Normalenvektoren der Ausrichtung der LSW mit dem Verlauf der LSW zur Beurteilung des Kriteriums Strassenseite einer PV Anlage

3.5.4 Schallschutzfunktion LSW

Die Schallschutzeigenschaften einer LSW dürfen nicht beeinträchtigt werden durch eine PV Anlage. Insbesondere für strassenzugewandte und damit der Lärmquelle zugewandte PV Anlagen ergeben sich Einschränkungen bei den Konstruktionsarten. So können bei schallabsorbierenden LSW keine ganzflächigen PV Anlagen mit schallreflektierender Oberfläche eingesetzt werden. Dies schliesst zum Beispiel ganzflächig parallel oder geneigt zur LSW angebrachte PV Anlagen aus. Kombinationen mit schallabsorbierenden Materialien sind nur bei Sanierungen oder Neubauten von LSW sinnvoll, ein Retrofit ist allerdings jederzeit möglich.

3.6 Annahmeset Parameter:

Um das technische Potential zu bestimmen, sind Annahmen zu typischen, marktüblichen Komponenten für ein PV System zu treffen. Die in dieser Studie berücksichtigten technischen Faktoren sind nachfolgend aufgelistet und beschrieben:

- Freier Abstand vom Boden bis Solarmodul Unterkante
- Horizontaler Abstand von LSW bis Modulrand
- Neigung der Solarmodule
- Modulbreite
- Gesamte zulässige Breite Aufgesetzt

3.6.1 Freier Abstand vom Boden bis Solarmodul Unterkante

Der freie Abstand vom Boden bis zur Modulunterkante hat sich in der Praxis als entscheidend für den notwendigen Unterhalt einer PV Anlage für einen optimalen Betrieb erwiesen. Werden die PV Module zu nah am Boden installiert, kann es zu Verschattungen oder gar Beschädigungen durch Pflanzenwuchs kommen. Dies führt zu einem stark reduzierten Ertrag der PV Anlage und muss entweder mit regelmässiger Wartung oder einem entsprechenden Abstand der Modulunterkante ab Boden reduziert werden. Der

Abstand der Modulunterkante bis Boden kann auch für eine Absicherung gegen Vandalismus genutzt werden, in dem die Module so hoch installiert werden, dass sie nicht mehr ohne Hilfsmittel zugänglich sind. Es können auch sicherheitstechnische Überlegungen angestellt werden, indem die Module für eine strassenzugewandte Montage höher als ein Fahrzeug angesetzt werden. Damit ergibt sich für den Parameter Freier Abstand eine Bandbreite von 0...4m.

3.6.2 Horizontaler Abstand von LSW bis Modulrand (Lichtraumprofil)

Eine PV Anlage darf das Lichtraumprofil der Strasse aus Sicherheitsgründen nicht beeinträchtigen. In Abb. 3.5 ist das Lichtraumprofil erläutert. Schematisch eingezeichnet sind beidseitig der Autobahn eine LSW (grün dargestellt) mit einer beispielhaft aufgezeigten PV Anlage (blau dargestellt). Da der Abstand der LSW vom Lichtraumprofil nicht für alle LSW bekannt ist, wurde ein Parameter eingeführt, welcher die maximale vertikale Distanz des PV Moduls von der LSW angibt. Der Wertebereich kann nicht einheitlich basierend auf bestehenden Normen festgelegt werden, liegt aber in einem Bereich von 0.5...2m.

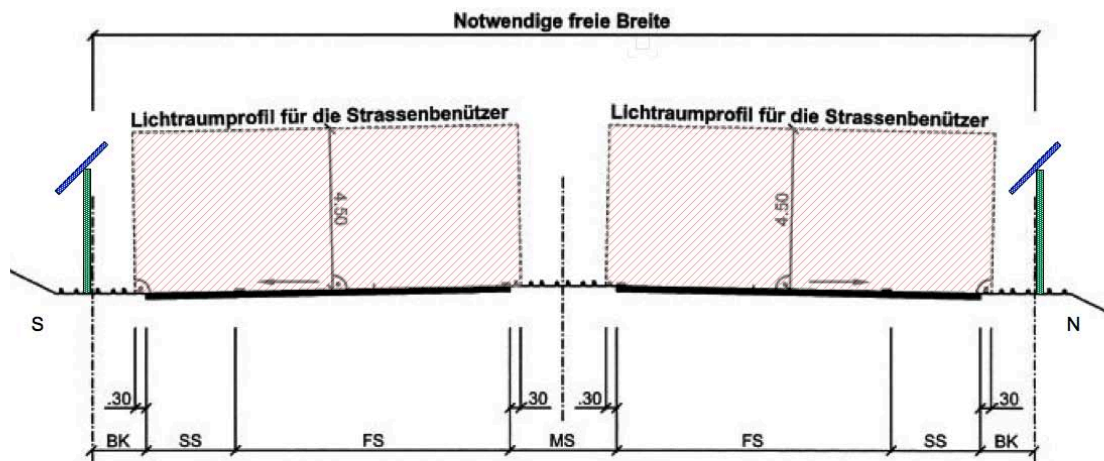


Abb. 3.5: Lichtraumprofil einer Strasse mit schematischer Darstellung von beidseitigen LSW mit einer möglichen PV Anlage.

3.6.3 Neigung der Solarmodule

Die Modulneigung hat einen direkten Einfluss auf den elektrischen Ertrag, da sie das nutzbare Solarstrahlungsangebot beeinflusst. Je nach geographischer Lage und Ausrichtung der PV Module ist eine andere Modulneigung für einen maximalen Ertrag notwendig. Im Flachland beträgt der Neigungswinkel ab der Horizontalen ca. 30°, in den alpinen Regionen ist der Neigungswinkel bei ca. 45° ideal für einen maximalen Jahresertrag. Gleichzeitig beeinflusst der Neigungswinkel der PV Module die Konstruktionsart einer PV Anlage. Bei einem kleineren Winkel ab Horizontal ragt ein Modul weiter von der LSW ab. Damit wird auch der vertikale Abstand zur LSW für strassenzugewandte PV Anlagen beeinflusst (siehe oben) und das Lichtraumprofil wird schneller tangiert. Werden mehrere Modulreihen übereinander installiert wie in Abb. 3.6 dargestellt, führt ein kleinerer Neigungswinkel zu einer grösseren Verschattung der darunterliegenden Modulreihe. Dies muss in der Konstruktion der PV Anlagen entsprechend mit einem grösseren Abstand der Modulreihen untereinander und damit einer kleineren möglichen installierbaren Nennleistung berücksichtigt werden für eine optimale PV Anlage. Eine grosse Nennleistung der PV Anlage bringt aber vor allem auch ökonomische Vorteile. Schlussendlich führt eine steilere Modulneigung auch zu einem erhöhten Winteranteil an der Stromproduktion einer PV Anlage. Diese unterschiedlichen Anforderungen müssen gegeneinander abgewogen werden für ein einzelnes Projekt. Für die Potentialstudie sind Modulneigungswinkel zwischen 0°...90° denkbar.



Abb. 3.6: Photovoltaikanlage an einer LSW an der A96 am Ammersee in Deutschland realisiert mit dem Anlagentyp Schindeln

Bifaciale Anlagen

Bifaciale Module haben eine Neigung von 90° , stehen also vertikal. Dies ist notwendig um die Solarstrahlung von der Ostseite und der Westseite gleichwertig zu nutzen. Der Neigungswinkel stellt damit für bifaciale PV Anlagen kein änderbarer Parameter dar.



Abb. 3.7: Beispiel einer bifacialen PV Anlage entlang der N1 in Aubugg Kanton Zürich. Die strassenzugewandte Seite entspricht der Westseite.

3.6.4 Modulbreite

Für das technische Potential wird eine Modulbreite angenommen. Dies entspricht einem mittleren Wert marktüblicher PV Module. Mit Festlegung der Modulbreite soll verhindert werden, dass „halbe“ Module in der Abschätzung des technischen Potentials mit berücksichtigt werden. Grundsätzlich kann ein Modul auch im Hochformat oder im Querformat installiert werden. Für das theoretische Potential hingegen gibt es keine Einschränkung bezüglich Modulbreite, hier bestehen die Einschränkungen einzig durch die Masse der Lärmschutzwände. Marktübliche Module weisen eine Breite von 0.8...1.8m auf.

Bifaciale Module

Die bifacialen Module werden auf die LSW aufgesetzt. Eine Modulbreite ist hier durch die Tragkonstruktion gegeben. Allerdings ist die Höhe begrenzt durch statische und ästhetische Einschränkungen. Der mögliche Wertebereich liegt hier zwischen 0.5...2m.

Sowohl für konventionelle als auch für bifaciale Module können natürlich auch projektspezifische bei Bedarf Spezialanfertigungen für Module entwickelt und hergestellt werden.

3.6.5 Gesamte zulässige Breite Aufgesetzt

Die Gesamtbreite der Modulkonstruktion sollte einen Maximalwert nicht überschreiten, da ansonsten überproportional stark dimensionierte Träger notwendig werden, um die Unterkonstruktion für die PV Module statisch stabil zu machen. Dieser Wert steht für strassenzugewandte PV Anlagen in Konkurrenz zum Wert für den maximalen horizontalen Abstand der PV Module von der Lärmschutzwand. Eine auskragende Breite von maximal 4m ist mit heutiger Befestigungstechnik denkbar.

3.7 Visualisierung der notwendigen Parameter unterschiedlicher PV Anlagentypen

Für die möglichen PV Anlagentypen sind basierend auf den im Kapitel Kategorisierung technischer Lösungen vorgestellten Anlagentypen visualisiert worden. Es sind dies der Typ Angestellt, der Typ Aufgesetzt, der Typ Schindel und bifaciale PV Anlagen. Die beiden Typen Zick-Zack und Kassetten sind aus photovoltaischer Sicht mit dem Typ Schindeln abgedeckt. Dies gilt natürlich nicht für die konstruktiven und schallschutztechnischen Eigenschaften. Die angenommenen Parameter für strassenzugewandte respektive strassenabgewandte PV Anlagen unterscheiden sich vor allem durch die Anforderungen an die Einhaltung des Lichtraumprofils. Nachfolgend sind die 4 verwendeten PV Anlagentypen für eine Montage an eine bestehende Lärmschutzwand mit den entsprechenden Parametern schematisch dargestellt.

3.7.1 Strassenzugewandte PV-Anlagentypen

PV Anlagentyp Angestellt

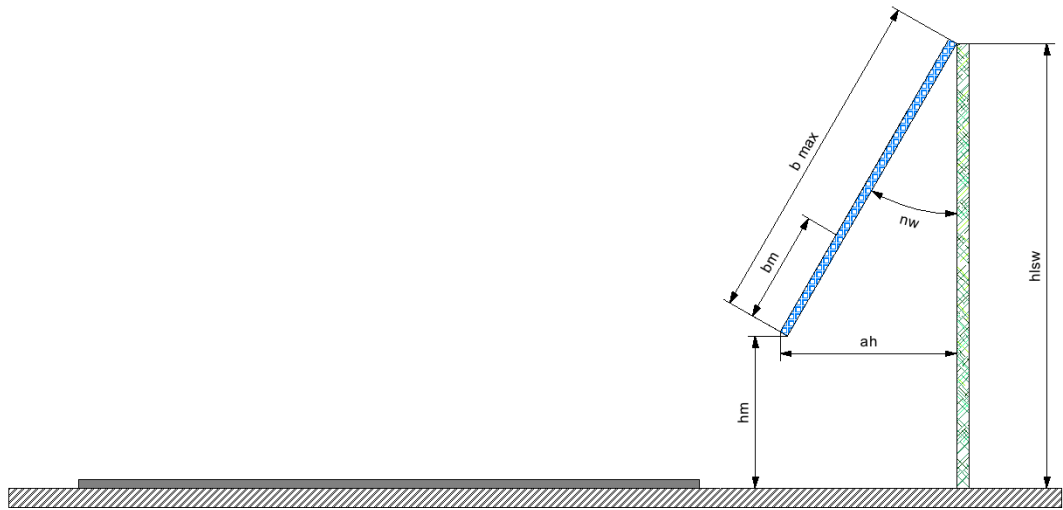


Abb. 3.8: PV-Anlagentyp Angestellt mit den entsprechenden Parametern für eine strassenzugewandte PV Anlage

Beim Anlagentyp Angestellt werden die Parameter Höhe Boden bis Modul= hm , maximale Breite= $b \max$, Modulbreite= mb , Neigungswinkel= nw und der Abstand LSW zum Modul angenommen. Die LSW Höhe= $hlsw$ ist ein vorgegebener Parameter. Der horizontale Abstand der Module zur Schallschutzwand wird mit ah bezeichnet.

PV Anlagentyp Aufgesetzt

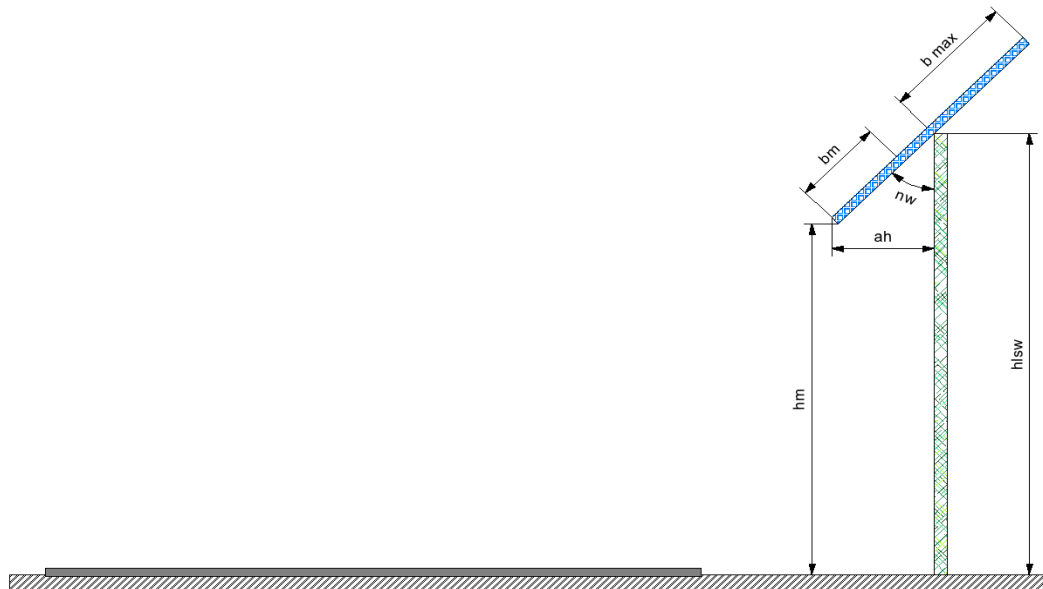


Abb. 3.9: PV-Anlagentyp Aufgesetzt mit den entsprechenden Parametern für eine strassenzugewandte PV Anlage

Beim Anlagentyp Aufgesetzt werden die Parameter Höhe Boden bis Modul= hm , maximale Breite= $b \max$, Modulbreite= mb , Neigungswinkel= nw und der Abstand LSW zum Modul angenommen. Die LSW-Höhe= $hlsw$ ist ein vorgegebener Parameter.

PV Anlagentyp Schindeln

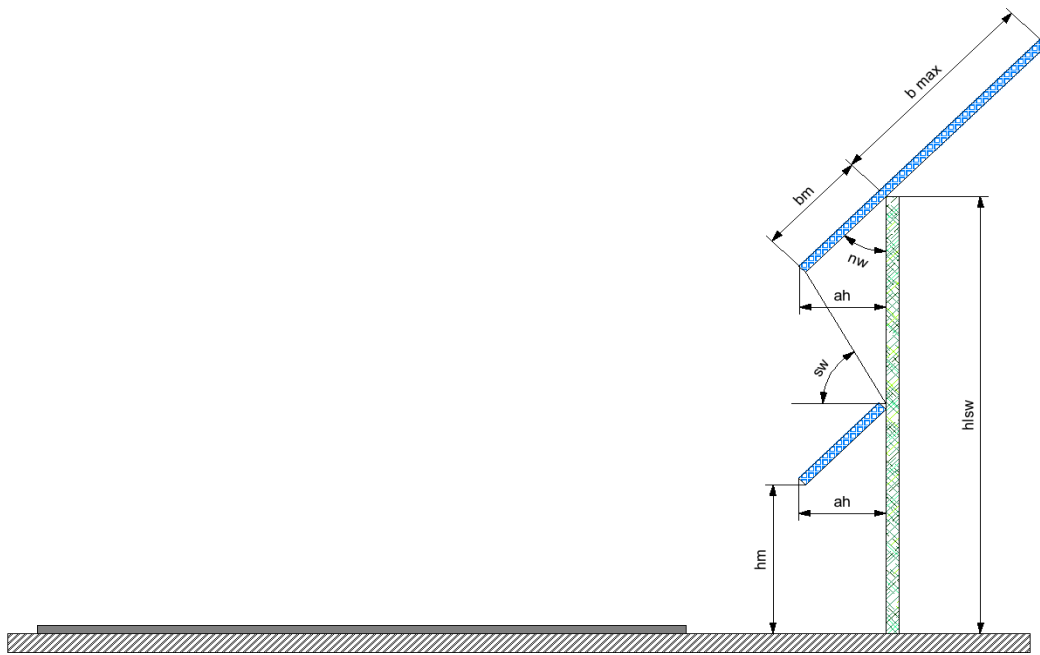


Abb. 3.10: PV-Anlagentyp Schindeln mit den entsprechenden Parametern für eine strassenzugewandte PV Anlage

Beim Anlagentyp Schindeln werden die Parameter Höhe Boden bis Modul= h_m , Maximale Breite= b_{max} , Modulbreite= m_b , Neigungswinkel= n_w Abstand LSW zu Modul und der Sonnenstandswinkel= s_w angenommen. Der Sonnenstandswinkel bezeichnet die Elevation des maximalen Sonnenstandes. Er ist wichtig um eine gegenseitige Verschattung der Modulreihen untereinander zu verhindern. Die LSW-Höhe= h_{lsw} ist ein vorgegebener Parameter.

3.7.2 Strassenabgewandte PV-Anlagentypen

PV Anlagentyp Angestellt

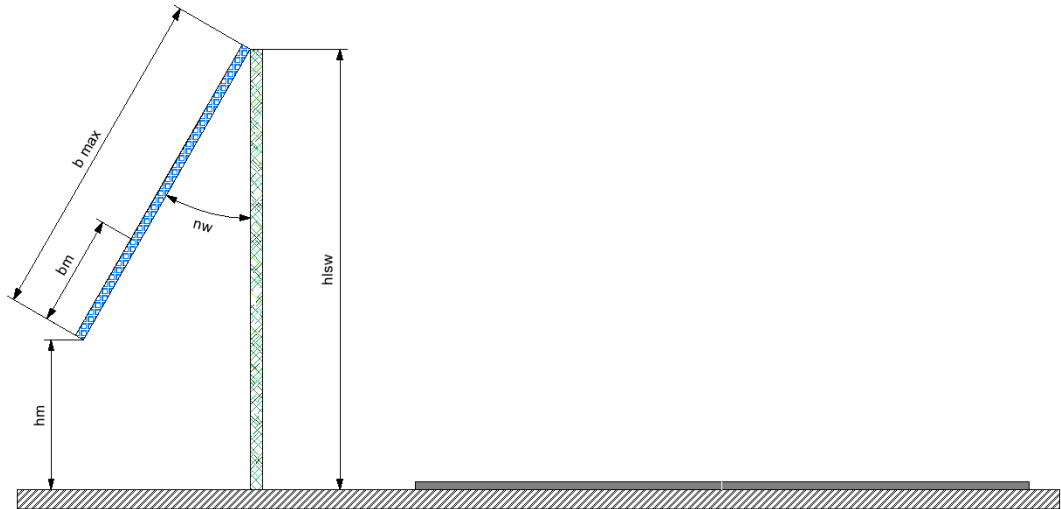


Abb. 3.11: PV-Anlagentyp Angestellt mit den entsprechenden Parametern für eine strassenabgewandte PV Anlage

Beim Anlagentyp Angestellt werden die Parameter Höhe Boden bis Modul= h_m , Maximale Breite= b_{max} , Modulbreite= b_m und Neigungswinkel= n_w angenommen. Der Abstand Modul bis LSW ist für die strassenabgewandten PV Anlagen nicht berücksichtigt. Die LSW Höhe= h_{lsw} ist ein vorgegebener Parameter.

PV Anlagentyp Aufgesetzt

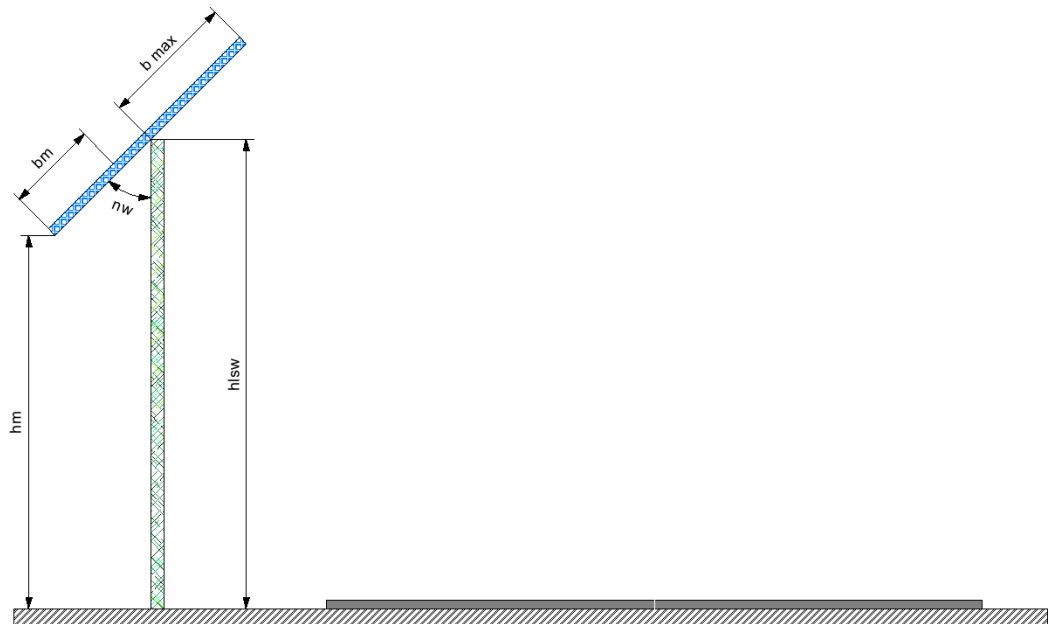


Abb. 3.12: PV-Anlagentyp Aufgesetzt mit den entsprechenden Parametern für eine strassenabgewandte PV Anlage

Beim Anlagentyp Aufgesetzt werden die Parameter Höhe Boden bis Modul= h_m , Maximale Breite= b_{max} , Modulbreite= b_m und Neigungswinkel= n_w angenommen. Die LSW-Höhe= h_{lsw} ist ein vorgegebener Parameter.

PV Anlagentyp Schindeln

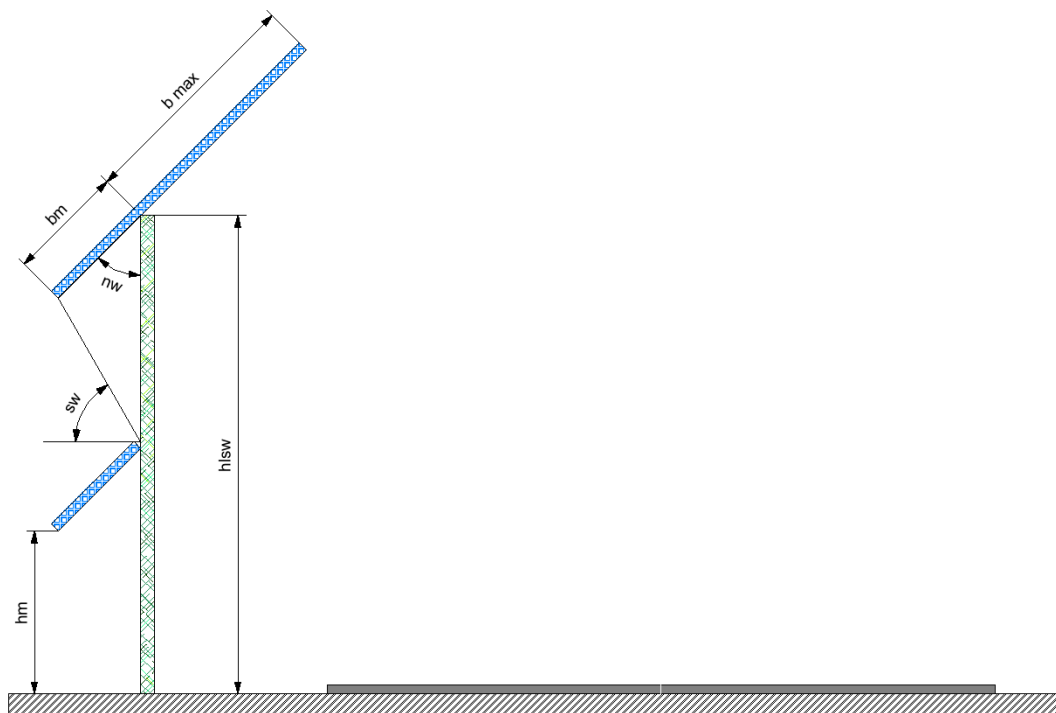


Abb. 3.13: PV-Anlagentyp Schindeln mit den entsprechenden Parametern für eine strassenabgewandte PV Anlage

Beim Anlagentyp Schindeln werden die Parameter Höhe Boden bis Modul= h_m , Maximale Breite= b_{max} , Modulbreite= mb , Neigungswinkel= nw und der Sonnenstandswinkel= sw angenommen. Die LSW-Höhe= h_{ls} ist ein vorgegebener Parameter.

3.7.3 Anlagentyp Bifacial

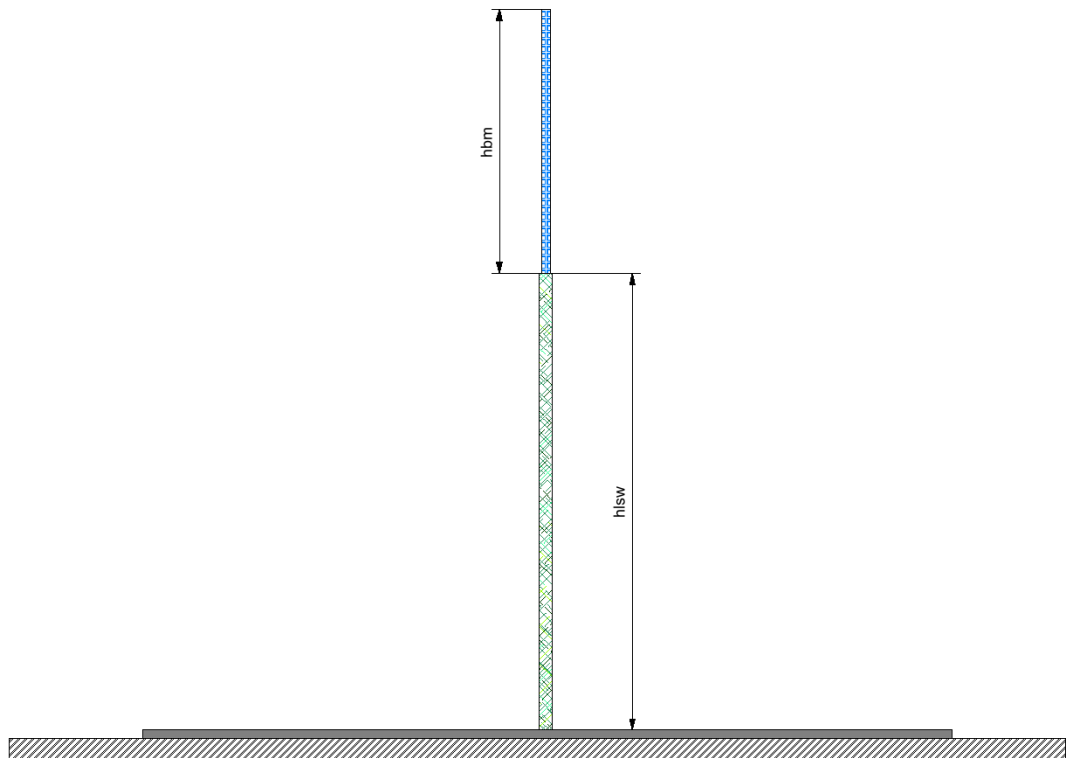


Abb. 3.14: PV-Anlagentyp Bifacial mit den entsprechenden Parametern für die Potentialabschätzung

Die LSW Höhe der Lärmschutzwand = h_{ls} ist ein vorgegebener Parameter. Beim Installationstyp Bifacial (Abb. 3.14) wird der Parameter Höhe Modul = h_{bm} angenommen. Er bestimmt die potentielle PV Fläche pro Laufmeter Lärmschutzwand. Der Neigungswinkel von bifacialen PV Modulen ist immer 90° , da beide Seiten möglichst gleichmässig der Sonnenstrahlung im Osten (Morgen) respektive Westen (Abend) ausgesetzt sein sollten.

Bifaciale PV Module bestehen immer beidseitig aus Glas, um optische Transmission zu ermöglichen. Bifaciale PV Anlagen können entweder auf eine bestehende LSW aufgesetzt werden oder bei transparenten Lärmschutzwänden die konventionellen, transparenten Schallschutzelemente substituieren.

3.8 Erweiterte Kriterien und nicht-technische Parameter für die Beurteilung von LSW

3.8.1 Allgemeines

Nebst den technischen Parametern gibt es nicht-technische Faktoren, welche für eine Beurteilung des erschliessbaren Potentials eine Rolle spielen. Da diese aber nicht systematisch erfasst werden, respektive mit der Zeit aufgrund der Umstände auch ändern können, müssen für die Berücksichtigung in der Potentialschätzung Annahmen getroffen werden. Diese basieren hauptsächlich auch Erfahrungswerten von bestehenden PV Anlagen an Schallschutzwänden.

3.8.2 Landschafts- und Ortsbildschutz und Akzeptanz

Eine PV Anlage stellt immer eine technische Installation dar, welche als störend empfunden werden kann. Allerdings sind auch Lärmschutzmassnahmen technische Installationen, welche teilweise aufgrund einer Begründung aber nicht mehr als solche wahrgenommen werden. Die Akzeptanz einer PV Schallschutzanlage bei Einspracheberechtigten ist aber auch von einer guten Informationsstrategie in der Planungsphase abhängig. Vorbehalte können aus Angst vor störenden Reflektionen von Sonnenlicht bis zum Einfluss elektro-magnetischer Strahlung entstehen. Die meisten dieser Faktoren können aber durch sorgfältige Planung und Information und eine gute Standortwahl der Komponenten positiv beeinflusst werden. Die Akzeptanz einer PV Anlage ist aber auch vom Stellenwert der Energiegewinnung in der Gesellschaft abhängig. Dieser ist schwierig zu beurteilen.

Für die Abschätzung des realisierbaren Potentials wird ein Akzeptanzfaktor eingeführt. Dieser kann basierend auf Erfahrungswerten zwischen 95%...60% liegen. Das bedeutet, dass vom technischen Potential 5%...40% der Projekte durch Einsprachen nicht realisiert werden können oder so lange verzögert werden, dass die Synergien der Doppelnutzung einer Lärmschutzwand nicht mehr genutzt werden können.

3.8.3 Fauna und Flora

Es gibt Bereiche, bei welchen auch in der Umgebung von Lärmschutzmassnahmen sensible Konstellationen betreffend Fauna und Flora existieren. Insbesondere bei Lärmschutzdämmen kann dies der Fall sein. Durch geeignete konstruktive Massnahmen kann aber meistens eine Lösung gefunden werden, dass die gestellten Anforderungen erfüllt werden können. Da gleichzeitig die Anzahl solcher Bereiche relativ gering ist, wird der Bereich für diesen Faktor mit 100%...90% geschätzt.

3.8.4 Minimale Anlagengrösse

Die Minimallänge einer LSW mit gleicher Ausrichtung, welche für eine PV Anlage kombiniert werden soll, kann einerseits aus technischer Sicht festgelegt werden, um die eingesetzten Komponenten so zu dimensionieren, dass diese heute marktüblichen Produkten entsprechen. Auch die Ökonomie spielt eine Rolle, da die Komponenten einer grösseren PV Anlage zu günstigeren Bedingungen eingekauft werden können und die PV fremden Anteile an den Arbeiten weniger ins Gewicht fallen. Insbesondere Planungs- und Einrichtungsarbeiten sowie Infrastrukturarbeiten nehmen nicht proportional mit der Anlagengrösse zu. In diesem Sinne gibt die zusammenhängende Länge der LSW mit PV auch eine Priorisierung der zeitlichen Umsetzung vor. Der Einfluss auf das Gesamtpotential ist aber relativ gering und wird in einem Bereich von 0%...20% der möglichen PV Anlagen liegen, welche nicht realisiert werden können.

3.8.5 Material LSW und konstruktive Einschränkungen

Lärmschutzwände können aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Für unterschiedliche Materialien eignen sich unterschiedliche Arten der Montage der PV Anlage. Die Anzahl der LSW mit Materialien, welche für eine Montage einer PV Anlage mit den heute üblichen Systemen ungeeignet sind, können in einem separaten Faktor berücksichtigt werden, welcher das Verhältnis dieser ungeeigneten Materialien zu der gesamten Anzahl LSW wiedergibt. Dies kann direkt mit der mechanischen Konstruktion zusammenhängen aber auch mit akustischen Eigenschaften. Mit fortschreitender Entwicklung von PV Lärm-

schutzanlagen wird sich aber auch die Anzahl nicht nutzbarer LSW weiter reduzieren durch das Angebot von neuen Komponenten. Der Anteil an Lärmschutzkonstruktionen, welche nicht für eine PV Anlage genutzt werden können, liegt hier zwischen 0%...10%.

3.8.6 Elektrische Einspeisung

Ein weiterer Faktor bezieht sich auf den Anteil der potentiellen PV Schallschutzanlagen mit einem geeigneten Einspeisepunkt in geographischer Nähe bzw. mit ausreichender Dimensionierung der Anbindung ans elektrische Verbundnetz, so dass keine oder wenig Netzverstärkungen notwendig sind. Entlang der Schweizer Nationalstrassen kann angenommen werden, dass eine elektrische Infrastruktur grösstenteils vorhanden ist (Signalisation, Beleuchtung, etc). Ausserdem werden Schallschutzmassnahmen grundsätzlich in Siedlungsnähe realisiert, wo das elektrische Versorgungsnetz ausgeprägt ist. Für die Einspeisung einer PV-Anlage muss die Anbindung ans elektrische Verbundnetz ausreichend dimensioniert sein um die maximale zu jedem Zeitpunkt produzierbare PV Leistung aufnehmen zu können. Die genaue Situation muss aber projektspezifisch vor Ort abgeklärt werden, auch was Leitungsführungen angeht. Insgesamt wird eine Reduktion des realisierbaren Potentials im Bereich von 0%...5% erwartet.

3.8.7 Lokale Umgebung und Horizont

Die direkte Umgebung der Lärmschutzmassnahme hat insbesondere auf die Verschattung und damit den Ertrag der PV Anlage einen grossen Einfluss. Es muss unterschieden werden zwischen Hindernissen, welche die Realisierung einer PV Anlage verunmöglichen und solchen, welche einen Minderertrag durch Verschattung zur Folge haben. Insbesondere bei PV Anlagen auf der strassenabgewandten Seite kommt es im urbanen Bereich häufig vor, dass die Lärmschutzmassnahmen sehr nah an Gebäuden liegen. Dies schränkt die Möglichkeiten zur Installation einer PV Anlage deutlich ein. Häufig gibt es auch eine Bepflanzung auf der strassenabgewandten Seite, was zu starken Beschattungen und/oder erhöhtem Unterhalt führen kann. Auf der strassenzugewandten Seite sind sicherlich keine Hindernisse vorhanden und für bifaciale Anlagen ist die Wahrscheinlichkeit einer direkten Verschattung ebenfalls geringer. Der Anteil an nicht nutzbaren Lärmschutzwänden soll deshalb nach Ausrichtung unterschieden werden. Es kann ein Anteil von nicht nutzbaren Lärmschutzwänden von 5%...50% angenommen werden für das realisierbare Potential.

3.9 Zusammenfassung Umsetzung Bewertung LSW zur Eig-nung PV Nutzung

Die Ausgangslage betreffend vorhandener Daten zu den Lärmschutzmassnahmen wurde untersucht, insbesondere der MISTRA LBK Sofortlösung. Für die unterschiedlichen Anlagentypen wurden die für die Anwendung der Methodik notwendigen Parameter, Parametersets für technische Parameter und eine Auswahl an nicht-technischen Parametern ermittelt und beschrieben. Alle diese Parameter wurden für die unterschiedlichen Potentiale theoretisch, technisch und realisierbar diskutiert. Für die einzelnen Parameter sind Wertebereiche ermittelt worden.

4 Technische Umsetzung

Für die Berechnung des Photovoltaik-Potentials auf Lärmschutzanlagen wurde die Datenbank-Software FILEMAKER des gleichnamigen Herstellers verwendet. Mit der Software ist es möglich, die Daten aus der MISTRA-LBK Datenbank einzulesen und weiterzuverarbeiten. Es wurde eine Software erarbeitet, mit der verschiedene Konfigurationen an Parameter-Sets erstellt werden können. Für jede Konfiguration erfolgt eine Berechnung des PV-Potentials für jedes einzelne Segment einer LSW. Die Ergebnisse der Berechnungen können detailliert in Form von Listen oder zusammengefasst in Form einer Übersicht nach frei definierbaren Kriterien dargestellt werden. Weiter besteht die Möglichkeit Informationen zu einzelnen LSW in einer Übersicht inklusive einer Kartendarstellung zu erhalten.

Nationalstrasse	LSW Liste	Segment	Segment: Konfig	Konfiguration	Reload	First	Prev	Next	Last	Auswertung	akt. LSW Segmente Definieren	Info	WS Diagramm
-----------------	-----------	---------	-----------------	---------------	--------	-------	------	------	------	------------	------------------------------	------	-------------

Projekt: N1/5 Aarau-West-Lenzburg
Massnahme: LSW bestehend Rhythmi
JK LSW: LSW000023
 ShowLayers: false true
 Länge Meter: 15
 Baujahr: 2009
 Zustand: 1
 Fläche: 1040
 Länge: 442
 Länge (Koordinaten): 436
 Baukosten/Segment: 1450000
 RBBSklasse: N1+
 LSW RBBSklasse: N1
 Strassenbreite: 1
 Vorpunkt: 75A 548 A 75
 Rückpunkt: 75A 585 A 75
 Letzter Punkt: N1-75A 76
 Material: Holz
 Bemerkung: Baujahr = letzte Erneuerung oder Erweiterung
 View: 06/01/2012
 von: 1 RB50001597 RB50001597
 bis: 1 RB50001597 RB50001597
 Anzahl Segmente: 1 Meter: RB50001598
 Bemerkung THG
 LSW_Polykriter: 47.358823
 LSW_Vertraue: 47.3592419
 LSW_Polygone: 47.3596621
 LSW_CenterE: 47.3599999
 LSW_CenterE: 8.09483747
 LSW_CenterE_Ha: 47.359552
 LSW_CenterE_Ha: 8.091395
 LSW_HTP: 77.3431891
 LSW_HTM_L: -1.0103001
 LSW_CenterE_p: 141562012 08:17:25
 W: Gmellinger: Gmellinger

Konfiguration:	Start	End	Alpha Rad	Deg	Länge	kt_LSW_n	kt_LSW_n	kt_LSW_n	kt_LSW_n		
SEG0001911	N1	75A	N1	75A	-0.55	-31.39	435.79	248643.00	849348.00	248670.00	849720.00

Abb. 4.1: Screenshot FILEMAKER-Datenbanksoftware

Für eine noch flexiblere Datenanalyse können definierbare Teilmengen der Datenbank exportiert und in weitere Programme (bspw. MS EXCEL) eingelesen werden.

Für die Umsetzung der geografischen Informationen wurden verschiedene Hilfsmittel aus dem Bereich der Geoinformationssysteme genutzt. Für die Visualisierung wurde das frei zugängliche Google Earth verwendet.

4.1 Repräsentativität der Daten

Das für diese Studie verwendete Datenmaterial aus der MISTRA-LBK Datenbank (Datenbankauszug März 2012) enthält 1'299 Datensätze. Jeder einzelne Datensatz enthält Informationen zu einem Lärmschutzbauwerk (genannt Massnahme). Die Massnahmen sind 109 sogenannten Projekten zugeordnet, die Nationalstrassenabschnitte darstellen. Von den 1'299 Datensätzen enthalten 236 Datensätze (29 Projekte) Geoinformationen in Form von RBBS-Daten. Die Lärmschutzbauwerke, die über RBBS-Daten verfügen, sind in Form von Segmenten geographisch beschrieben. Ein Lärmschutzbauwerk kann durch ein oder mehrere Segmente beschrieben sein.

Insgesamt sind die vollständigen 236 Massnahmen durch 325 Segmente definiert. Jedes Segment ist durch zwei RBBS-Punkte mit Angaben zu Anfang und Ende des Bauwerks beschrieben. Diese geografischen Angaben gehören zu den zwingenden Parametern für eine Beurteilung mit der vorgestellten Methodik. Daher sind nur für die 236 Datensätze mit RBBS-Informationen die Ausrichtung und Länge einzelner Segmente für eine Beurteilung des Potentials von Photovoltaik auf Lärmschutzbauwerken mittels der vorgestellten Methode möglich.

Für die Hochrechnung auf das gesamte Potential von Photovoltaik in Kombination mit Lärmschutzmassnahmen aus den vollständigen 236 Datensätzen muss sichergestellt sein, dass diese Datensätze repräsentativ sind. Im Folgenden soll anhand verschiedener Kriterien eine Beurteilung erfolgen, inwiefern diese 236 bzw. 1'299 Datensätze die bestehenden und geplanten Lärmschutzbauwerke in der Schweiz repräsentieren.

4.1.1 Geographische Verteilung

Abb. 4.2 zeigt die geographische Verteilung aller 109 Lärmschutzprojekte aus der MISTRA LBK Datenbank. Gelb markiert sind Lärmschutzprojekte für die keine RBBS-Daten vorhanden sind (80 Projekte), grün markiert sind Projekte mit RBBS-Daten (29 Projekte). Lärmschutzprojekte mit vollständigen Informationen befinden sich fast ausschliesslich im mittleren und nördlichen Teil der Schweiz.

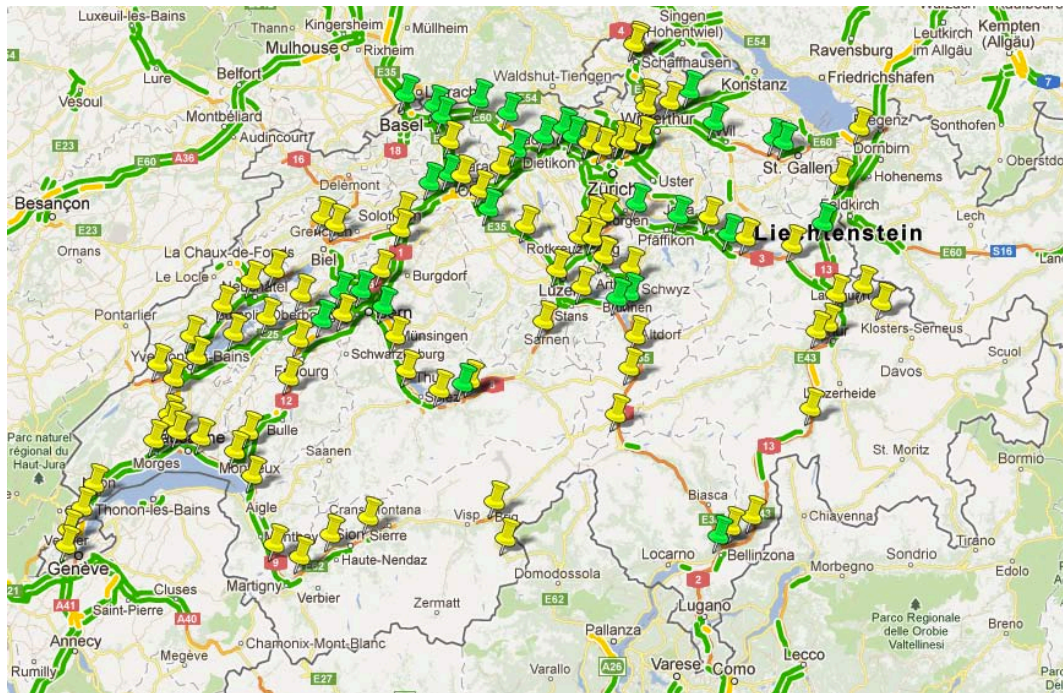


Abb. 4.2: Verteilung der 109 Lärmschutzprojekte aus der MISTRA-LBK Datenbank (Stand März 2012). Gelb: keine RBBS-Daten, grün: mit RBBS-Daten. (Quelle: TNC, google earth/maps)

Weiter ist in der Abbildung zu sehen, dass die 109 Lärmschutzprojekte das Nationalstrassennetz der Schweiz gut repräsentieren. Dieser Eindruck wird durch eine genauere Analyse der 1299 Datensätze bestätigt: Die Projekte, bezeichnet als Nationalstrassenabschnitte, welche nach einem Ort am Anfang und einem Ort am Ende des Abschnitts benannt sind, reihen sich entlang des Nationalstrassennetzes fast nahtlos aneinander. Daher kann angenommen werden, dass zumindest die erfassten 109 Lärmschutzprojekte mit ihren 1299 Datensätzen den grössten Teil der Lärmschutzmassnahmen in der Schweiz repräsentieren.

Für die Hochrechnung des Photovoltaikpotentials wird angenommen, dass sich die für Photovoltaik wichtigen charakteristischen Merkmale eines Lärmschutzbauwerkes wie Art, Länge, Höhe und Ausrichtung nicht nach Regionen unterscheiden.

Ein empirischer Vergleich mit dem Lärmkataster aus der SonBase Datenbank zeigt, dass sich die geografische Verteilung der Schallschutzmassnahmen gut mit den Lärmquellen deckt.

Tag: 06–22 Uhr (in dB(A))

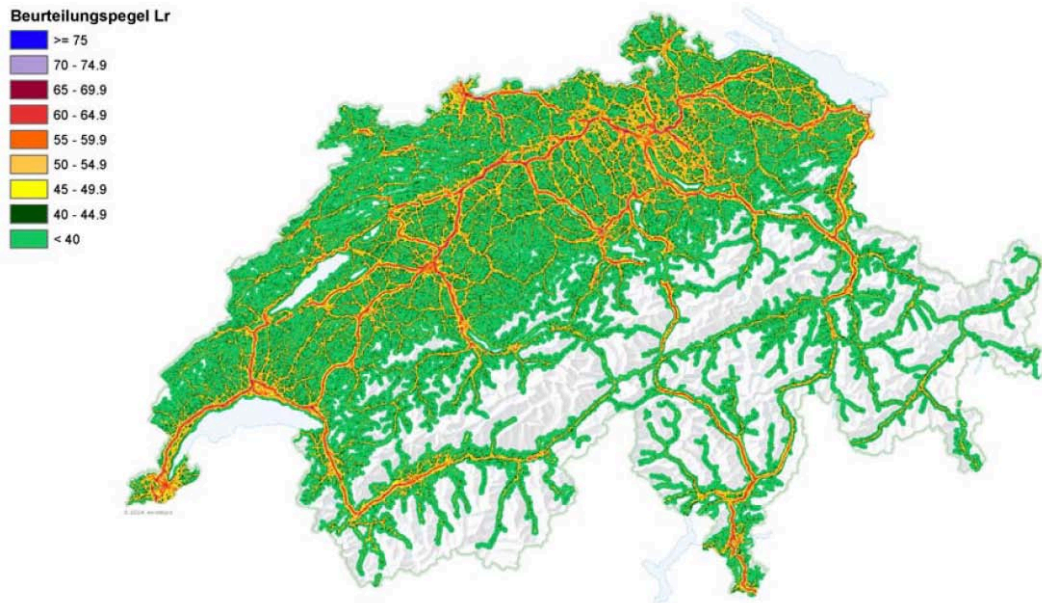


Abb. 4.3: Belastung durch den Strassenverkehrslärm in der Schweiz. Die geografische Verteilung deckt sich gut mit den Lärmschutzmassnahmen [5]

4.1.2 Hauptparameter

Die 1'064 Datensätze der 80 Lärmschutzprojekte, die über keine RBBS-Daten verfügen, stellen keine leeren Datenbankplatzhalter dar, sondern beinhalten zum Teil wertvolle Informationen, die für die Berechnung des Photovoltaikpotentials auf Lärmschutzbauwerken herangezogen und zur Überprüfung der Repräsentativität der 236 vollständigen Datensätze verwendet werden können. Einige der Datensätze enthalten sowohl Angaben zur Länge als auch der Fläche des betreffenden Lärmschutzbauwerkes, manche enthalten nur eine der beiden Informationen.

Länge

1198 der 1'299 Datensätze enthalten Angaben zur Länge der beschriebenen Lärmschutzmassnahme. Die mittlere Länge pro Massnahme beträgt 315 m. Die mittlere Länge der 236 vollständigen Datensätze liegt mit 386 m über, die 962 Datensätze ohne RBBS-Daten mit 298 m unter diesem Mittelwert. Diese Abweichung lässt sich vermutlich damit erklären, dass umfangreiche, d.h. meist auch längere Lärmschutzbauwerke besser dokumentiert, also mit RBBS-Daten versehen sind, verglichen mit besonders kleinen Massnahmen.

Fläche

Von den 1'299 Datensätzen beinhalten insgesamt 706 Informationen zur Fläche des Bauwerkes. Somit stehen für 470 Datensätze ohne RBBS-Daten Werte zu diesem Parameter zur Verfügung. Der Mittelwert der Fläche dieser Datensätze beträgt 1'348 m². Der Mittelwert für die vollständigen Datensätze weicht mit 1'333 m² nur sehr gering von diesem Wert ab. Die durchschnittliche Fläche für alle 706 Einträge beträgt 1'343 m². Die durchschnittliche Fläche als wichtiger Parameter für die Potentialbestimmung scheint in den vollständigen Datensätzen repräsentativ zu sein.

Höhe

Der für die Nutzung für Photovoltaik wichtige Parameter Höhe eines Lärmschutzbauwerkes ist selbst nicht Bestandteil der MISTRA LBK Datenbank. Er lässt sich jedoch aus den Angaben zu Länge und Fläche berechnen. Insgesamt lässt sich so die Höhe für 670 Datensätze bestimmen. Die in Abb. 4.4 angegebenen Mittelwerte für die Höhe sind sowohl bezogen auf die Anzahl der jeweils erfassten Massnahmen als auch auf die Gesamtlänge der jeweils erfassten Massnahmen berechnet. Der Mittelwert aller verwendbaren Datensätze beträgt 3.14 m (massnahmenbezogen) bzw. 3.23 m (längenbezogen). Die durchschnittliche Höhe der Datensätze mit RBBS-Daten von 3.31 / 3.45 m (massnahmen-/längenbezogen) und die durchschnittliche Höhe der unvollständigen Datensätze von 3.05 / 3.09 m (massnahmen-/längenbezogen) weichen nur wenig von diesem Mittelwert ab.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Datensätze mit Angaben zur Länge nicht identisch mit den Datensätzen mit Angaben zur Höhe der Lärmschutzbauwerke sind.

	Länge	Fläche	Höhe (Mittelwert bezogen auf Massnahmen)	Höhe (Mittelwert längenbezogen)
Mittelwert Datensätze mit RBBS-Daten	386 m	1333 m ²	3.31 m	3.45 m
Anzahl Datensätze mit RBBS-Daten	236	236	236	236
Mittelwert Datensätze ohne RBBS-Daten	298 m	1348 m ²	3.05 m	3.09 m
Anzahl Datensätze ohne RBBS-Daten	962	470	434	434
Mittelwert Datensätze gesamt	315 m	1343 m ²	3.14 m	3.23 m
Anzahl Datensätze gesamt	1198	706	670	670

Abb. 4.4: Mittelwerte für Länge, Fläche und Höhe der in der MISTRA-LBK Datenbank erfassten Lärmschutzbauwerke

4.1.3 Zusammenfassung Repräsentativität

Die Analyse der Daten zeigt zum einen, dass die für die Berechnung des Photovoltaikpotentials mit der vorgeschlagenen Methodik genutzten 236 vollständigen Datensätze in ihren Hauptparametern den Bestand an Lärmschutzmassnahmen schweizweit gut repräsentieren. Zudem kann aufgrund der geografischen Verteilung festgestellt werden, dass die 1299 Datensätze des MISTRA LBK wahrscheinlich den Grossteil der Lärmschutzmassnahmen abbilden.

4.2 Bestehende/Projektierte Massnahmen

Die Datenbankeinträge der MISTRA LBK Sofortlösung beschreiben nicht nur bestehende Lärmschutzbauwerke, sondern grundsätzlich auch solche, welche sich in Planung befinden. Sie sind in einem Datenbankfeld entsprechend gekennzeichnet. Von den 236 vollständigen Datensätzen dokumentieren 221 Einträge bestehende Lärmschutzmassnahmen und 15 geplante Massnahmen. Dies entspricht einem Anteil von 6%. Die noch nicht realisierten Massnahmen sind im Vergleich weniger präzise dokumentiert. Von den 1064 Datensätzen ohne RBBS-Daten sind 321 Massnahmen oder 30 % noch in Planung. Die vollständigen Datensätze bestehen praktisch ausschliesslich aus bestehenden Projekten. Für die Hochrechnung des PV Potentials können die geplanten Schallschutz Projekte mit berücksichtigt werden

	Bestehend		Geplant		Gesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Datensätze mit RBBS-Daten	221	94	15	6	236	100
Datensätze ohne RBBS-Daten	742	70	321	30	1063	100
Datensätze gesamt	963	74	336	26	1299	100

Abb. 4.5: Verteilung bestehender und geplanter Lärmschutzmassnahmen aus MISTRA LBK Datenbank

4.3 Verifizierung und Bearbeitung einzelner Datensätze

Von den 236 Datensätzen, die über RBBS-Informationen verfügen, wurden 23 eingehender untersucht, da sie entweder widersprüchliche oder fehlende Informationen enthielten. So fehlten bei einigen die Angabe der Längen oder der Fläche, die für die Berechnung der Höhe benötigt werden. Andere Datensätze enthielten nur einen RBBS-Koordinatenpunkt, so dass keine Längen- und Winkelberechnung möglich war. Andere Datensätze wiesen eine starke Diskrepanz zwischen der aus den RBBS-Koordinaten berechneten und der angegebenen Länge auf. Die betreffenden LSW wurden unter anderem mithilfe von *google streetview* näher untersucht und die entsprechenden Datensätze so weit möglich sinnvoll ergänzt.

4.4 Beeinflussung der Resultate durch das angewendete Modell

Abb. 4.6 verdeutlicht die Grenzen der in den Datensätzen enthaltenen Information bzw. der gewählten Methodik im Bezug auf die Genauigkeit der Potentialermittlung von PV auf LSW. Die Abbildung zeigt eine Satellitenaufnahme eines Nationalstrassenabschnitts und rot eingezeichnet die visualisierten Informationen aus den RBBS-Datensätzen zu einem Lärmschutzbauwerk. Die verwendeten RBBS-Koordinatenpunkte sind in der Abbildung als blaue Kreise eingezeichnet. Zum einen verdeutlicht die Abbildung, dass unter Verwendung von RBBS-Koordinatenpunkten pro Segmentabschnitt nur ein durchschnittlicher Ausrichtungswinkel berechnet werden kann. Bei engen Strassenradien, wie im gezeigten Beispiel, ist hier eine leichte Winkelabweichung zum realen Strassenverlauf zu beobachten. Zum anderen bedeutet ein von der direkten RBBS-Punkt zu Punkt Verbindung abweichender Strassenverlauf, dass die reale Länge der betreffenden LSW etwas höher

ausfällt als die aus den Datensätzen berechnete Länge. Für die 236 verwendeten Datensätze beträgt diese Abweichung durchschnittlich ca. 3%, (375 m zu 386 m) von berechneter zu in den Datensätzen angegebener Länge. Beide systematischen Fehlerquellen werden für die Zwecke der in dieser Studie unternommenen Potentialermittlung als akzeptabel angesehen und nicht kompensiert.



Abb. 4.6: Visualisierung der RBBS-Daten zu einer LSW (rot), im Vergleich zu einer realen Luftbildaufnahme des Strassenverlaufs (Quellen: TNC, google maps)

5 Potentiale und Einschränkungen

Basierend auf den 236 vollständigen und repräsentativen Datensätzen der MISTRA LBK wurde gemäss der vorgestellten Methode das theoretische Potential und ein kurz- und mittelfristiges technisches Potential berechnet. Diese wurden dann mit den entsprechenden Annahmen auf schweizweite Werte hochgerechnet. Für das erschliessbare Potential sind anschliessend noch die nicht-technischen Parameter mit berücksichtigt worden.

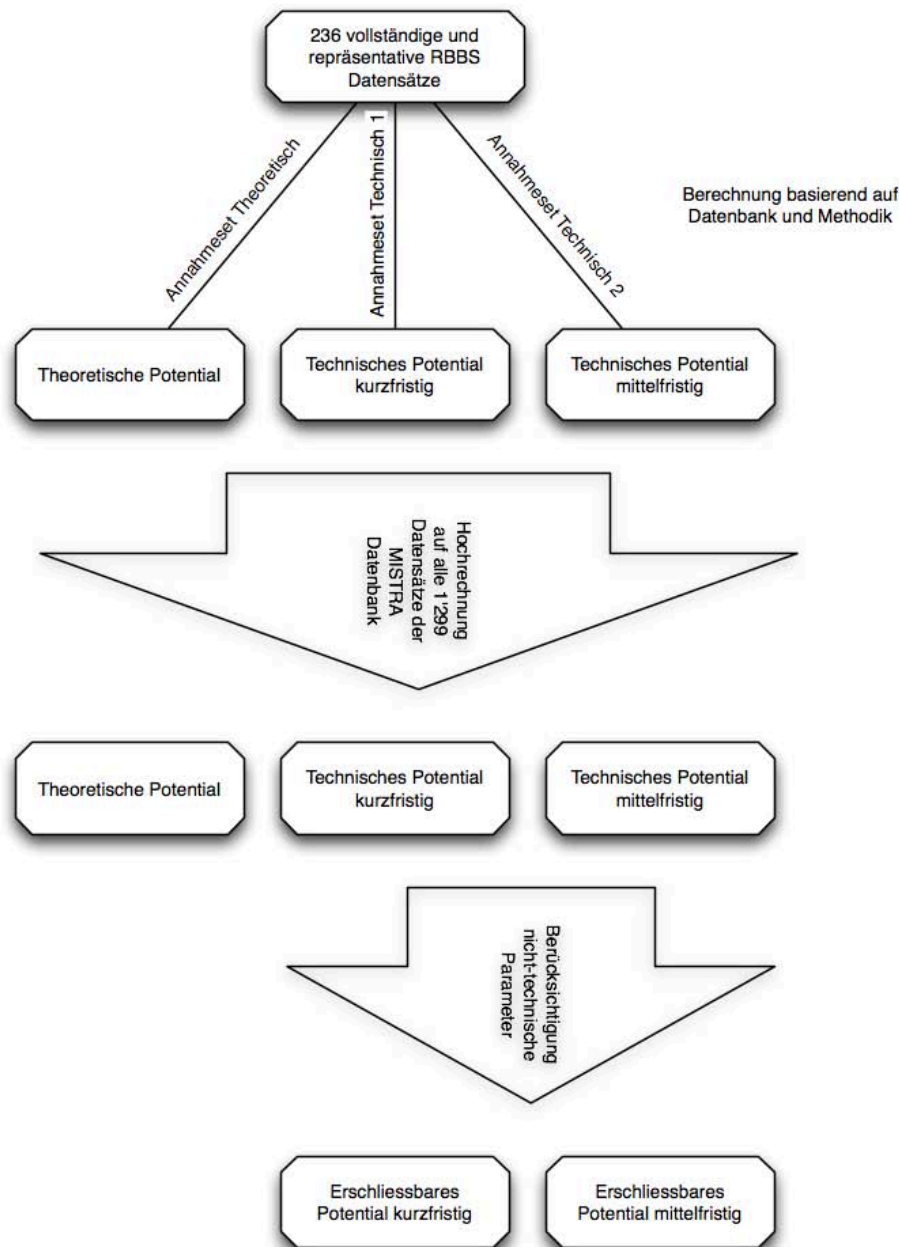


Abb 5.1: Schematische Darstellung der Ermittlung der verschiedenen Potentiale aus den Datensätzen für die Lärmschutzwände der MISTRA LBK

5.1 Annahmesets

Bei der Festlegung der Parametersets sind die im Kapitel Anwendung der Methodik beschriebenen Bandbreiten möglicher Werte analysiert worden. Es sind empirische Sensitivitätsabklärungen durchgeführt worden basierend auf der Datenbank mit den vollständigen Datensätzen.

5.1.1 Technische Parameter

Freier Abstand Modulunterkante bis Boden. Aus dem Wertebereich von 0...4m ist für das theoretische Potential ein Wert von 0m angenommen worden. Mit einer Erhöhung des Unterhaltsaufwands kann der Einfluss des Pflanzenbewuchses auf den Ertrag reduziert werden. Für das technische Potential ist ein Wert von 1.0 m angenommen worden. Dies stellt aus der Erfahrung von realisierten Projekten auf der strassenzugewandten Seite eine ausreichende Höhe dar, um über die Leitplanke zu kommen. Auf der strassenabgewandten Seiten reicht es aus, um den Wartungsaufwand zu minimieren. Ein Maximalwert, welcher auch noch Vandalensicherheit ergeben würde, würde zu einer sehr starken Einschränkung der nutzbaren Fläche führen und das PV Potential erheblich reduzieren.

Horizontaler Abstand des äusseren Modulrandes zur Lärmschutzwand. Aus dem Wertebereich von 0.5...2 m ist sowohl für das theoretische als auch die technischen Potentiale ein Wert von 1.0 m angenommen werden. Damit sollte in den meisten Fällen die Einhaltung des Lichtraumprofils gewährleistet sein.

Neigung der Solarmodule. Die Neigung der Solarmodule hat keinen erheblichen Einfluss auf die Potentiale in Bezug auf Nennleistung. Er beeinflusst aber auch den Ertrag und insbesondere den Winteranteil. Für einen standortunabhängigen optimierten Jahresertrag wurde ein Neigungswinkel von 45° angenommen. Dieser Winkel ergibt auch eine gute Ausnutzung für eine möglichst hohe PV Nennleistung.

Modulbreite. Die Modulbreite wird erst in Kombination mit dem horizontalen Abstand zur Lärmschutzwand kritisch. Für das theoretische Potential wurde im Sinn einer optimalen Ausnutzung der Rahmenbedingungen eine Modulbreite von 0.2 m angenommen. Für die technischen Potentiale wurde eine Modulbreite von 1.0 m angenommen. Dies entspricht heute marktüblichen Modulen in der Querformat Montage. Für die bifacialen Module wurde eine Breite von 1.6 m für das theoretische und 1.0 m für das technische Potential angenommen. Diese Werte entsprechen einer üblichen Anzahl von Solarzellen in einem Modul.

Gesamte zulässige Breite. Die gesamte maximal zulässige Breite der Module wurde für das theoretische Potential mit 2.5 m und für das technische Potential mit 2.0 m angenommen. Dieser Wert führt noch mit verfügbaren Konstruktionen erreicht werden, ohne dass zusätzliche mechanische Verstärkungen notwendig werden.

Modulwirkungsgrad. Der Modulwirkungsgrad heute marktüblicher Module liegt bei 16-20%. Es darf davon ausgegangen werden, dass sich dieser auch weiterhin verbessern wird. Dies hat einen direkten Einfluss auf die maximale Nennleistung und den Ertrag. Für das theoretische Potential wird ein Modulwirkungsgrad von 20% angenommen, während für das technische Potential ein Modulwirkungsgrad von 16% angenommen wird.

Sensitivität der technischen Parameter. Die empirische Sensitivitätsuntersuchung hat ergeben, dass folgende Parameter auf die mögliche Fläche an PV Modulen und damit die Nennleistung und den Ertrag einen besonders starken Einfluss haben:

- Freier Abstand Modulunterkante bis Boden (hm)
- Gesamte zulässige Breite (bmax)

Für diese beiden Werte sind eher konservative Werte angenommen worden.

	Theoretisches Potential	Technisches Potential
Freier Abstand Modulunterkante – Boden	0.0 m	1.0 m
Horizontaler Abstand Modulrand - Lärmschutzwand	1.0 m	1.0 m
Modulneigung	45°	45°
Modulbreite	0.2 m	1.0 m
Gesamte zulässige Breite	2.5 m	2.0m
Modulwirkungsgrad	20%	16%

Abb 5.2: Übersicht der angewendeten Parameter-Werte für die Berechnung des theoretischen und technischen Potentials

5.2 Hochrechnung des Potentials auf flächendeckende Resultate

Da die vollständigen Datensätze gemäss den im Kapitel Repräsentativität untersuchten Kriterien den vollständigen Datensatz gut repräsentieren wurde für die Hochrechnung ein linearer Ansatz gewählt. Die Resultate für das theoretischen und die technischen Potentiale aus den 236 vollständigen Datensätzen wurden auf den kompletten Datensatz von 1'299 hochgerechnet.

Zusätzlich wurde ein Faktor von 10% für nicht erfasste Projekte eingeführt, welcher die Anzahl von Massnahmen erhöht. Werden noch weitere geplante Projekte in Betracht gezogen, kann sich dieser Faktor noch einmal erhöhen.

5.3 Berechnung des potentiellen Stromertrags

Solarstrahlung

Um den elektrischen Stromertrag aus den potentiell für PV nutzbaren Flächen berechnen zu können, ist es notwendig, das solare Strahlungsangebot zu kennen. Dieses Strahlungsangebot ist für jeden Standort unterschiedlich. So ist die Solarstrahlung bspw. in alpinen Regionen, wie in Kapitel 2.4.1 aufgezeigt, häufig deutlich höher als im Mittelland. Um den potentiellen Stromertrag bestimmen zu können, muss demnach für jeden Standort einer LSW zunächst dieser Wert bestimmt werden. Wie allerdings in Kapitel 4.1.1 erläutert wurde, liegen in der MISTRA-LBK Datenbank nur für einen Teil der Schweizer Lärmschutzwände detaillierte RBBS-Daten zur Bestimmung der LSW-Position (und Ausrichtung) vor. Diese lokalisierbaren LSW sind nicht gleichmässig über die Schweiz verteilt, sondern befinden sich fast ausschliesslich in der Deutschschweiz bzw. im Mittelland. Es wurden Simulationen für geografisch verteilte Standorte im Mittelland durchgeführt. Für diese Region streuen die Werte der globalen Solarstrahlung nur wenig. Sie kann in einer guten Näherung für eine nach Süden ausgerichtete und 45° geneigte Fläche mit 1'250 kWh/m² angenommen werden.

Die Regionen, welche in der MISTRA-LBK Datenbank im verwendeten Datensatz noch keine geografischen Informationen vorhanden sind (Süden/Bergregionen), zeichnen sich durch ein durchschnittlich höheres Solarstrahlungsangebot aus. Für die Berechnung des elektrischen Ertrags werden in dieser Studie Werte für das Mittelland verwendet, was somit als ein konservativer Ansatz zu verstehen ist. Die Erhöhung des Solarstrahlungsangebots durch eine alpine Lage kann 20-50% betragen. Allerdings ist die Anzahl Standorte mit alpiner Lage deutlich kleiner als jene im Mittelland.

Von der Solarstrahlung zum elektrischen Stromertrag

Die Umwandlung von Sonnenenergie in elektrischen Strom ist mit Verlusten behaftet. Die am weitesten verbreiteten kristallinen Solarmodule haben derzeit einen typischen Wirkungsgrad von 15% - 20 %. Wechselrichter, welche den PV-Gleichstrom in netzkonformen Wechselstrom umwandeln, weisen mittlerweile Wirkungsgrade von 95% und mehr auf. Hinzu kommen Verluste durch Leitungswiderstände, Temperatureinflüsse, Verschattung oder Verschmutzung der Module etc..

Die Performance Ratio (PR) ist eine anerkannte Grösse in der Photovoltaik, welche das Verhältnis des tatsächlichen zum theoretisch möglichen Energieertrag bezeichnet und in welche diese Verluste einfließen. Bei sorgfältig geplanten und ausgeführten PV Anlagen können Werte von 0.8 bis 0.9 für die PR erreicht werden. Für die Berechnung des elektrischen Stromertrags wird in dieser Studie mit einer PR von 0.8 gerechnet, was zusammen mit den oben diskutierten Werten für die Sonneneinstrahlung zu einem spezifischen Stromertrag von 1'000 kWh pro installiertem kW Spitzenleistung führt. Bei Abweichungen von der idealen Ausrichtung verringert sich dieser Wert entsprechend.

5.4 Theoretisches Potential

Der Grenzwinkel definiert die Abweichung aus der idealen Ausrichtung sowohl für konventionelle PV Anlagen als auch für bifaciale Anlagen. Der Wert wird jeweils als +/- Wert zur idealen Ausrichtung bei der Auswahl der geeigneten Lärmschutzwände eingesetzt.

Für das theoretische Potential kann der gesamte Bereich möglicher Verläufe der Schallschutzwände genutzt werden. Für die Aufteilung zwischen konventionellen und bifacialen PV Anlagen wurde eine zulässige Abweichung von +/-70° für die Abweichung konventioneller PV Anlagen ab idealem Ost- Westverlauf (Südausrichtung der PV Module) gewählt. Für die bifacialen Anlagen wurde eine zulässige Abweichung von +/-20° zum idealen Nord-/Südverlauf angenommen. Gegenüber dem Idealverlauf wurde ein durchschnittlicher Stromminderertrag von 7% ermittelt und bei der Hochrechnung entsprechend berücksichtigt. Die maximale Reduktion des Solarstrahlungsangebots im Grenzbereich der zugelassenen Abweichung liegt zwischen knapp 15% und 25%.

Insgesamt ergibt sich für das theoretische Potential von Photovoltaik auf Lärmschutzanlagen eine Fläche von ca. 2.2 Mio. m² auf der Module mit einer Leistung von ca. 440 MW_p installiert werden können. Der theoretisch mögliche elektrische Stromertrag beträgt etwa 410 GWh pro Jahr.

	Fläche (m ²)	Leistung (MW _p)	Stromertrag (GWh)
Zugewandt	1'034'054	207	193
Abgewandt	1'043'265	209	194
Bifacial	141'235	28	26
Gesamt	2'218'555	444	413

Abb 5.3 : Theoretisches Potential von Photovoltaik an Lärmschutzmassnahmen. Auf 2.2 Mio m² kann eine maximale Anlagennennleistung von 440 MW installiert werden und ein elektrischer Ertrag von 410 GWh/a erreicht werden.

5.5 Technisches Potential

5.5.1 Resultate technisches Potential kurzfristig

Für das kurzfristige technische Potential, also das Potential mit nahezu idealen Voraussetzungen für Photovoltaik, wurden die Grenzwinkel relativ eng gewählt, was zu einem höheren Ertrag führt. Für konventionelle PV Anlagen wurde eine zulässige Abweichung von $\pm 45^\circ$ zum idealen Verlauf angenommen, während bei den bifacialen Anlagen eine zulässige Abweichung von $\pm 10^\circ$ angenommen wurde. Für die Grenzwerte für die zulässige Abweichung bleibt das Solarstrahlungsangebot ca. 5%-10% unter dem Solarstrahlungsangebot einer ideal nach Süden ausgerichteten Fläche. Der durchschnittliche Minderertrag des Solarstrahlungsangebots bleibt dabei bei 3 %. Der lokale Horizont kann einen deutlich grösseren Einfluss auf das Solarstrahlungsangebot und damit den Stromertrag haben, indem zum Beispiel Verschattung durch Gebäude oder Bäume in direkter Umgebung entsteht.

Für das kurzfristige technische Potential wird unter den beschriebenen Annahmen und Randbedingungen eine Gesamtfläche von ca. 1.3 Mio. m² berechnet, auf der eine PV-Leistung von ca. 210 MW_p installiert werden kann. Der potentielle jährliche Stromertrag beträgt ca. 200 GWh.

5.5.2 Resultate technisches Potential mittelfristig

Für das mittelfristige technische Potential wurden die Grenzwinkel erweitert, so dass eine grössere Abweichung aus dem idealen Verlauf möglich ist und mehr Lärmschutzwände für eine Kombination mit PV berücksichtigt werden. Für konventionelle PV Anlagen wurde die zulässige Abweichung mit $\pm 60^\circ$ angenommen. Für bifaciale Anlagen wurde eine zulässige Abweichung von $\pm 15^\circ$ angenommen. Damit bleibt ein ungenutzter Bereich von Ausrichtungen von insgesamt 30° . Dies entspricht für die Grenzwerte einer maximalen Reduktion des Solarstrahlungsangebots von knapp 10%-20% gegenüber einer ideal nach Süden ausgerichteten Fläche. Im Durchschnitt bedeuten diese Annahmen einen Minderertrag von 5%.

Für das mittelfristige technische Potential wird unter den beschriebenen Annahmen und Randbedingungen eine Gesamtfläche von ca. 1.5 Mio. m² berechnet, auf der eine PV-Leistung von ca. 240 MW_p installiert werden kann. Der potentielle jährliche Stromertrag beträgt ca. 230 GWh. Die Unterschiede zum kurzfristigen technischen Potential sind relativ gering. Die Erhöhung des zulässigen Grenzwinkels von 45° auf 60° (+25%) führt zu einer Erhöhung der nutzbaren Fläche von ca. 12%. Dies ist bedingt durch die nicht gegebene Gleichverteilung der Verläufe aller Lärmschutzmassnahmen.

	Fläche (m ²)		Leistung (MW _p)		Stromertrag (GWh)	
	kurzfristig	mittelfristig	kurzfristig	mittelfristig	kurzfristig	mittelfristig
Zugewandt	615'378	675'930	98	108	94	105
Abgewandt	660'364	764'698	106	122	100	119
Bifacial	46'076	57'604	7	9	7	9
Gesamt	1'321'817	1'498'232	211	240	201	233

Abb 5.4: Technisches Potential von Photovoltaik an Lärmschutzmassnahmen. Auf 1.3 – 1.5 Mio m² Fläche kann eine Nennleistung von 210 – 240 MW installiert werden mit einem elektrischen Jahresertrag von 200 – 230 GWh.

5.6 Nicht-technische Parameter

Die Quantifizierung der nicht-technischen Parameter kann nicht auf umfassend erfassten Werten basiert werden. Es sind deshalb verschiedene Szenarien entwickelt worden. Es wird ein als optimistisch bezeichnetes Szenario angenommen, welches von sehr guten Rahmenbedingungen und hoher Akzeptanz bei der Realisierung ausgeht. Demgegenüber steht ein als pessimistisch bezeichnetes Szenario, welches von nicht idealen Bedingungen bei der Realisierung der PV Schallschutzanlagen ausgeht.

5.6.1 Szenarien für die nicht-technischen Annahmen

Nachfolgend sind die Annahmen für unterschiedliche Szenarien erläutert. Diese Faktoren addieren sich auf und werden in Serie basierend auf den technischen Potentialen angewendet.

Lokale Umgebung und Horizont. Dieser Faktor kann zu grossen Einschränkungen der nutzbaren Bereiche führen. Für die Betrachtung in den Szenarien wurde unterschieden zwischen abgewandten Lärmschutzwänden, also solchen bei denen die PV Anlage auf die strassenabgewandte Seite zu liegen kommt und zugewandten Lärmschutzwänden. Für abgewandte PV Anlagen wurde ein Reduktionsfaktor von 0.75 für das optimistische und 0.5 für das pessimistische Szenario angenommen. Für die zugewandten Anlagen wurde ein Reduktionsfaktor von 0.9 für das optimistische und 0.75 für das pessimistische Szenario angenommen.

Material LSW und konstruktive Einschränkungen. Bei Einschränkungen, welche durch Material der LSW oder statische Anforderungen entstehen, ist voraussichtlich vor allem mit einem zeitlichen und allenfalls finanziellen Einfluss zu rechnen. Deswegen wurde für die kurzfristigen Lösungen 10% der möglichen PV Anlagen als nicht realisierbar angenommen, für die mittelfristigen Lösungen wurde dieser Faktor auf 5% reduziert, langfristig könnte er wahrscheinlich gegen 0% sinken.

Elektrische Einspeisung. Aus den erwähnten Gründen kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil an PV Anlagen an Lärmschutzmassnahmen, welche aufgrund besonders schlechter Infrastrukturvoraussetzungen nicht realisiert werden kann, sehr gering ist. Für die Schätzung des realisierbaren Potentials wurde daher eine Reduktion von lediglich 2.5% angenommen.

Minimale Anlagengrösse. Die spezifischen Investitionskosten nehmen mit sinkender Anlagengrösse zu. D.h. dass ein PV-Projekt unter einer gewissen Grösse weniger wirtschaftlich ist. Die folgende Tabelle zeigt Berechnungsergebnisse, welche mithilfe der entwickelten Filemaker-Datenbank gewonnen wurden. Berechnet wurde der Anteil der Anlagen, welche unter der Annahme einer minimalen PV-Fläche je Anlage liegen. Für die weitere Berechnung des realisierbaren Potentials wurde eine minimale PV-Fläche von 500 m² je Anlage als Bedingung angenommen. Je nach Modulwirkungsgrad entspricht dies einer minimalen Anlagenleistung von 75 – 100 kW_p. Dies entspricht in etwa einer lohnenswerten Anlagengrösse für eine PV Anlage, welche einen erhöhten Planungsbedarf aufweist. Durch die Einschränkung auf Flächen > 500 m² entfallen ca. 6% des technischen Potentials.

Minimale PV-Fläche	250 m ²	500 m ²	750 m ²	1'000 m ²
Anteil betroffene Anlagen	2 %	6 %	13 %	19 %

Abb 5.5: Verringerung des technischen Potentials durch die Bedingung einer minimalen Anlagengrösse

Landschafts-, Ortsbildschutz und Akzeptanz, sowie Fauna und Flora. Hier wird ebenfalls unterschieden zwischen möglichen PV Anlagen auf der strassenzugewandten Seite und der strassenabgewandten Seite. Dabei wird im optimistischen Szenario davon ausgegangen, dass für die zugewandten Anlagen 100% umgesetzt werden können, bei

den abgewandten Anlagen noch 90%. Für das pessimistische Szenario wurde für die zugewandten Anlagen eine Reduktion um 10% angenommen, für die abgewandten Anlagen um 30%.

5.7 Realisierbares Potential

Ausgehend vom mittelfristigen technischen Potential werden die nicht-technischen Faktoren angewendet. Dabei gibt es Faktoren, welche für alle Anlagentypen gleich gelten, wie zum Beispiel der Reduktionsfaktor für PV Anlagen, welche aufgrund von fehlender Infrastruktur für die Einspeisung wegfallen. Anschliessend werden die dem Szenario entsprechenden Faktoren für die Kategorien zugewandte und abgewandte konventionelle und bifaciale PV Anlagen auf die jeweiligen Potentiale angewendet. Damit entsteht eine Gewichtung, welche der Verteilung der Kategorien PV Anlagen entspricht. Alle Faktoren werden linear mit den Potentialen verrechnet. Daraus resultiert dann das realisierbare Potential für die verschiedenen Szenarien.

Unter den im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Annahmen des als pessimistisch bezeichneten Szenarios wird ein realisierbares Potential von PV auf Lärmschutzanlagen von ca. 0.7 Mio. m² berechnet, auf der eine Leistung von ca. 110 MW_p installiert werden kann, bei einem erwarteten Jahresstromertrag von ca. 100 GWh. Für das optimistische Szenario beläuft sich das realisierbare Potential auf ca. 1.0 Mio m², mit einer Leistung von ca. 165 MW, bei einem Jahresstromertrag von ca. 160 GWh.

Der Einfluss der nicht-technischen Parameter in den beiden gewählten Szenarien auf das realisierbare Potential im Vergleich zum mittelfristigen technischen Potential beträgt zwischen knapp über 30% bis zu 55%. Nicht berücksichtigt sind weitere Faktoren wie Herausforderungen in der Finanzierung bei Betreibergesellschaften.

	Fläche (m ²)		Leistung (MW _p)		Stromertrag (GWh)	
	<i>pessimistisch</i>	<i>optimistisch</i>	<i>pessimistisch</i>	<i>optimistisch</i>	<i>pessimistisch</i>	<i>optimistisch</i>
Zugewandt	208'081	401'300	33	64	32	61
Abgewandt	456'121	608'161	73	97	69	92
Bifacial	12'662	20'036	2	3	2	3
Gesamt	676'864	1'029'497	108	165	103	156

Abb 5.6: Realisierbares Potential von Photovoltaik an Lärmschutzmassnahmen. Abhängig vom gewählten Szenario ergeben sich auf 0.67 bis 1 Mio m² eine mögliche Anlagennennleistung von 110 bis 165 MW und ein erwarteter jährlicher Stromertrag von 100 bis knapp 160 GWh

5.8 Aussagegenauigkeit der gemachten Potentialabschätzung

Auf eine ausführliche analytische Untersuchung der Aussagegenauigkeit der berechneten Potentiale wurde im Rahmen dieser Studie aufgrund der Vielzahl und Komplexität der Parameter und der Eigenschaft des vereinfachenden Modells für die Potentialabschätzung verzichtet.

Für die technischen Parameter wurde eine empirische Sensitivitätsanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse zeigen, dass die Parameter hm (Abstand Modulunterkante zum Boden) und bmax (maximal zulässige Breite) den grössten Einfluss auf die Berechnung der Potentiale haben. Entsprechend sind für diese Parameter eher konservative Werte ange-

nommen worden. Die getroffenen Annahmen wurden mit grösstmöglicher Sorgfalt getroffen und beruhen auf Betriebserfahrungen, Marktwerten und langjährigen Erfahrungen in der Planung und Realisierung von PV-Schallschutzanlagen.

Die nicht-technischen Parameter sind mit einer grösseren Unsicherheit behaftet, da es für diese Anwendung keine wissenschaftlich erfassten Daten gibt. Diesem Umstand wurde durch die Anwendung von Szenarien mit entsprechenden Bandbreiten Rechnung getragen.

Auch die Datenbasis selbst, die Informationen aus der MISTRA-LBK Datenbank, birgt Unsicherheiten für die Potentialberechnungen. Die Vollständigkeit, die Repräsentativität und die Präzision der Daten in der MISTRA LBK Datenbank konnten im Rahmen dieser Studie nur teilweise verifiziert werden.

Insgesamt sind die Autoren der Ansicht, dass die Grössenordnung der ermittelten Potentiale von Photovoltaik an Schallschutzwänden durch die Resultate der Studie gut beschrieben wird. Aufgrund der Anzahl an getroffenen Annahmen ist aber eine Abweichung in den Resultaten basierend auf anders begründeten Annahmen gut möglich.

5.9 Zusammenfassung Potentiale

Zur Beurteilung der Möglichkeiten von Photovoltaik auf Schallschutzanlagen wurden technische und nicht-technische Parameter beschrieben und theoretische, technische und realisierbare Potentiale basierend auf diesen Annahmen berechnet. Für das theoretische Potential beträgt die so ermittelte PV-Fläche ca. 2.2 Mio m² mit einer Nennleistung von 440 MW und einem erwarteten jährlichen Stromertrag von ca. 410 GWh.

Unter Berücksichtigung einer kleineren Abweichung aus der idealen Südausrichtung und verschiedenen technischen Einschränkungen ergibt sich für das technische Potential eine nutzbare Fläche von 1.3 – 1.5 Mio. m². Auf dieser Fläche können Module mit einer elektrischen Nennleistung von 210 – 240 MW installiert und ein jährlicher Stromertrag von 200 – 230 GWh generiert werden.

Für die Berechnung des realisierbaren Potentials wurden zusätzliche, vor allem nicht-technische Faktoren berücksichtigt. Für die nutzbare PV-Fläche ergibt sich je nach angewendetem Szenario so ein Potential von 0.7 – 1.0 Mio. m² mit einer installierbaren Nennleistung von 110 – 165 MW. Damit kann Solarstrom in der Höhe von 100 – 160 GWh pro Jahr erzeugt werden.

Ende 2011 waren in der Schweiz Photovoltaikanlagen mit einer Gesamtleistung von 190/210 MW (BFE [6]/IEA [7]) installiert. Die Ergebnisse der Potentialberechnungen zeigen, dass Photovoltaik in Kombination mit Lärmschutzmassnahmen einen wichtigen Beitrag zum Ausbau des vorhandenen Photovoltaik Potentials auf bereits bestehender Infrastruktur beitragen kann.

Der Jahresbedarf 2010 für elektrische Energie für den Betrieb der Nationalstrassen betrug 145 GWh [8]. Der Grossteil wurde dabei für die Beleuchtung und die Belüftung der Tunnels eingesetzt. Der erwartete Stromertrag bei Ausschöpfung des realisierbaren Photovoltaik Potentials würde in der Jahresbilanz den gesamten Bedarf an elektrischer Energie für den Betrieb der Nationalstrassen abdecken.

6 Vorgehen

6.1 Einleitung

Von der Projektidee bis zur Produktion der ersten solaren Kilowattstunden sind viele wichtige Planungs- und Realisierungsschritte in der richtigen Reihenfolge erforderlich. Insbesondere gilt es, die unterschiedlichen Abläufe und Prozesse von Schallschutzvorhaben und Photovoltaik Anlagen so zu kombinieren, dass die Kombination optimal genutzt werden können.

Grundsätzlich muss beachtet werden, dass die Gesamtdauer eines Photovoltaik-Projektes üblicherweise weit kürzer ist, verglichen mit einem Strassenbau- bzw. Schallschutzvorhaben. So braucht eine PV Anlage von der Planung bis zur Inbetriebnahme typischerweise etwa ein Jahr, während der Prozess in einem Tiefbau Vorhaben mehrere Jahre dauern kann bis zur Inbetriebnahme des Werkes. Für die Realisierung von Photovoltaik-Schallschutz ist es hilfreich, zunächst die typischen Abläufe und Projektphasen von PV-Projekten zu verstehen.

6.2 Planungsablauf Photovoltaik

Im Folgenden wird der Ablauf eines Photovoltaik-Projekts unter planerischen Gesichtspunkten näher erläutert.

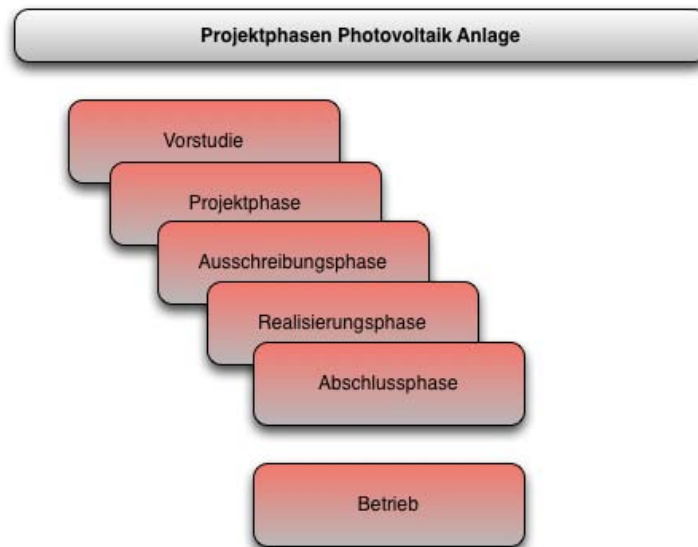


Abb. 6.1: Phasen eines Photovoltaik-Projekts

6.2.1 Vorprojekt / Machbarkeitsstudie

In dieser ersten Phase gilt es, grundsätzlich zu prüfen inwiefern die weitere Verfolgung des Projekts möglich und sinnvoll ist und die dafür notwendigen belastbaren Grundlagen zu erarbeiten.

Nach einer Analyse der Aufgabenstellung und der Festlegung der Ziele des Auftraggebers werden die Rahmenbedingungen des Projekts erfasst. Ein wichtiger zu klärender Punkt ist hierbei insbesondere die Standortsituation mit den Informationen wie zur Verfügung stehende Fläche, Ausrichtung und Verschattungssituation. Weiter sind die Möglichkeiten und Bedingungen zur Einspeisung des produzierten Solarstroms ins lokale Netz des Elektrizitätswerkes abzuklären. Auch die Bestimmungen für die Baueingabe bei der jeweiligen Gemeinde werden in dieser Projektphase eingeholt. Schliesslich sind die besonderen Erfordernisse von Photovoltaik in Kombination mit Schallschutzwänden zu prüfen.

6.2.2 Projektphase

In dieser Phase wird das Konzept detailliert ausgearbeitet, ein detaillierter Kostenvorschlag und Bewilligungsunterlagen erstellt. In der Projektphase sollten auch die konstruktiven sowie die formellen Schnittstellen zum ASTRA geklärt werden. Insbesondere sind die Eigentumsverhältnisse, die Rechte und die Pflichten sowie der Unterhalt und Betrieb zwischen allen beteiligten Parteien zu klären.

Bei der Konzeptausarbeitung werden bspw. die konstruktiven Aspekte der Modulbefestigung, die geometrischen Verhältnisse, die Kabelführung und die Positionen bzw. der Standort von Anschlussboxen und Wechselrichter(n) festgelegt. Mit der Festlegung der geometrischen Verhältnisse kann eine Grobauslegung der Module mit elektrischem Prinzipschema und einem Wechselrichterkonzept ausgearbeitet werden. Die Ertragsprognose wird anschliessend an das Konzept angepasst.

Weiter wird ein Sicherheitskonzept für die Montage und die Anforderungen an den Blitzschutz sowie ein Erdungskonzept definiert. Auf Basis der Ausarbeitung des Bauprojektes wird eine detailliertere Kostenschätzung erstellt. Nach Abklärung der Anschluss- und Genehmigungsbedingungen werden die entsprechenden Unterlagen für die zuständigen Organe wie Elektrizitätswerk, Starkstrominspektorat und Gemeinde vorbereitet.

6.2.3 Ausschreibungsphase

Zu Beginn dieser Phase wird der Vergabemodus festgelegt, wobei je nach Bauherrschaft rechtlich verbindliche Schwellenwerte zu beachten sind. Zu den unterschiedlichen Vergabeverfahren zählen das freihändige, das Einladungs-, das selektive und das offene Verfahren. Die Ausschreibung richtet sich vorzugsweise an Photovoltaik-Generalunternehmer, die dann die gesamte Turn-Key-Verantwortung für Feinplanung, Lieferung, Montage und Inbetriebnahme übernimmt. Für die Ausschreibungsunterlagen wird das elektrische Schema erstellt und die einzelnen Komponenten festgelegt. In Bezug auf Wechselrichter und Module werden die Anforderungen spezifiziert. Schliesslich werden die Leistungsverzeichnisse der verschiedenen Anlagenteile ggf. mit detaillierten Vorausmassen aufgestellt. Die Ausschreibungsunterlagen, die auch einen provisorischen Terminplan im Rahmen des Gesamtprojekts enthalten, werden den Unternehmen zur Verfügung gestellt und zusammen mit den Vergabebedingungen erläutert.

Aufgrund der hohen Volatilität der Preise bei den PV Anlagen sollte die Ausschreibung der PV Anlage möglichst kurz (2 - 6 Monate) vor der Realisierung der PV Anlage erfolgen um von den aktuellen Preisen profitieren zu können.

Nach Eingang der Unternehmensofferten werden diese zunächst formal und rechnerisch geprüft. Die verschiedenen Offerten werden bezüglich aller relevanten Aspekte wie Fabrikate, Qualitäten, Quantitäten Wirtschaftlichkeit, Ausführungstermine, Arbeitsweise und Organisation eingehend verglichen und in Vergleichstabellen einander gegenübergestellt. Dem Auftraggeber kann damit ein Vergebungsantrag vorgelegt werden. Zusammen mit der Bereinigung des Kostenvoranschlags und des Bau-Terminplans stellt dies den letzten Abschnitt der Ausschreibungsphase dar.

6.2.4 Realisierungsphase

Nach der Auftragsvergabe und Redaktion der Verträge werden die Ausführungsunterlagen bereitgestellt. Dabei erfolgt eine nochmalige Kontrolle der endgültigen Berechnungen, Pläne und Schemata. Die Unterlagen werden den beteiligten Bewilligungsinstanzen zu Verfügung gestellt.

Im Rahmen der Bauleitung wird der Einsatz der Unternehmer und Lieferanten überwacht. Im Einzelnen werden Materiallieferungen, Arbeitsschritte, Rechnungen und Leistungsaufstellungen sowie die Einhaltung der Sicherheits- und Arbeitsvorschriften kontrolliert. Zusätzlich gilt es alle Projektbeteiligten zu koordinieren, das Budget und den Terminplan zu überwachen und den Baufortschritt zu protokollieren.

Vor der Übergabe des Werkes werden die offiziellen Kontrollen der zuständigen Instanzen veranlasst und die Anlage auf Funktion und die von den Lieferanten garantierten Daten, bspw. durch ein Ausmessen der Nennleistung, überprüft. Bei festgestellten Mängeln werden die Massnahmen und Fristen zur Behebung festgelegt und zuletzt ein Abnahmeprotokoll angefertigt.

6.2.5 Abschlussphase

In der Abschlussphase wird eine Schlussabrechnung aufgestellt, nachgeprüft und bereinigt. Diese kann dann dem vorangegangenen Kostenvoranschlag gegenübergestellt werden. Weiter werden Ausführungs- und Betriebsunterlagen, die für Betrieb und Unterhalt notwendig sind, festgelegt, überprüft und gegebenenfalls nachgeführt. Die Zusammenstellung dieser Dokumente wird anschliessend dem Auftraggeber übergeben. Im Rahmen der Garantiarbeiten werden Mängellisten aufgestellt und nachgeführt. Die betreffenden Unternehmer und Lieferanten werden aufgeboten und die Behebung der Mängel überwacht. Abschliessend wird ein Protokoll der Schlusskontrolle bzw. -abnahme erstellt.

6.2.6 Inhalt einer typischen PV Vorstudie zur Abklärung der Eignung von LSW für die Kombination mit PV

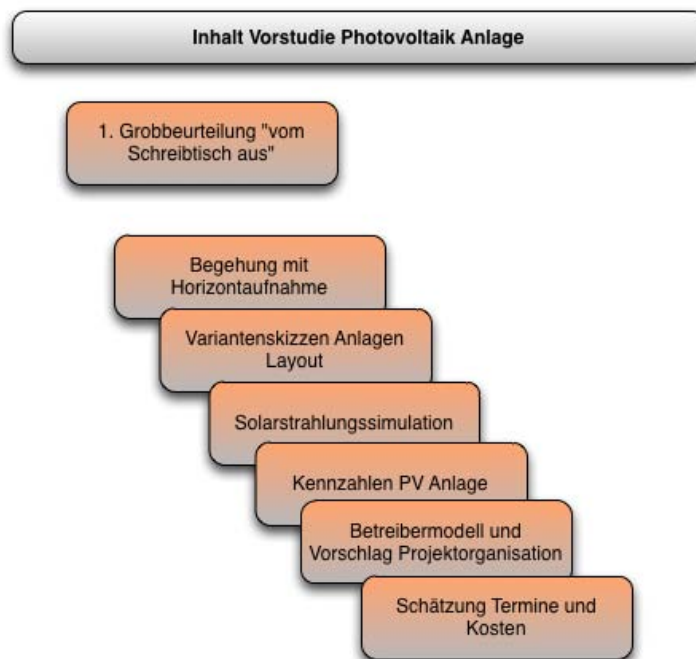


Abb. 6.2: Elemente einer Vorstudie zur Beurteilung der Eignung von Photovoltaik in Kombination mit Lärmschutzbauwerken

Grundlagen und Zusammenfassung

Zunächst werden die Grundlagen der Studie wie Begehung vor Ort, Bilder, Pläne und verwendete Planungswerkzeuge ermittelt und festgelegt. Die Erkenntnisse aus der ersten Beurteilung vom Schreibtisch aus sollten hier entsprechend aufgearbeitet werden.

Begehung mit Bestandsaufnahme

Die Vorstudie sollte einen Bericht über die Objektbegehung und die daraus gewonnenen Kenntnisse wie nutzbare Streckenabschnitte, die präzise Ausrichtung des Strassenverlaufs, Horizontaufnahmen für mögliche Verschattungen und Hindernisse und nutzbare Flächen für die Photovoltaik enthalten. So sind zum Beispiel lokale Hindernisse wie Vegetation oder bauliche Installationen in direkter Umgebung aus den verfügbaren Plänen und Unterlagen nicht immer ersichtlich.

Variantenskizzen Anlagen Layout

Die mechanische Integration bzw. Anbindung der Photovoltaikanlage an die Lärmschutzwand ist ein wichtiger Punkt, den es auszuarbeiten gilt. Dabei ist es zwingend notwendig, dass sämtliche geltenden Vorschriften zu Lärmschutzwand, Schallschutzanforderungen, Gesamtmasse etc. eingehalten werden. Es sollten in der Vorstudie verschiedene mögliche Anlagenlayouts und Anlagentypen geprüft und dargestellt werden. Die Visualisierung sollte möglichst anhand von Skizzen oder Fotomontagen erfolgen. Die verschiedenen Varianten sollten verglichen und bewertet werden.

Auch die elektrische Integration sollte im Rahmen der Studie erörtert werden. Der Zugang zur Stromeinspeisung in das öffentliche Ortsnetz, mögliche Standorte für Wechselrichter und der Verlauf der elektrischen Leitungen müssen hier geklärt werden.

Solarstrahlungssimulation und Beurteilung Ertragspotential

Ein zentraler Punkt der Studie ist die Ermittlung des photovoltaischen Leistungs- und Ertragspotentials. Basierend auf den ermittelten Anlagenlayouts kann eine Modulfläche und damit eine elektrische Nennleistung ermittelt werden. Zudem werden aus der Solarstrahlungssimulation für den betreffenden Standort unter Berücksichtigung der Ausrichtung und Neigungswinkel der Module und des realen Horizontes vor Ort die erwarteten nutzbare Solarenergie berechnet.

Kennzahlen der PV Anlage

Aus diesen Berechnungen und Abklärungen werden die Kennzahlen der PV Anlage ermittelt. Neben der Modulfläche sind dies die installierbare maximale Photovoltaiknennleistung in kW und ein prognostizierter elektrischer Jahresertrag in kWh.

Schallschutz

Es sind erste Abklärungen zur Reflektion des Schalls und zur Einhaltung der geforderten Schallschutzeigenschaften für die vorgeschlagenen Anlagentypen zu treffen. Dieser Punkt ist in Ergänzung zu den photovoltaischen Elementen in der Vorstudie zu berücksichtigen und unterscheidet die Vorstudie für eine PV Schallschutzanlage von einer PV Vorstudie.

Betreibermodell und Projektorganisation

Die verschiedenen konstruktiven Ausführungen von Photovoltaik-Schallschutz-Kombinationen (bspw. aufgesetzt oder vollintegriert) eignen sich für die möglichen vertraglichen Ausgestaltung der Beziehung zu einem unabhängigen Projektträger unterschiedlich gut.

Der Baulastträger der Lärmschutzmassnahme muss basierend auf der Vorstudie die Grundsatzentscheidung treffen können, wer für das PV Projekt der Realisator und Projekteigentümer sowie der Verantwortliche für den Betrieb sein wird. Es gibt hier verschiedene Modelle, die in der Praxis angewendet werden (siehe Kapitel 7.4).

Um die potentielle Projektorganisation zu erläutern, ist eine schematische Darstellung des Zusammenspiels der verschiedenen Gruppen für Schallschutz und Photovoltaik (Baulastträger, Projektträger, Planer Photovoltaik, Stromabnehmer etc.) mit einer kurzen Beschreibung anzustreben.

Schätzung Termine und Kosten

Der Projektablaufplan sollte die Dauer von Komponentenlieferungen, Montage, Inbetriebnahme und Testbetrieb berücksichtigen. Weiter werden Fixpunkte und Meilensteine für Baubeginn etc. festgelegt. Die notwendigen Vorlaufzeiten für die Ausschreibung der Aufträge, Auswertung der Offerten Werkvertrag und Lieferung werden ebenfalls behandelt. In einer schematischen Darstellung wird der Projektablauf übersichtlich erläutert. Es ist ein spezielles Augenmerk auf die zeitliche Koordination mit den Bauprozessen der Lärmschutzwand zu werfen. So müssen einzelne Arbeitsschritte, wie zum Beispiel die Verlegung von Leerrohren für die elektrische Leitungsführung, Grabarbeiten oder Vorbereitun-

gen für die mechanische Integration der PV Anlage für die Nutzung der Synergien vorzeitig zur eigentlichen Realisierungsphase der PV Anlage durchgeführt werden.

Die Studie sollte eine Schätzung, sowohl der gesamten als auch der spezifischen Investitionen in CHF/kW_p zum Erstellungszeitpunkt beinhalten. Gegebenenfalls sind dabei Kostengutschriften durch den Inhaber der Lärmschutzwand, bspw. in CHF/m², oder zusätzliche Aufwendungen zu ermitteln.

Für eine erste ökonomische Beurteilung können aus den Investitionskosten der PV Anlage und den erwarteten elektrischen Erträgen die Stromgestehungskosten in Rp./kWh berechnet und für eine erste Wirtschaftlichkeitsbewertung mit Vergütungssätzen, beispielsweise der KEV, verglichen werden.

Resultate der Vorstudie

Die Resultate der Vorstudie für die PV Anlage sollten in die Varianten des Lärmschutzprojekts einfließen. Sie sind noch unabhängig vom späteren Projektträger der PV Anlage.

6.2.7 Betrieb und Unterhalt

Sicherheit

Sicherheitsüberlegungen sind in den verschiedenen Phasen und Bereichen von PV Lärmschutzwänden anzustellen. Während der Realisierungsphase sind insbesondere die Vorschriften zu Arbeitssicherheit zu beachten und einzuhalten. Nebst den Vorschriften für Arbeiten an elektrischen Anlagen sind dabei die Vorgaben für Arbeiten im Strassenbereich zu berücksichtigen. In der Betriebsphase sind für Unterhalts- oder Wartungsarbeiten ebenfalls alle gültigen Vorschriften einzuhalten.

In der Planungsphase ist ein entsprechendes Konzept zu entwerfen, um auch im Fall eines Unfalls mit Einsatz von Rettungskräften die Sicherheit aller Betroffenen zu gewährleisten. Hier ist insbesondere zu beachten, dass bei einer PV Anlage, wenn sie Tageslicht ausgesetzt ist, eine Gleichspannung auf den PV Modulen anliegt. Diese kann aus physikalischen Gründen nicht ausgeschaltet werden. Mit entsprechenden Massnahmen wie Trennschaltern kann aber eine Reduktion der spannungsführenden Teile erreicht werden. Hierzu gibt es insbesondere im Bereich PV und Feuerwehr verschiedene Empfehlungen aus der Schweiz und Deutschland mit Erfahrungswerten.

Die mechanische Sicherheit der PV Anlage muss ebenfalls gewährleistet werden. Hier ist insbesondere auf die Einhaltung der Lichtraumprofile, den Einsatz von geeigneten und geprüften Materialien und wo notwendig die zusätzlichen mechanische Absicherung von PV Modulen, zum Beispiel mit einer Absturzsicherung auf den Brücken, zu achten.

Elektrische Sicherheit

Bei der Auswahl der Komponenten der PV Anlage ist auf die Einhaltung der gültigen Vorschriften zu achten. Insbesondere sind auch Steckverbindungen und Kabel vor unerlaubtem Zugriff zu schützen. Die Kontrolle der Ausführung muss durch die entsprechenden Nachweise und Bewilligungen sichergestellt werden.

Blendung durch Reflektion

Da die PV Module zum Schutz der Solarzellen mit einer Glasoberfläche versehen sind, kann dies auch zu Reflektionen von einfallendem Sonnenlicht führen. Durch die Geometrie kann für einen bestimmten Standort der Einfluss der möglichen Reflektion aber in der Planungsphase abgeklärt werden. Es ist ausserdem zu berücksichtigen, dass es sich bei konventionellen PV Anlagen nicht um licht-konzentrierende oder vollständig reflektierende Komponenten handelt. Die Reflektion des Sonnenlichts ist also immer kleiner als die direkte Sonnenstrahlung, welche auch zu Blendung führen kann.

Verschmutzung der PV Module

Die PV Module sind der Umwelt ausgesetzt und werden entsprechend auch verschmutzt. Insbesondere im Frühjahr ist die Verschmutzung durch Pollenstaub deutlich zu sehen. Da es sich bei der Photovoltaik aber nicht um ein konzentrierendes optisches System handelt, führt dies nicht zu einem Produktionsunterbruch.

Durch geeignete konstruktive Massnahmen ist die natürliche Reinigung der PV Module durch Meteowasser in Form von Regen und Schnee ausreichend. Die Verschmutzung führt zu einer minimalen Reduktion des Stromertrags. Eine zusätzliche Reinigung ist aber vor allem bei einer strassenzugewandten Lösung höchstwahrscheinlich nicht lohnenswert aufgrund des erhöhten Aufwands für die Arbeitssicherheit an Strassen. Diese Erfahrung wird durch die Produktionsdaten von bestehenden PV Anlagen, welche nicht gereinigt werden, bestätigt.

Um die natürliche Reinigung nutzen zu können, ist bei der Planung auf einen ausreichenden Neigungswinkel der PV Module zu achten. Dadurch fliesst das Wasser gut ab und kann die Glasoberfläche reinigen. Eine weitere Verbesserung kann erreicht werden, indem bei der Modulauswahl auf einen ausreichenden Abstand von Zellen zum Modulrand geachtet wird. Auch abgeschrägte Rahmenprofile führen zu einem besseren Abfließen des Wassers. Stehendes Wasser auf den Modulen kann zu Algen- und Moosbildung führen, welche einen deutlichen Einfluss auf den Produktionsertrag hat.

Durch den Abstand von Modulunterkante vom Boden kann die Verschmutzung ebenfalls beeinflusst werden. Ein grösserer Abstand reduziert die Verschmutzung.

Modulbruch durch mechanische Einflüsse

An Autobahnen besteht das Risiko, dass Module an der strassenzugewandten Seite durch Steinschlag etc. beschädigt werden können. PV Module weisen eine minimale Schlagfestigkeit auf, da sie Hagelschlag zum Beispiel schadlos überstehen müssen. Grundsätzlich ist es vorteilhaft, die PV Module auf einer minimalen Höhe über Grund anzusetzen. Die Betriebserfahrung von bestehenden PV Anlagen an Lärmschutzwänden zeigt aber, dass der Fall von Schäden durch von der Fahrbahn weggeschleuderte Steine oder Gegenstände sehr gering ist.

Vandalismus und Graffiti

An leicht zugänglichen Lärmschutzwänden, vor allem bei der Photovoltaik auf der Fahrbahn abgewandten Seite, können Vandalismus und insbesondere Graffiti ein Problem darstellen. Beobachtungen ergeben, dass die Farbmalereien bis zu einer Höhe von 2.50m zu verzeichnen sind. Da die PV Module aber eine Glasoberfläche haben, ist die Entfernung der Graffities aber einfacher als bei anderen Oberflächen möglich. Unter Umständen sind auch Massnahmen zu prüfen, welche den Zutritt zu der PV Anlage erschweren.

Auswechslung / Service

Die Elemente der PV Anlage müssen im Schadenfall einfach ausgewechselt werden können. Dabei muss unterschieden werden zwischen den beiden Hauptbestandteilen, den elektrischen Komponenten, insbesondere dem Wechselrichter und den PV Modulen. Die elektrischen Komponenten und insbesondere die Wechselrichter sollten gut zugänglich platziert werden, da die Lebenserwartung der Wechselrichter bei 10-15 Jahren liegt und damit mit grosser Wahrscheinlichkeit während der Lebensdauer der PV Anlage einmal ersetzt werden müssen. Die Wechselrichter müssen auch nicht in direkter Umgebung der PV Module sein, allerdings ist auf eine minimierte Leitungslänge wegen den elektrischen Verlusten zu achten.

Die PV Module sollten mit einem Montagesystem angebaut sein, welches den Austausch von einzelnen Modulen erlaubt. Grundsätzlich haben die PV Module aber keine mechanischen Elemente, welche eine beschränkte Lebensdauer haben. Heutige PV Module werden mit einer Garantie von 20-25 Jahren ausgeliefert. Die Lebensdauer von PV Modulen

kann aber durchaus auch noch länger sein. Die Montagezeit für den Ersatz eines PV Moduls sollte so weit als möglich reduziert werden für einen effizienten Ersatz. Dabei muss beachtet werden, dass für Auswechslungen auf Autobahnen in der Regel aufwendige Sicherheitsmassnahmen notwendig werden.

Diebstahl

Insbesondere die PV Module sind gegen Diebstahl zu sichern. Dies kann durch geeignete mechanische Massnahmen wie spezielle Verschraubungen erfolgen. Zusätzlich können je nach Standort Massnahmen in Betracht gezogen werden, welche den Zugang zu der PV Anlage erschweren. Dies kann auch im Zusammenhang mit dem Schutz vor Vandalismus erfolgen.

Rückbau

Eine PV Anlage kann am Ende der Lebensdauer vollständig zurückgebaut werden. In der Kombination mit Schallschutzanlagen ist auf die Erhaltung der Lärmschutzeigenschaften zu achten. Die PV Module können zu einem sehr grossen Teil recyclet werden, da die Hauptbestandteile der Module wiederverwertbar sind. Kabel und Wechselrichter müssen entsprechend entsorgt werden. Sie können teilweise ebenfalls recyclet werden.

7 Ökonomische Prozesse und Modelle

7.1 Einleitung

Solarstromanlagen stellen ein langfristiges Investitionsobjekt dar. Der mit Abstand grösste Teil der Kosten fällt dabei zu Beginn an. Die Finanzierungskosten werden über einen vergleichsweise grossen Zeitraum über die Stromerlöse refinanziert. Aufgrund der Wartungsarmut und fehlender Brennstoffkosten sind die Betriebs- und Unterhaltsaufwendungen gering. Photovoltaikmodule werden heute mit Leistungsgarantien von typischerweise 25 Jahren auf dem Markt angeboten und eine Lebensdauer von über 30 Jahren angenommen. Elektrischer Strom als Ware bzw. Handelsobjekt hat spezielle Eigenschaften, die sich stark von denen anderer handelbarer Güter unterscheiden. Er ist physisch nicht greifbar und vom Verbraucher nicht im Sinne verschiedener Qualitäten zu unterscheiden. Er ist nicht ohne Umwandlung „lagerbar“ und muss praktisch in Echtzeit zu gleichen Mengen hergestellt und verbraucht werden. Die genannten Eigenschaften führen daher zu Besonderheiten bei den Vermarktungsmöglichkeiten.

7.2 Investitionskosten PV

Die Preise der PV Systeme sind in den letzten Jahren stark gesunken. Diese Entwicklung zeigt sich in der Lernkurve von exemplarischen Projekten, welche von TNC realisiert wurden. So haben sich in den letzten etwa 20 Jahren die Investitionskosten um ca. 90% reduziert. Am stärksten haben sich die Preise zuerst im Bereich der Balance of System Kosten reduziert, in den letzten Jahren sind insbesondere auch die Modulpreise stark und schnell gesunken. Diese Entwicklung wird voraussichtlich auch noch weiter anhalten. Dabei kann sich innerhalb eines Jahres der Systempreis für eine PV Anlage zwischen 5 bis 20% reduzieren bevor eine asymptotische Untergrenze erreicht wird. Eine Vorhersage der Preisentwicklung ist deshalb nur sehr schwierig und wenn überhaupt nur sehr kurzfristig möglich, da sie nicht nur von der Nachfrage bestimmt ist, sondern auch von den politischen Rahmenbedingungen der Förderungen (Zeitpunkt von Absenkungen der Vergütung). Aufgrund der hohen Volatilität der Systempreise für PV Anlagen wird auf eine Quantifizierung der Preise verzichtet. Wo zur Illustration doch Annahmen getroffen wurden, sind Werte mit Gültigkeit 2012 angenommen worden.

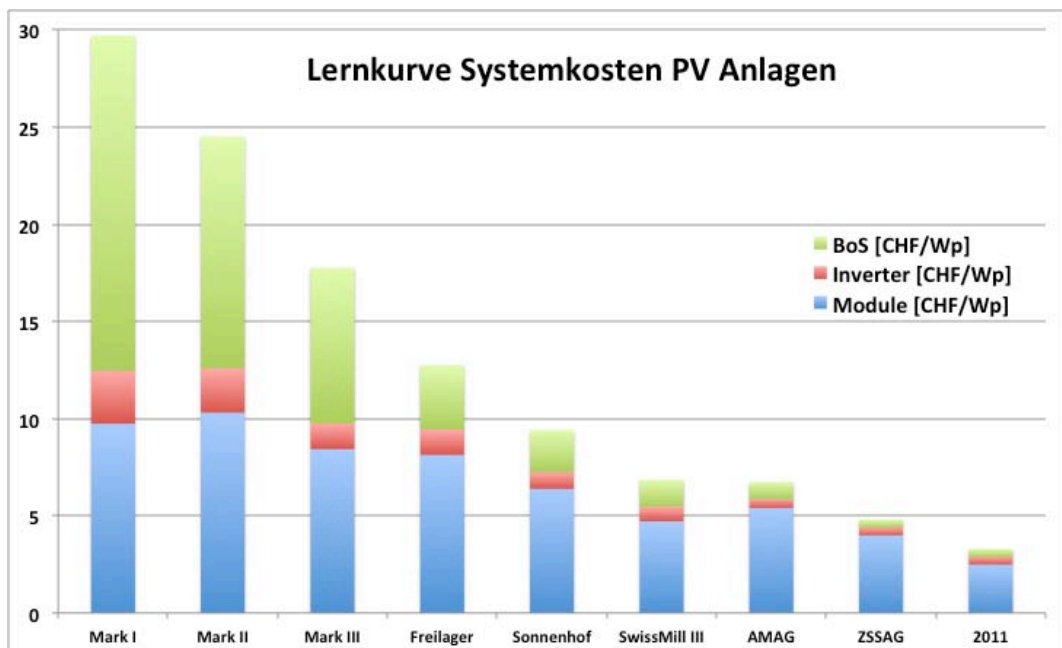


Abb. 7.1: Beispielhafte Lernkurve PV-Anlagekosten basierend auf realisierten Projekten der TNC Consulting AG

7.3 Refinanzierungsmodelle/Erlöse aus der Stromproduktion

Grundsätzlich sind Schweizer Elektrizitätswerke dazu verpflichtet, den produzierten Strom aus Photovoltaikanlagen abzunehmen und zu vergüten. Zunächst steht dieser Strom in Konkurrenz zu konventionell erzeugtem Strom bspw. aus Kernenergie oder Gas. Er bietet jedoch einen ökologischen Mehrwert, da er praktisch CO₂ neutral produziert wird, keine sonstigen Emissionen erzeugt und keinen nuklearen Abfall hinterlässt. Wird dieser ökologische Mehrwert von der Gesellschaft oder dem einzelnen Kunden honoriert, so können höhere Vergütungen (Rp./kWh) erlöst werden. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten der Vermarktung dieses ökologischen Mehrwertes aufgezeigt.

7.3.1 Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV)

PV-Anlagen können bei der nationalen Netzbetreibergesellschaft Swissgrid angemeldet werden. Die gesamte Stromproduktion wird dann ins Stromnetz eingespeist und zu Preisen vergütet, welche abhängig von der Gesamtleistung und dem Jahr der Inbetriebnahme der Anlage sind. Die Vergütungsverträge beginnen mit der korrekt gemeldeten Inbetriebnahme der Anlage und dauern 25 Jahre. Der Vergütungssatz bleibt über diese Zeit konstant, unabhängig von der jährlichen Absenkung der Beiträge pro kWh um derzeit 8% für Neuanlagen. Der umlagebasierte Fördertopf hat auf Grund seiner Konstruktion ein begrenztes Volumen (Deckel), was derzeit zu schwankenden und teils sehr langen Wartezeiten auf eine Vergütungszusage führt. Die KEV ist aktuell Gegenstand politischer Diskussion und Überarbeitungen an diesem Regelwerk sind zu erwarten. Auf der anderen Seite bietet die KEV, einmal zugeteilt, für den Betreiber einer PV-Anlage durch die garantierte, fixe Vergütung und die lange Vertragslaufzeit eine sehr gute Planbarkeit der Refinanzierung.

7.3.2 Vermarktung des ökologischen Mehrwertes

Der ökologische Mehrwert von Strom aus Photovoltaik kann durch ein Zertifikat, wie z.B. *naturemade* nachgewiesen werden. Interessierte Stromkunden können diesen zertifizierten Mehrwert entweder parallel zum bisherigen Strombezug direkt über den Kauf von Ökostrom-Zertifikaten erwerben oder über ein entsprechendes Produkt von ihrem Stromversorgungsunternehmen beziehen. Die Photovoltaik-Anlagen können dabei sowohl von EVUs als auch von unabhängigen privaten Stromproduzenten betrieben sein.

Solarstrombörsen

Um Solarstromkunden und -produzenten zusammenzubringen, wurden so genannte Solarstrombörsen ins Leben gerufen. Häufig werden diese Plattformen von EVUs betrieben und unterscheiden sich im jeweiligen Modell bzw. der Ausführung leicht. Die Vertragslaufzeiten über die Vergütung des produzierten Stroms liegen typischerweise im Bereich von 10 bis 20 Jahren. Die Höhe dieser Vergütung kann auf unterschiedliche Weise festgelegt werden. Zum einen gibt es die Möglichkeit, dass die Vergütung über den Marktmechanismus von Angebot und Nachfrage, vergleichbar einer Börse, bestimmt wird. Zum anderen kann sie über ein Ausschreibungsverfahren ermittelt werden, bei der der effizienteste und günstigste Produzent den Zuschlag erhält. Zuletzt gibt es die Variante, dass das EVU bzw. der Plattformbetreiber die Vergütungssätze fixiert und gegebenenfalls bei geänderten Rahmenbedingungen nachjustiert. Verglichen mit der KEV bieten Solarstrombörsen häufig den Vorteil von wesentlich kürzeren Wartezeiten. Je nach Modell besteht evtl. ein Nachteil in Form von kürzeren Vertragslaufzeiten oder geringeren Einspeisevergütungen.

7.3.3 Eigenverbrauch

Die Stromgestehungskosten aus Photovoltaik sind über die letzten Jahre stark gesunken und nähern sich der so genannten Netzparität. Netzparität heisst, die Kosten des bezogenen Stroms sind gleich hoch wie die Kosten des eigenproduzierten Stroms. Eigenverbrauchter Strom kann in der Wirtschaftlichkeitsrechnung der PV-Anlage in Höhe der Strombezugskosten bilanziert werden. Es existieren unterschiedliche Bilanzierungsmodelle von Seiten der EVUs in Bezug auf den Eigenverbrauch. Die Strombilanz (Export in bzw. Import aus dem Stromnetz) kann auf Jahres-, Monats- bzw. Tagesbasis oder in

Echtzeit aufgestellt werden. Bei einer Bilanzierung in Echtzeit ist dieses Modell vor allem für Stromkunden mit einem vergleichsweise hohen Tagesstromverbrauch (z.B. Gewerbe) interessant, während bei einer Abrechnung auf Jahresbasis lediglich auf die Höhe des gesamten Jahresstromverbrauchs zu achten ist.

7.4 Betreibermodelle

Der Land- oder Strasseneigentümer muss sich Gedanken machen, wer für das Projekt der Realisator und Projekteigentümer, sowie der Verantwortliche für den Betrieb sein soll. Es gibt hier verschiedene Projektträger und Modelle, die in der Praxis bisher angewandt worden sind.

7.4.1 Das Astra

Das ASTRA tritt selber als Projektträger der Photovoltaik Anlage auf. Vorteile: Klare juristische Verhältnisse, Vorbehalt: Die Energieproduktion liegt ausserhalb der Kernkompetenz und des bisherigen Leistungsauftrags des ASTRA.

7.4.2 Unabhängiger Projektträger

Als unabhängiger Projektträger kommen Akteure aus verschiedenen Bereichen in Frage. Je nach Hintergrund haben diese unterschiedliche Interessen, Zielsetzungen und Vor- bzw. Nachteile als Partner bei der Realisierung von Photovoltaik auf Schallschutzbauwerken. Nachfolgend wird eine Auswahl an möglichen Projektträgern beschrieben.

Elektrizitätswerke

Elektrizitätswerke haben naturgemäss grosse Erfahrung in der Finanzierung, dem Bau und Betrieb von Stromerzeugungsanlagen im Allgemeinen und mittlerweile auch im Bereich Photovoltaik im Speziellen. Sie sind bei der Vermarktung nicht zwingend auf die KEV angewiesen, sondern können den Strom aus Photovoltaikanlagen direkt über entsprechende Produkte an ihre Kunden verkaufen. Auf Grund des wenig schwankungsfälligen Geschäftsfeldes Energie und einer öffentlichen Besitzerstruktur stellen sie einen sehr soliden und langfristigen Vertragspartner dar.

Gemeinden

Das Interesse an nachhaltiger Energieversorgung hat bei den Schweizer Gemeinden in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Mittlerweile gibt es hier über 300 so genannte Energiestädte, die über 50 % der Schweizer Wohnbevölkerung abdecken. Diesbezügliche Aktivitäten sind zumeist bei den gemeindeeigenen Elektrizitätswerken oder technischen Betrieben angesiedelt, weshalb oft auch ein gewisser Grad an Fachkompetenz in Bezug auf Photovoltaik vorhanden ist. Den Gemeinden stehen prinzipiell alle oben vorgestellten Refinanzierungsmöglichkeiten zu Verfügung. Als öffentliche Körperschaft und meist mit Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit der Bundesebene ausgestattet, sind die Gemeinden als solide und kompetente Vertragspartner einzustufen.

Bürgervereine / Genossenschaften

Als weitere potentielle Projektträger kommen lokale Zusammenschlüsse von Bürgern in Betracht, die das Ziel haben, sich aktiv bzw. finanziell an Photovoltaik-Anlagen zu beteiligen. Die Initiative zu solchen Zusammenschlüssen kann sowohl von Seiten der jeweiligen Gemeinde als auch von einzelnen Privatpersonen ausgegangen sein. Dabei werden ganz unterschiedliche Rechtsformen wie z.B. Verein, Genossenschaft, Aktiengesellschaft oder Interessensgruppen gewählt. Persönliche Identifikation und ideelle Beweggründe spielen häufig eine grosse Rolle. Bei einer breiten Beteiligung und Verwurzelung in der Bevölkerung ist eine hohe Akzeptanz des jeweiligen Projekts zu erwarten. Dies kann sich insbesondere vorteilhaft für das Genehmigungsverfahren auswirken. Finanzielle Rendite ist bei dieser Art von Projektträgern zwar grundsätzlich erwünscht, steht häufig aber nicht als alleiniges Projektziel im Vordergrund. Zur Vermarktung des produzierten Stroms bieten sich hier Solarstrombörsen oder die KEV als geeignete Instrumente an. Bei einer Projektbegleitung durch einen kompetenten Ingenieur bzw. Planungsbüro wird eine professionelle Zusammenarbeit mit diesen Projektträgergruppen gewährleistet.

Privatwirtschaft

Im Bereich der Privatwirtschaft gibt es inzwischen eine Reihe an Akteuren, die grosses Interesse an Investitionen in Photovoltaik-Projekte haben. Dies sind beispielsweise Ökostromfonds, geschlossene Beteiligungsfonds, Pensionsfonds, bis hin zu Versicherungen und Banken. Im Vordergrund stehen hier Kapitalrendite und Minimierung des Investitionsrisikos. Um den administrativen Aufwand und die spezifischen Kosten bzw. Stromgestehungskosten kleinzuhalten, werden Projekte erst ab einer gewissen Mindestgrösse in Erwägung gezogen. Bevorzugt wird in PV-Grossprojekte ab mehreren 100 kW_p bis hin zu mehreren MW investiert. Ausser dem Eigenstromverbrauch stehen prinzipiell alle aufgezeigten Refinanzierungsmöglichkeiten zur Verfügung. Es wird jedoch häufig auf möglichst lange Vertragslaufzeiten in Bezug auf die Stromvergütung geachtet, um die Sicherheit und Planbarkeit der Kapitalrückflüsse zu gewährleisten. Die Erfahrung im Realisieren und Betrieb von Photovoltaik-Anlagen reicht innerhalb dieser Gruppe von kaum vorhanden bis zu kompetent. Bei fehlender eigener Expertise werden entsprechend spezialisierte Unternehmen beauftragt.

7.4.3 Entschädigungen

Entschädigungen für die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur (Schallschutzwand, Leitungstrassé, etc.) sind auch im Bereich der auf Dachflächen installierten PV Anlagen nicht unüblich. Da sich die PV Systempreise und damit die Investitionssumme per Laufmeter oder m² weiterhin in kurzer Zeit stark reduziert, ist bei der Festlegung der Entschädigungshöhe ebenfalls eine häufige Anpassung notwendig. Wird ein Anteil an der Refinanzierung durch den Erlös des verkauften Solarstroms als Entschädigungsform gewählt, ist die Kopplung an die Investitionskosten bereits erfolgt.

7.4.4 Finanzierung

Für die Finanzierung einer Photovoltaik-Anlage bieten sich den Projektträgern alle üblichen Instrumente wie Darlehen, Leasing oder Eigenkapital aus Reserven bzw. Neueinlagen. Zusätzlich existieren eine Reihe an Fördermassnahmen auf Bundes-, Kantons- und Gemeindeebene, von denen die Investoren gegebenenfalls profitieren können.

7.5 Beispiele für Betreibermodelle von Photovoltaik Schallschutzanlagen

Strebt das ASTRA nicht selbst an, im Bereich von Photovoltaik an Schallschutzbauwerken als Projektträger und Betreiber aufzutreten, so muss ein geeignetes Vertragsmodell für die Kooperation mit einem unabhängigen Projektträger erarbeitet werden. Hierbei gibt es eine grosse Bandbreite an möglichen Vereinbarungen. Zu den vertraglichen Gestaltungsmöglichkeiten von Betreibermodellen liegen bereits Erfahrungen vor. Die Ausgangslage wie Strassen- bzw. Schallschutzneubau, Sanierung oder die Nutzung eines bestehenden, nicht sanierungsbedürftigen Schallschutzbauwerks haben Einfluss auf das für alle Beteiligten optimale Betreibermodell. Anhand zweier exemplarischer Beispiele soll die Bandbreite der Kooperationsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

PV-Anlage aufgesetzt – der Projektträger als Mieter

Das erste Beispiel behandelt den Fall einer auf ein bestehendes Schallschutzbauwerk aufgesetzten PV-Anlage. Erstmals realisiert wurde dieses Konzept bereits im Jahr 1989 an der A13 bei Domat/Ems in Form einer 100 kW_p Netzverbundanlage von der Firma TNC im Auftrag des BfE. Wichtig für diese Art der Realisierung ist, dass das Schallschutzbauwerk bzw. die Strasse, soweit abschätzbar, auf absehbare Zeit nicht saniert werden muss. Neben dem gegebenen Flächenangebot nutzt die Photovoltaikanlage das Tragwerk der Schallschutzanlage als tragenden Teil der Unterkonstruktion.



Abb. 7.2: Domat/EMS, PV-Anlage auf bestehende Lärmschutzanlage aufgesetzt

Da es sich beim Beispiel der PV Anlage auf der LSW der A13 um ein Pilotprojekt handelt, wurde die PV Anlage durch den Bund finanziert. Bei den nachträglich angebauten oder auf die Infrastruktur ausgesetzten PV Anlagen bietet es sich an, dass der Projektträger zusätzlich zur Finanzierung und Errichtung der PV-Anlage eine Entschädigung an den Eigentümer der Schallschutzanlage, hier das ASTRA, entrichtet. Bezugsgrösse für die Bemessung dieser Miete kann die genutzte Fläche in m^2 bzw. Laufmeter oder die installierte Spitzenleistung in kW_p sein. Auch ein vereinbarter Anteil am Ertrag der Anlage wäre hier vorstellbar. Eine Entschädigung kann auch in unterschiedlichen Formen wie einer Einmalzahlung oder einer wiederkehrenden Zahlung erfolgen und sollte vorgängig vereinbart werden. Der unabhängige Projektträger kann durch ein öffentliches und transparentes Ausschreibungsverfahren ermittelt werden. In diesem Beispiel bleibt das ASTRA weiterhin zuständig für den Betrieb und Unterhalt des Schallschutzteils der Anlage. Der PV-Projektträger ist seinerseits zuständig für den Betrieb und Unterhalt des photovoltaischen Teils der Anlage. Neben dem Nachweis der Verkehrssicherheit und aller sonstigen relevanten Bestimmungen bei der Errichtung der Anlage sollte er dem Schallschutzeigentümer ein Betriebskonzept vorlegen und von diesem genehmigen lassen. Er sollte darin nachweisen, dass eventuelle diesbezügliche Arbeiten Abläufe des Eigentümers nicht beeinträchtigen und die Sicherheit bzw. den Verkehrsfluss nicht negativ beeinflussen. Vorteil dieses Betreibermodells ist, neben den Mietzahlungen für den Eigentümer und einem geeigneten PV-Standort für den Mieter, die klare Entflechtung der Zuständigkeiten. Nachteil dieses Modells ist, dass das grundsätzliche Synergiepotential, welches Photovoltaik auf Schallschutzanlagen auch im Betrieb bietet, nicht voll ausgeschöpft wird.

PV-Anlage integriert - Projektträger in Vollverantwortung

Das zweite Beispiel behandelt den Fall einer in das Schallschutzbauwerk voll integrierten Photovoltaikanlage. Dies bietet sich an bei einem Neubau einer Schallschutzanlage oder einem Strassenneubau, bei dem bereits Schallschutzmassnahmen vorgesehen sind, sowie grösseren Sanierungen. Der Photovoltaik-Teil der Anlage sollte hierbei bereits von Anfang an im Planungsprozess berücksichtigt werden. Ein Beispiel hierfür ist die 115 m lange bifaciale Photovoltaik Schallschutzanlage entlang einer Bahnlinie in Münsingen.



Abb. 7.3: Integrierte bifaciale Photovoltaik-Schallschutzanlage in Münsingen

Durch die Kombination von Photovoltaik und Schallschutz in einem gemeinsamen Planungsprozess wurde ein technisch und auch optisch sehr ansprechendes Resultat erzielt, wie Abb. 7.3 verdeutlicht. Die vielfältigen Anforderungen wie Schallschutz, Teiltransparenz, Sicherheit für den Bahnbetrieb und Passanten, Schutz vor Vandalismus und weitere konnten dabei erfüllt werden. Durch die hohe Integration sämtlicher Komponenten und die Orientierung an Montagetechniken und -abläufen herkömmlicher Schallschutzwände war die Errichtung der Anlage sehr effizient, was sich grundsätzlich günstig auf die Investitionskosten auswirkt.

Bei einem solchen Konzept bietet es sich an, dass der Projektträger, im vorgestellten Beispiel wäre das die Gemeinde Münsingen, die volle Verantwortung für das Projekt oder den kombinierten Teil PV und Schallschutz übernimmt. Er finanziert diesen Bereich, d.h. sowohl die Schallschutzfunktion als auch den Photovoltaik-Teil und übernimmt die volle Zuständigkeit. Im Beispiel von Münsingen wurde auf die Fundamente der Lärmschutzwand der SBB aufgebaut. Übernimmt der PV Projektträger den Aufwand für Betrieb und Unterhalt des Gesamtbauwerks, so ist auch hier mit dem Eigentümer des Verkehrsweges ein Betriebskonzept zu vereinbaren, das alle relevanten Aspekte wie Sicherstellung der Verkehrssicherheit, Massnahmen bei Beschädigung, etc. berücksichtigt. Für die Erbringung der Schallschutzfunktion durch den PV Projektträger ist es angebracht, dass dieser vom Verkehrswegeeigentümer eine Gutschrift bzw. Kompensation erhält. Als Orientierung für die Höhe einer solchen Gutschrift bieten sich die vermiedenen Kosten einer herkömmlichen Schallschutzwand an. Ein entsprechender Kooperationsvertrag hat geeigneterweise eine Laufzeit im Bereich von 20 bis 30 Jahren. Für die Zeit nach Ablauf des Vertrages kann der Rückbau der Anlage, eine Möglichkeit zu Vertragsverlängerung oder die Übergabe des Bauwerks an den Verkehrswegeeigentümer vereinbart werden.

Ein Vorteil des vorgestellten Konzepts liegt darin, dass es das Synergiepotential, das Photovoltaik an Schallschutz bietet, voll ausschöpft, von dem sowohl der Projektträger als auch der Verkehrswegeeigentümer grösstmöglich profitieren. Weiter können durch die zusammengefasste Planung des Objekts aus einer Hand und von Anfang an sehr harmonisch integrierte und ästhetisch ansprechende Bauwerke realisiert werden. Der Eigentümer des Verkehrsweges profitiert, indem er einen Teil des Aufwandes für Planung, Realisierung, Betrieb und Unterhalt einer Schallschutzmassnahme einspart. Der Projektträger hat durch den Erhalt einer Kompensationszahlung den Vorteil, dass er eine Photovoltaik-Anlage zu attraktiven spezifischen Investitionskosten an einem geeigneten Standort errichten kann, was schliesslich zu niedrigen Gestehungskosten des Photovoltaikstroms führt. Da der Projektträger der PV Anlage auch die Verantwortung für den Schallschutz übernimmt, ist der vertraglichen Verantwortlichkeit besondere Beachtung zu schenken. Wird aber der Planungsprozess integriert und gemeinsam durchgeführt, können die entsprechenden Bedürfnisse schon in der Planung berücksichtigt werden.

7.5.1 Verkauf und Heimfall

Nach Ablauf der vereinbarten Vertragslaufzeit kann die PV Anlage zurückgebaut werden. Abhängig vom Integrationsgrad ist die Sicherstellung der Schallschutzfunktion zu gewährleisten. Die Anlage kann aber zum Beispiel auch zu einem Restwertpreis übergeben werden. Wird die Anlage gut unterhalten, ist auch ein Weiterbetrieb denkbar. In dem Fall müssten neue Nutzungsbedingungen verhandelt werden. Die Komponenten der PV Anlage, insbesondere die PV Module können bei einem Rückbau grösstenteils recyclet werden.

7.6 Zusammenfassung

Es gibt unterschiedlichste Betreibermodelle, welche auch schon erfolgreich für PV Schallschutzprojekte angewendet wurden. Für die erfolgreiche Realisierung und Betrieb einer PV Schallschutzanlage sind Sicherheiten bei den Refinanzierungsmodellen für den Betreiber notwendig. Die planerische Sicherheit im Ablauf einer Bewilligung einer PV Schallschutzanlage ist für einen potentiellen Investor ebenfalls wichtig. Die stark gesunkenen und weiterhin sinkenden Systempreise in der Photovoltaik erlauben es, Investoren für die Realisierung und den Betrieb von PV Anlagen zu finden.

8 Empfehlungen

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt „Potential Photovoltaik an Lärmschutzwänden entlang der Nationalstrassen“ und den Erfahrungswerten von bereits realisierten PV Schallschutz Projekten werden folgende Empfehlungen durch die Verfasser der Studie ausgesprochen.

- Die ermittelten Potentiale von 150 MWp bis 250 MWp entsprechen in etwa der bisher gesamthaft in der Schweiz installierten Photovoltaik Menge bis Ende 2011 (IEA Report 211 MWp kumuliert, 100 MWp in 2010 installiert). Die Kombination von PV und Lärmschutzwänden kann damit einen wichtigen Beitrag zur vermehrten Nutzung von Photovoltaik zur Stromgewinnung auf bestehender Infrastruktur in der Schweiz leisten. Mit einem elektrischen Jahresertrag von etwa 150 GWh kann der Jahresbedarf an elektrischer Energie für den Betrieb der Nationalstrassen (inkl. Tunnels) in der Jahresbilanz photovoltaisch erzeugt werden.
- In der Kombination von konventionellen PV Anlagen und bifacialen PV Anlagen kann auf beinahe allen Ausrichtungen von Lärmschutzwänden eine PV Anlage installiert werden.
- Aus Sicht von zukünftigen PV Anlagebesitzern und -betreibern ist es wünschenswert, planerische Sicherheit im Ablauf mit PV Lärmschutzwänden betreffend Projekt- und Planungsabläufen, Anforderungen an die PV Anlage in Kombination mit Lärmschutzwänden und Vertragswerken zu haben. Es wird empfohlen, eine einheitliche Handhabung der Abläufe, Prozesse, Kriterien und Bewilligungen für spätere PV Anlagen Contractoren anzustreben.
- Um das Potential von PV an Lärmschutzwänden zu nutzen, empfehlen wir die Prüfung von Lärmschutzwänden auf eine Eignung für die Kombination mit PV im Planungsprozess des ASTRA im Rahmen einer Sanierung oder eines Neubaus einer Lärmschutzwand fest zu etablieren. Mit der in der Studie entwickelten Methode und dem erstellten Datenbankmodell kann eine schweizweite Positiv- Liste der besonders geeigneten Lärmschutzwände erstellt werden. Dies kann periodisch mit dem jeweils aktuellen Datenstand zu den Lärmschutzwänden erfolgen, sollte aber spätestens bei Erreichen eines hohen Grades an Vollständigkeit der Datensätze betreffend Lärmschutzwänden erneut durchgeführt werden, um die in der Studie ermittelten Potentiale flächendeckend auf Projekte anzuwenden.
- Wir empfehlen unabhängige Vorstudien für PV Anlagen an als geeignet eingestuftem Lärmschutzwänden erstellen zu lassen. Damit sind belastbare Grundlagen vorhanden, welche für eine Ausschreibung der PV Schallschutzanlage oder eine weiterführende Projektplanung verwendet werden können.
- Um schnell praktische Erfahrungen mit den Prozessabläufen zu sammeln, sollte anhand von einigen ausgesuchten Beispielprojekten für unterschiedliche Anlagentypen eine Vorstudie erstellt und eine Ausschreibung der Anlagen zu Händen späterer PV Anlage Contractoren durchgeführt werden.

Anhänge

I	Aktuelle Photovoltaik-Technologien	76
	I.1 Solares Energieangebot.....	80
	I.2 Wirkungsgrad und energetische Amortisation.....	83
	I.3 Lebenserwartung.....	83
II	Grafiken und Erläuterungen	84

I Aktuelle Photovoltaik-Technologien

Funktionsweise einer Solarzelle

Eine Solarzelle besteht aus möglichst reinem Ausgangsmaterial (z.B. 99.99% Silicium). Das Material wird dotiert, so dass man positiven Ladungsträgerüberschuss (p-leitende Halbleiterschicht) oder negativen Ladungsträgerüberschuss (n-leitende Halbleiterschicht) im nichtleitenden Halbleiter Silizium erzielen kann. Zwischen den zwei dotierten Halbleiterschichten entsteht die Grenzschicht, der sogenannte p-n-Übergang, eine Diode.

Fällt Licht auf eine Solarzelle, treffen die Lichtteilchen (Photonen) auf den dotierten Halbleiter. Trifft ein Lichtteilchen in einer Solarzelle auf ein Atom und wird dort absorbiert, wirft es aufgrund seiner abgegebenen Energie ein Elektron aus seiner ursprünglichen Bahn heraus. Dabei werden Ladungsträger frei. Der p-n-Übergang verhindert, dass sich die freigesetzten Ladungsträger innerhalb der Solarzelle ausgleichen. An den Anschlüssen der Zelle liegt nun eine Spannung an.

Der Ladungsausgleich kann nur über einen äusseren Stromkreis, einen Verbraucher, erfolgen. Die Solarzelle wird zur Energiequelle und die Sonnenenergie sorgt dafür, dass das treibende Element, die Spannung, erhalten bleibt. Je grösser die Lichtintensität, desto mehr Strom kann fliessen.

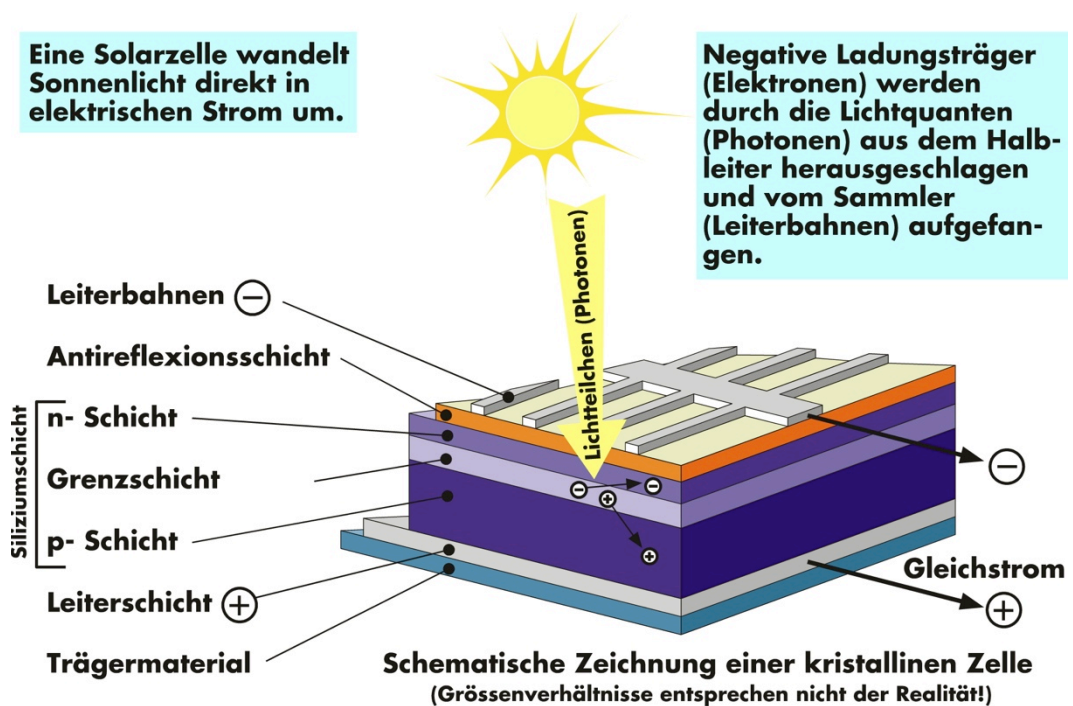


Abb. 1.1: Aufbau einer Solarzelle

Zellentechnologie

Solarzellen können entsprechend ihrer Kristallstruktur und den verwendeten Ausgangsmaterialien eingeteilt werden in kristalline Zellen, wie sie seit den 50er Jahren hergestellt werden, und Dünnschichtzellen.

- Die kristallinen Zellen bestehen aus mono- oder polykristallinem Silizium. Mit je ca. 45% Anteil am Weltmarkt sind dies die heute wichtigsten Zellen. Die Wirkungsgrade und Produktionskosten werden laufend verbessert.

- Mit der Entwicklung von Solarzellen aus amorphem Silizium wurde die Dünnschicht-technologie ins Leben gerufen, deren Produktpalette inzwischen um weitere Materialien ergänzt worden ist. Die Dünnschichtzellen verfügen über ein grosses Kostenreduktionspotential aufgrund des geringeren Materialbedarf und gewinnen langsam an Marktanteil.

Monokristalline Zellen

Monokristalline Zellen werden aus Siliziumstangen in der erforderlichen Dicke abgesägt. Das monokristalline Herstellungsverfahren garantiert einen relativ hohen Wirkungsgrad.

- Aus dem flüssigen hochreinen Silizium werden Säulen mit einem Durchmesser von rund 15 cm gezogen. Diese runden "Einkristalle" werden in die erforderliche Dicke abgesägt (ca. 120 - 160 µm, also 0.1 - 0.2 mm).
- Um die Zellen effektiver auf einer Fläche verlegen zu können, werden die runden Scheiben meist an vier Seiten beschnitten, im Extremfall bis zum Quadrat.
- Die Leiterbahnen für den elektrischen Abgriff werden mit dem Siebdruckverfahren aufgedruckt (ca. 0.2 mm).

Monokristalline Zelle



- **Aus hochreiner Siliziumschmelze gezogener Einkristall, in 0.2 mm - Scheiben gesägt**
- **Zellengrösse meist 12.5 x 12.5 cm resp. 15.6 x 15.6 cm**
- **Keine Kristallkörner erkennbar, dunkelblau bis schwarz**
- **Zellenwirkungsgrad 15 - 20%**
- **Zellenspannung 0.6 V** } **2.6 W/cell**
- **Typ. Strom 3.2 A/dm²** }

Begradigung an 4 Seiten

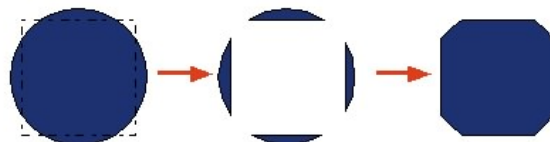


Abb. 1.2: Foto und typische Kenndaten einer monokristallinen Solarzelle

Polykristalline Zellen

Polykristalline Zellen werden aus Siliziumblöcken in der erforderlichen Dicke abgesägt. Dieses Verfahren ist kostengünstiger als die monokristalline Zellenproduktion.

- Aus dem flüssigen hochreinen Silizium werden Blöcke gegossen. Die quadratische Fläche hat eine Seitenlänge von bis zu 15 cm. Die Blöcke werden in die erforderlichen Scheiben geschnitten (ca. 0.20 - 0.26mm).
- Bei der Erstarrung des Materials bilden sich unterschiedlich grosse Kristallstrukturen aus, an deren Grenzen Defekte auftreten. Diese Kristalldefekte haben einen geringeren Wirkungsgrad der Solarzelle zur Folge.
- Die Leiterbahnen für den elektrischen Abgriff werden mit dem Siebdruckverfahren aufgedruckt (ca. 0.2 mm) und sind auf den Zellen sichtbar.

Polykristalline Zelle

- Aus hochreiner Siliziumschmelze in Blöcke gegossen, in 0.26 - 0.31 mm Scheiben gesägt
- Zellengrösse bis 15 x 15 cm
- Kristallkörner erkennbar, blau
- Zellenwirkungsgrad bis 16%
- Zellenspannung 0.5 V
- Typ. Strom 3 A/dm² } 1.5 W/dm²



Abb. 1.3: Typische Kenndaten und Foto einer polykristallinen Solarzelle

Dünnschicht Zellen

Wird eine Siliziumschicht auf Glas oder ein anderes Trägermaterial abgeschieden, spricht man von einer amorphen- oder Dünnschichtzelle. Die Schichtdicken betragen weniger als 0.01 mm (Dicke eines menschlichen Haares: 0.05 – 0.1 mm).

- Ausgangsmaterial für die Herstellung ist amorphes Silizium (Si) oder auch GaAs (Galium Arsenid), CdTe (Cadmium Tellurid) und CIS (Kupfer Indium Selenid). Bei dieser Dünnschichttechnologie werden die Trägermaterialien (z.B. Glas) direkt beschichtet.
- Die Beschichtung erfolgt meistens durch Aufdampfen des Siliziums.
- Die Grösse und Form dieser Solarzellen ist abhängig von den Abmessungen des Trägermaterials sowie von der gewünschten elektrischen Verschaltung, die hier gleich mit der Beschichtung erfolgt.
- Die Leiterbahnen für den elektrischen Abgriff werden aufgedampft. Dabei gibt es auch transparente leitende Schichten.
- Ein grosser Vorteil ist das grosse Kostenoptimierungspotential wegen des geringeren Materialbedarfs sowie die Möglichkeit grossflächige Zellen herzustellen.
- Der Nachteil gegenüber kristallinen Zellen ist der geringere Wirkungsgrad.
- Dünnschicht Solarzellen weisen eine starke Degradation auf, bis sie im stabilisierten Zustand sind. Dies gilt es bei der Auslegung der PV Anlage zu berücksichtigen.

Dünnschichtzellen

- **Verschiedene Herstellungsverfahren, meist durch Abscheidung aus Plasma-Phase**
- **Zellengrösse \pm beliebig**
- **Dunkelfarbig, gleichmässig, häufig mit leichtem Farbverlauf**
- **Zellenwirkungsgrad 4-10%**
- **Zellenspannung 0.5...1 V**
- **Typische Ströme 1...2 A/dm²**



Abb. 1.4: Typische Kenndaten und Foto eines Moduls aus Dünnschichtzellen

Modulaufbau

Solarzellen in der Grundform besitzen noch nicht die Eigenschaften, durch welche die direkte Energieproduktion in der Praxis möglich wird. Zur besseren Handhabung, zum Schutz vor Umwelteinflüssen sowie wegen der meist benötigten höheren Spannung werden mehrere Solarzellen zu Solarmodulen elektrisch verschaltet und zusammengebaut.

Dem mechanischen Aufbau kommt eine grosse Bedeutung zu. Die Zellen müssen von Umwelteinflüssen, insbesondere Feuchtigkeit, geschützt werden, damit eine möglichst hohe Lebensdauer erreicht wird.

Glas-Kunststoff

Kristalline Zellen werden in der Regel in eine Sandwich-Konstruktion aus Glas - EVA-Folie – Rückseitenabdeckung unter hoher Temperatur einlaminieren. Aufgrund der hochwertigen Verarbeitung gewähren Hersteller Leistungsgarantien bis zu 25 Jahren, die Lebensdauer eines Moduls liegt bei über 30 Jahren.

Glas-Glas

Um transparente oder teiltransparente Anwendungen zu erlauben, kann anstelle der Folie auf der Rückseite des Moduls auch eine zweite Glasscheibe verwendet werden. Dabei kommt entweder ein Folienlaminierungsverfahren oder Giessharz zum Einsatz für den Modulverbund. Je nach geforderter Transparenz werden die Solarzellen mit entsprechendem Abstand untereinander bzw. „auf Lücke“ gesetzt. Durch den Einsatz von Sicherheitsglas können Glas-Glas-Module gefertigt werden, die auch hohen Sicherheitsanforderungen genügen.

□

Aufbau eines Standard-Solarmodules, Glas-Kunststoff oder Glas-Glas

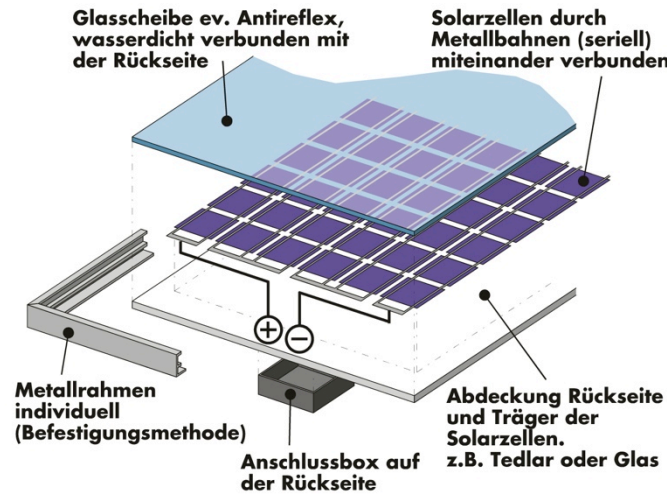


Abb. 1.5: Aufbau eines Standard-Solarmodules

Wechselrichter (Inverter)

Die Solarmodule erzeugen bei Lichteinfall Gleichspannung und liefern Gleichstrom. Die erzeugte Spannung kann je nach Zusammenschaltung der Solarzellen bzw. Module auf eine Anlage abgestimmt werden. Dies ist meistens ein Vielfaches der Spannung eines Standardmoduls von ca. 20 - 45 V.

Im öffentlichen Stromnetz ist aber Wechselspannung von 230/400 V vorhanden. Damit die produzierte Energie von der Gleichstromseite auf der Wechselstromseite der üblichen Verbraucher genutzt werden kann, wird ein „Gleich-Wechselstromwandler“, der sogenannte Wechselrichter benötigt. Die gewonnene Energie im Solarzellenfeld wird mit Hilfe des Wechselrichters in netzkonforme Wechselspannung umgewandelt und steht im öffentlichen Netz als elektrische Energie zur Verfügung. Dies geschieht ohne Emissionen und fast ohne Wartung, mit hoher Zuverlässigkeit während der Lebensdauer eines Wechselrichters von über 10 Jahren.

I.1 Solares Energieangebot

Die Sonnenenergie als umweltfreundliche Stromquelle beansprucht keinen zusätzlichen Flächenbedarf zur Stromerzeugung. Photovoltaik-Anlagen lassen sich problemlos in den bereits heute schon von der Zivilisation genutzten Flächen unterbringen: auf Dächern, integriert in Fassaden, oder eben als Bestandteile von Lärmschutzwänden an Strassen und Schienen.

Eine umfassende Nutzung von Solarstrom benötigt damit keinen einzigen Quadratmeter unverbautes Land!

Solarstrahlung

Ausserhalb der Erdatmosphäre trifft die extraterrestrische Strahlung mit einer sehr konstanten Intensität von $1'367 \text{ W/m}^2$ auf. Die auf die Erde auftreffende Strahlung weist zwei Komponenten auf:

- Direktstrahlung ist die direkt von der Sonne kommende Strahlung

- Diffusstrahlung ist die Strahlung, die aus allen anderen Richtungen kommt, nur nicht direkt von der Sonne. (z.B. durch Wolken oder Reflexion an Gegenständen in der Umgebung)

Die gesamte auf die Erde auftreffende Strahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet. Bei schönem Wetter dominiert die Direktstrahlung, bei starker Bewölkung und Nebel ist fast nur Diffusstrahlung vorhanden.

Solarstrahlung

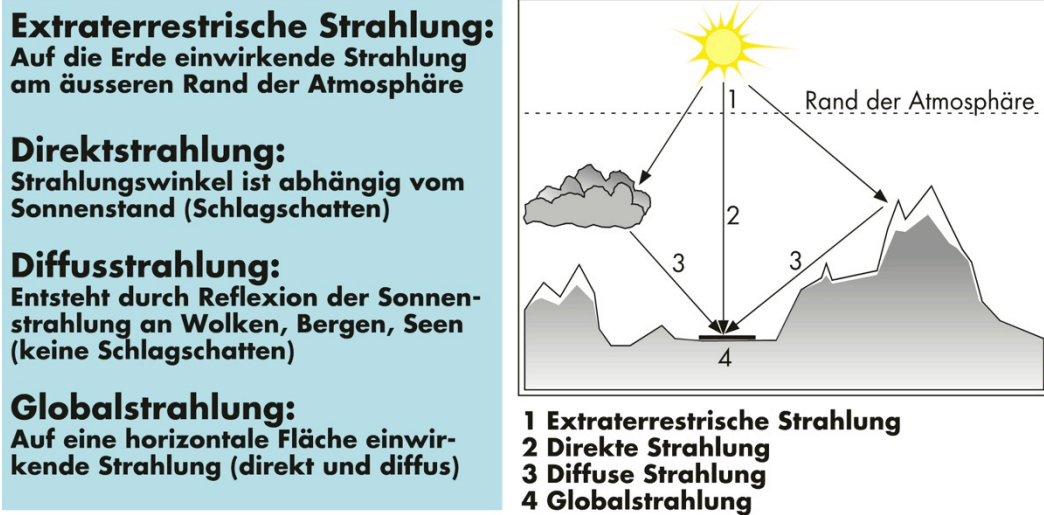
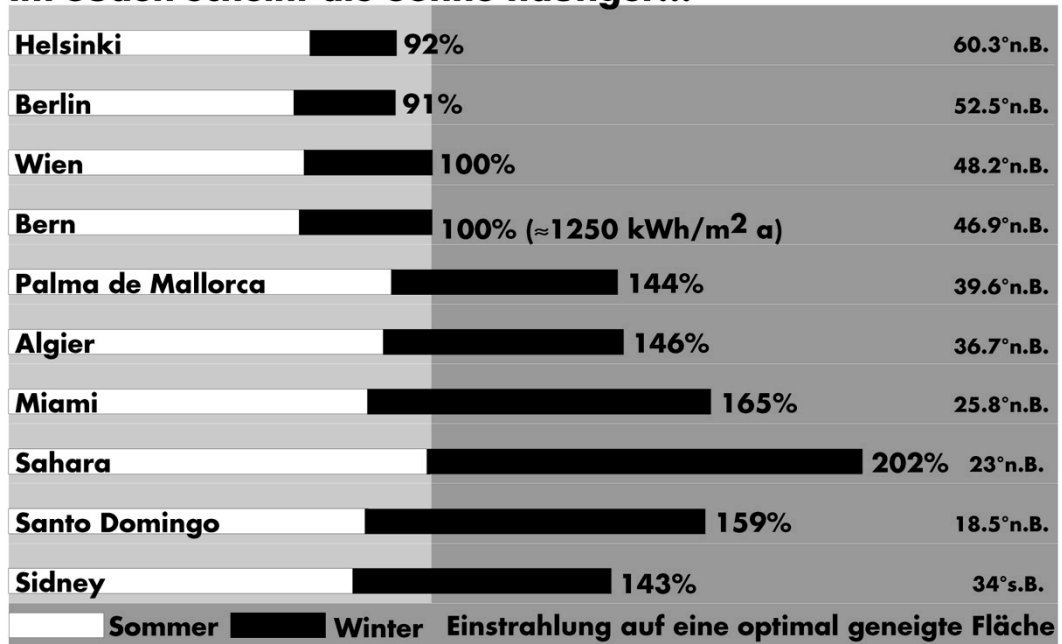


Abb. 1.6: Einteilung von Solarstrahlung

Einstrahlung auf die Erde

Dass die Photovoltaik ausschliesslich in südlichen Ländern, nicht aber im vermeintlich wenig sonnigen Mittel- und Westeuropa genutzt werden sollte, lässt sich widerlegen. So differiert das Strahlungsangebot zwischen dem weit nördlich gelegenen Helsinki und Bern mit 48 Grad nördlicher Breite nur um 8%! Auch in der Sahara wird jährlich nur doppelt so viel Sonnenenergie eingestrahlt wie beispielsweise in Bern.

Im Süden scheint die Sonne häufiger...



Quelle: TNC

Abb. I.7: Unterschiede in der Solarstrahlung für verschiedene Regionen

Sonnenbahnen und Horizont

Der Verlauf der Sonnenbahnen variiert in unseren Breitengraden sehr stark während des Jahres. Im Sommer steigt die Sonne am Mittag auf über 60 Grad Höhe, während sie im Winter nur auf gut 20 Grad steigt. Entsprechend stark unterscheiden sich auch die Sonnenscheindauer und die täglich eingestrahelte Energie.

Sonnenauf- und Sonnenuntergang sind nicht nur von der Jahreszeit abhängig, sondern auch sehr stark vom lokalen Horizont (Berge, Gebäude, Bäume). Ein solcher Horizont gegen Westen oder Osten kann sich unter Umständen auf das jährliche Strahlungsangebot auswirken. Ein ungünstiger Horizont Richtung Süden hat weniger Einfluss, da dort der Kulminationspunkt der Sonnenbahn ist.

□

Beispiel eines Sonnenstanddiagrammes mit eingezeichneter Horizontaufnahme

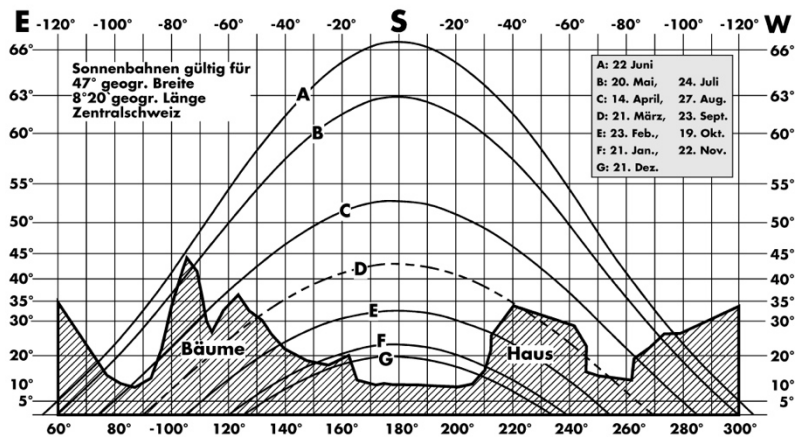


Abb. I.8: Tagesverläufe der Sonne für alle 12 Monate vor einer Horizontskizze

Optimale Neigung und Ausrichtung

Optimal für einen maximalen Jahresertrag wäre eine Solaranlage direkt nach Süden ausgerichtet mit einem Neigungswinkel von ca. 30 – 40 Grad. Werden flachere Neigungswinkel gewählt, so spielt die Südausrichtung eine kleinere Rolle. Der Gesamtertrag sinkt und der Winteranteil nimmt ab.

Werden steilere Neigungswinkel gewählt, so wird die Abhängigkeit von der Ausrichtung der Module grösser. Der Winteranteil am Gesamtertrag steigt. Ein Vorteil ist dabei auch die verbesserte Selbstreinigung der Module durch den Regen und das bessere Abrutschen von Schnee.

Bei Fassaden- oder Lärmschutzanlagen mit senkrechten Modulen wird mit einem Minderertrag von ca. 30% gegenüber optimal ausgerichteten Anlagen gerechnet. Werden Anlagen in Gebäudeflächen bzw. die Lärmschutzwand integriert, so wird ein Minderertrag häufig in Kauf genommen – zugunsten der besseren Integration und damit der Akzeptanz der Technologie.

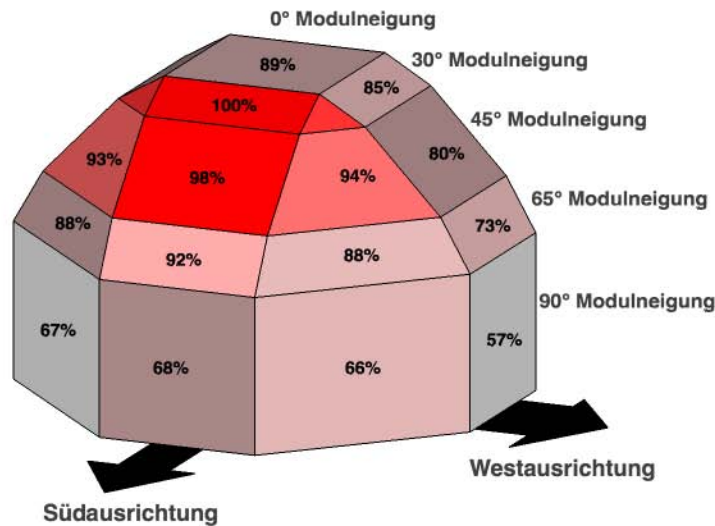


Abb. I.9: Sonneneinstrahlung nach Ausrichtung und Neigung, relativ zum Optimum für das Schweizer Mittelland

I.2 Wirkungsgrad und energetische Amortisation

Auf dem heutigen Stand der Technik erreichen auf dem Markt erhältliche Solarmodule einen Wirkungsgrad von 8-20%. (Im Labor wurden auch schon Werte von bis zu 30% Wirkungsgrad erreicht.) Je nach Typ und Anlagegrösse ist die zur Herstellung der Zellen gebrauchte Energie heutzutage bei einer guten PV-Anlage in der Schweiz schon nach 2-4 Jahren amortisiert.

I.3 Lebenserwartung

Hersteller von Solarmodulen garantieren momentan bis zu 25 Jahren Leistung der Module (z.B. 25a 80%). Die Lebensdauer eines Moduls liegt aber voraussichtlich bei über 30 Jahren. PV-Anlagen sind praktisch unterhalts- und verschleissfrei. Die Wechselrichter müssen nach etwa 12-13 Jahren ausgewechselt werden.

II Grafiken und Erläuterungen

Zusammenstellung einiger Grafiken aus den Berechnungen der unterschiedlichen Potentiale.

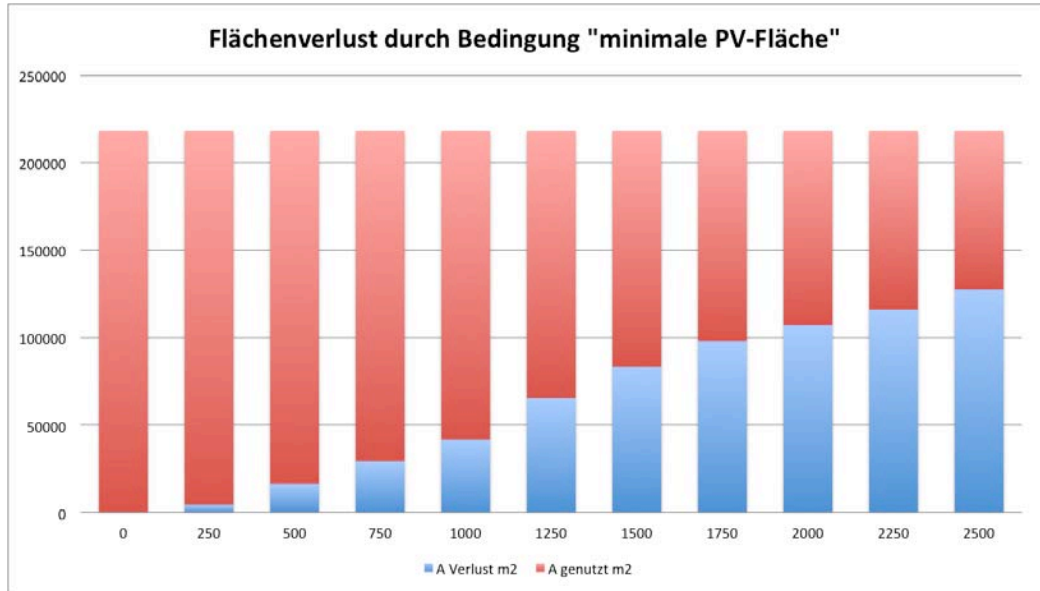


Abb. II.1: Flächenverluste für unterschiedliche minimale PV Flächen basierend auf dem technischen Potential berechnet.

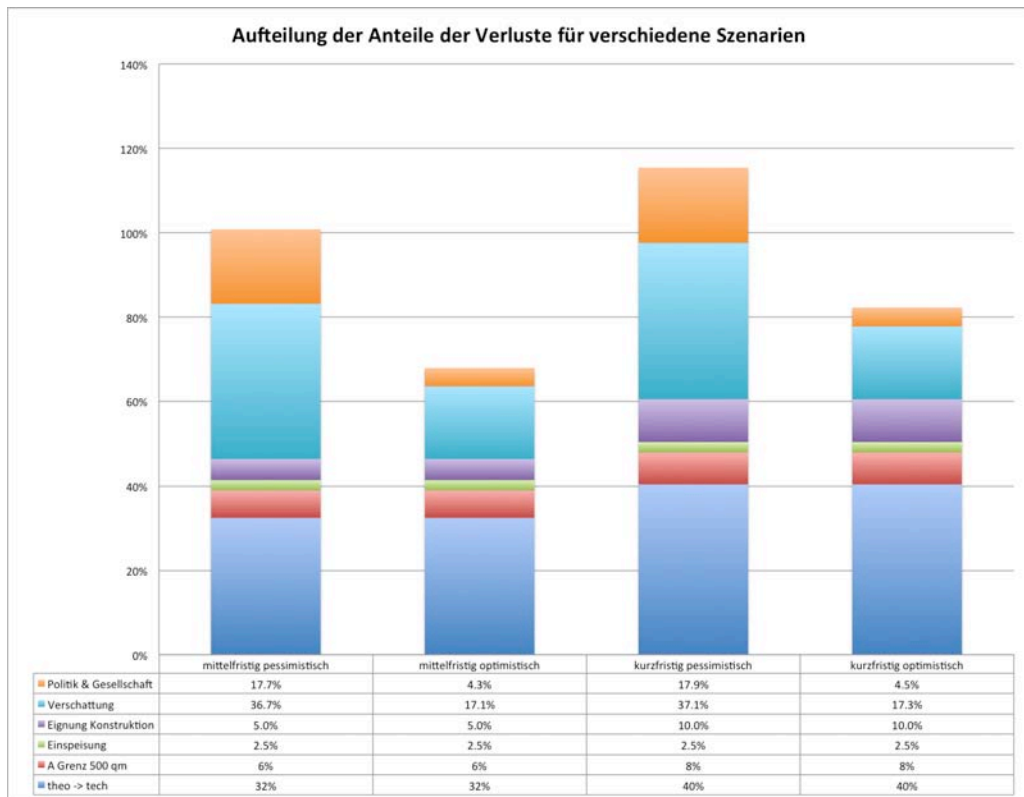


Abb. II.2: Aufteilung der Anteile der Verluste durch die nicht-technischen Faktoren für die verschiedenen Szenarien. Die blaue Basis stellt den Übergang theoretisch zu technisch dar, der hellblaue obere Balken ist die Verschattung, der orange Balken stellt die politischen Rahmenbedingungen dar.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
AC	Alternating Current, Wechselstrom
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DC	Direct Current, Gleichstrom
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FEDRO	Federal Roads Office
IEA	Internationale Energieagentur
ISO	Internationale Organisation für Normung
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
KUBA	Sammelbegriff für Systeme zu Erhaltung, Nutzung und Betrieb von Kunstbauten.
LBK	Lärmbelastungskataster
LSW	Lärmschutzwände
MISTRA	Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr
OFEN	L'Office fédéral de l'énergie
OFROU	Office fédéral des routes
PR	Performance Ratio, Verhältnis des tatsächlichen zum theoretisch möglichen Energieertrag
PV	Photovoltaik
RBBS	Räumliches Basisbezugssystem Nationalstrassen
SN	Schweizer Norm
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WR	Wechselrichter

Literaturverzeichnis

-
- [1] Bundesamt für Strassen ASTRA (2002). Richtlinie: Normalprofile, Rastplätze und Raststätten der Nationalstrassen. Letzter Zugriff am 28.11.2012, auf http://www.astra.admin.ch/dienstleistungen/00129/00183/00515/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCDdnt6hGym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--
-
- [2] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011). Lärmbelastungskataster MISTRA LBK Sofortlösung Anwendungshandbuch. Letzter Zugriff am 28.11.2012, auf http://www.astra.admin.ch/dienstleistungen/00129/00183/01313/index.html?download=NHzLpZeg7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCDe3t,gmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--&lang=de
-
- [3] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012). Räumliches Basisbezugssystem Nationalstrassen RBBS. Letzter Zugriff am 28.11.2012, auf http://www.astra2.admin.ch/rbbs/N1/n1_9.html?webgrab=ignore
-
- [4] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012). Räumliches Basisbezugssystem Nationalstrassen RBBS. Letzter Zugriff am 28.11.2012, auf http://www.astra2.admin.ch/rbbs/N1/tableau_n1.pdf
-
- [5] Bundesamt für Umwelt BAFU (2009). Lärmbelastung in der Schweiz. Letzter Zugriff am 28.11.2012, auf <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01036/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCGdoF9gmym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19Xl2ldvoaCVZ,s-.pdf>
-
- [6] Bundesamt für Energie BFE (2012). Markterhebung Sonnenenergie 2011. Letzter Zugriff am 28.11.2012, auf http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_407518507.pdf&endung=Markterhebung%20Sonnenenergie%202011
-
- [7] International Energy Agency IEA (2012). TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2011. Letzter Zugriff am 28.11.2012, auf http://www.iea-pvps.org/index.php?id=1&eID=dam_frontend_push&docID=1239
-
- [8] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012). Strassen und Verkehr 2012 - Zahlen und Fakten. Letzter Zugriff am 28.11.2012, auf http://www.astra.admin.ch/dokumentation/00119/05558/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCEdIB7gmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 29.11.2012

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2010/009, ITRD Nr. 15
 Projekttitel: Potential von Photovoltaik an Schallschutzwänden entlang der Nationalstrassen
 Enddatum: 23.11.2012

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Basierend auf der MISTRA LBK Sofortlösung des ASTRA ist mittels einer eigens entwickelten Datenbanklösung das theoretische, das technische und das realisierbare Potential von Photovoltaik Anlagen an Lärmschutzwänden ermittelt worden. Dazu sind verschiedene Kriterien für die Beurteilung von Lärmschutzwänden zur Eignung für eine Kombination mit PV untersucht worden. Basierend auf real existierenden PV Lärmschutz Anlagen sind unterschiedliche vereinfachte PV Anlagentypen festgelegt worden, welche auf die sich ergebenden Potentiale an Nennleistung an PV Schallschutz Anlagen untersucht wurden.

Basierend auf den gemachten Annahmen, konnte ein theoretisches Potential von 444 MWp ermittelt werden. Das technische Potential berücksichtigt zusätzliche Einschränkungen durch reale Gegebenheiten von verfügbaren Komponenten. Es wurde zwischen einem kurzfristigen technischen Potential mit idealen Voraussetzungen für PV Anlagen und einem mittelfristigen technischen Potential mit guten Voraussetzungen für PV Anlagen unterschieden. Das technische Potential von PV Schallschutz Anlagen beträgt 211 MWp, respektive 240 MWp mit den mittelfristigen Parametern. Für das realisierbare Potential wurden noch zusätzliche, nicht-technische Faktoren wie Verschattung durch Hindernisse oder Akzeptanz der PV Anlage mit berücksichtigt. Daraus resultiert in einem optimistischen Szenario ein PV Potential von 165 MWp und im pessimistischen Szenario 100 MWp.

Die ermittelte Potentiale entsprechen einem erwarteten elektrischen Jahresertrag von 413 GWh für das theoretische Potential, 233 GWh respektive 201 GWh für das technische Potential und 156 GWh respektive 103 GWh für das realisierbare Potential.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das Hauptziel der Forschungsarbeit zur Ermittlung des Potentials von Photovoltaik an Lärmschutzwänden entlang der Nationalstrassen konnte vollständig erreicht werden. Da der vorhandene Datensatz der Lärmschutzwände zur Zeit noch nicht vollständig ist, mussten Annahmen für eine Hochrechnung getroffen werden. Eine flächendeckende Analyse der bestgeeigneten Lärmschutzwände für die Kombination mit PV konnte nicht durchgeführt werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Basierend auf den vorgestellten Kriterien zur Beurteilung der Eignung von Lärmschutzwänden für die Kombination mit PV Anlagen kann festgestellt werden, dass viele der Lärmschutzwände grundsätzlich geeignet sind für eine Kombination mit PV. Eine periodische Neuberechnung der Potentiale kann bei einer Veränderung der Datenlage (Vollständigkeit der Daten zu den Lärmschutzwänden) sinnvoll sein. Es wird empfohlen, eine verbindliche Abklärung der Eignung von Lärmschutzwänden zur Kombination mit PV im Planungsprozess einer Sanierung oder eines Neubaus einer Lärmschutzmassnahme zu erarbeiten. Für die Qualitätssicherung sind entsprechende Anforderungen an die Vorabklärungen, zum Beispiel in Form einer Machbarkeitsstudie zu definieren.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Nordmann

Vorname: Thomas

Amt, Firma, Institut: TNC Consulting AG, General Wille-Strasse 59, 8706 Feldmeilen

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Der Auftragnehmer hat die Ermittlung des Anwendungspotentials von Kombination Photovoltaik und Schallschutz an Schweizer Nationalstrassen mit gutem Erfolg durchgeführt. Besonders anspruchsvoll war die teilweise ungenügende Datenlage über das Inventar der von ASTRA übernommenen LSW-Daten der 26 Kantone. Der Schlussbericht enthält über die reine Potentialermittlung hinaus wichtige Hinweise für ASTRA, um im weiteren Prozess das gefundene Anwendungspotential in die Praxis umsetzen zu können. Diese Hinweise betreffen sowohl den Planungsprozess als auch die ökonomischen Prozesse zur Vor- und Refinanzierung der zukünftigen Anlagen.

Umsetzung:

Angesichts der durch die nationale Energiestrategie 2050 vorgegebenen Ziele bei der Photovoltaik, versucht das ASTRA die vorgeschlagenen Prozesse soweit möglich in die Praxis umzusetzen und gute Randbedingungen für die erfolgreiche Umsetzung der Photovoltaik-Lärmschutzprojekte zu fördern. Ein erster Schritt ist möglicherweise die schnelle Umsetzung von einzelnen vorgezogenen Pilotprojekten, um Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit den Contractoren für den Bau und die Finanzierung der Anlagen sammeln zu können.

weitergehender Forschungsbedarf:

Wenn das Inventar bestehender und zukünftiger Schallschutzanlagen vollständig erstellt ist, sollte die Potentialabschätzung mit den entwickelten Tools nochmals aktualisiert und ergänzt werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Joseph

Vorname: Cédric

Amt, Firma, Institut: ASTRA, Standards, Forschung, Sicherheit

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

1/2

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Forschungsberichte seit 2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ? Moteurs et carburants pour la mobilité de demain What drives us on ? Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormassstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'aggressivité au volant Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route" Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011

23.076.0 / 04.12.12

Ge Fo SBT

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Forschungsberichte seit 2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ? Moteurs et carburants pour la mobilité de demain What drives us on ? Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010
1328	SVI 2000/657	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'agressivité au volant Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route" Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011