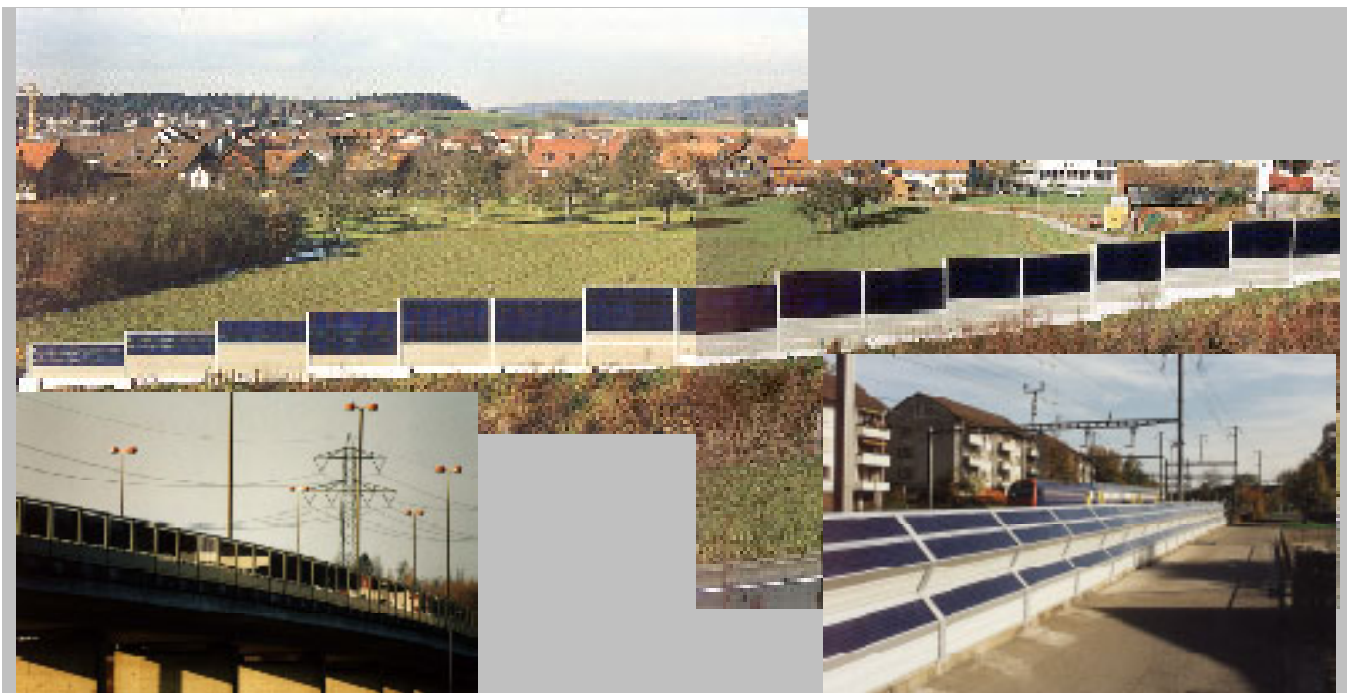


Schlussbericht PV P+D, DIS 17225 / 59391, Dezember 2002

# Drei integrierte PV-Schallschutz Versuchsfelder

## Bau und Erprobung

ausgearbeitet durch:  
**Thomas Nordmann, Andreas Frölich, Luzius Clavadetscher**  
TNC Consulting AG  
Seestrasse 141, 8703 Erlenbach





## Drei integrierte PV-Schallschutz Versuchsfelder

**Strom  
statt  
Lärm**



### Übersicht

Die Kombination von Photovoltaik und Schallschutz wird in der Schweiz seit mehr als 12 Jahren erprobt und angewandt. Mit der 100 kW-Anlage an der A13 bei Domat/Ems wurde im Jahre 1989 die weltweit erste solche Anlage errichtet. Bezüglich der Qualität der Komponenten und der Ertragsstabilität liegen von diesem Projekt sehr gute Erfahrungen vor. Auch weitere Folgeprojekte in der Schweiz und Europa wurden erfolgreich realisiert.

Um die ökonomischen Vorteile der Idee Photovoltaik - Schallschutz voll wahrzunehmen, sind aber bedeutende Weiterentwicklungen notwendig. Integration der Module statt Befestigung an der Wand, Serienfertigung, Standardisierung etc. sind die notwendigen Schritte. Um diese Entwicklungen voranzutreiben wurde von der TNC Consulting AG im Jahr 1993 das Projekt «Integrale Photovoltaik-Schallschutzelemente für den Einsatz entlang von Verkehrsträgern» gestartet. Für die einzelnen Phasen des Projektes wurden unterschiedliche Projektorganisationen und Projektfinanzierungen gesucht und gefunden.

Das Gesamtprojekt wurde in der Schweiz und in Deutschland gemeinsam durchgeführt. In der Schweiz wurde das Projekt vom NEFF (Nationaler Energieforschungsfonds), den Bundesämtern für Energie und für Strassen und dem ewz-Stromsparfonds gefördert. Der deutsche Projektteil wurde von der TNC Energie Consulting GmbH geleitet und vom deutschen Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie BMBF und der Bayernwerk AG finanziert.

Im vorliegenden Schlussbericht sind die Arbeiten für die Planung, den Bau, den Betrieb und die Messkampagne beschrieben. Die drei 10 kWp Versuchsanlagen an Verkehrswegen in der Schweiz wurden nördlich von Zürich in den Gemeinden Wallisellen und Brütisellen errichtet.

## ABSTRACT

After an international ideas competition by TNC Switzerland and Germany in 1996, six companies were given the opportunity to construct a prototype of their newly developed integrated PV-soundbarrier concepts. The main goal was to develop highly integrated concepts, allowing the reduction of PV soundbarrier systems costs, as well as the demonstration of specific concepts for different noise situations.

This project is strongly correlated with a German project. Three of the concepts of the competition are demonstrated along a highway near Munich, constructed in 1997. The three Swiss installations had to be constructed at different locations, reflecting three typical situations for soundbarriers.

The first Swiss installation was the world first Bi-facial PV-Soundbarrier. It was built on a highway bridge at Wallisellen-Aubugg in 1997. The operational experience of the installation is positive. But due to the different efficiencies of the two cell sides, its specific yield lies somewhat behind a conventional PV installation.

The second Swiss plant was finished in autumn 1998. The zig-zag construction is situated along the railway line in Wallisellen in a densely inhabited area with some local shadowing. Its performance and its specific yield is comparatively low due to a combination of several reasons (geometry of the concept, inverter, high module temperature, local shadows).

The 3rd installation was constructed along the A1 at Brüttisellen in 1999. Its vertical panels are equipped with amorphous modules. The report shows that the performance of the system is reasonable, but the mechanical construction has to be improved. A small trial field with cells directly laminated onto the steel panel, also installed at Brüttisellen, could be the key development for this concept.

This final report includes the evaluation and comparison of the monitored data of the last 24 months of operation.

This TNC project was co-financed by the Swiss Federal Office of Energy, the Swiss Federal Roads Authority and the electricity saving fund by the city of Zurich (ewz-Stromsparfonds).

# Vorwort

Dieser abschliessende Bericht über die drei Versuchsanlagen im Raum Zürich fasst die Aktivitäten von TNC Consulting AG im Bereich des Photovoltaik-Schallschutzes zusammen. Die hier dargestellten Aktivitäten und Erfahrungen gehen auf die Tätigkeit der TNC Consulting AG zurück, die bereits 1987 dem Bundesamt für Energie die Realisierung des Konzeptes «Strom statt Lärm» vorgeschlagen hat. In der Zwischenzeit werden solche Projekte leider vor allem bei den europäischen Nachbar-Ländern und Japan realisiert. Die im Moment mit 220 kW grösste Photovoltaik-Anlage befindet sich in Holland (in der Nähe des Flughafens Schiphol). Weitere europäische Projekte in Holland, Spanien und Deutschland sind in der Ausführungsplanung. In der Schweiz wurde 2001 an der Autobahn A1 (in Safenwil) ein 75 kW-Photovoltaik-Schallschutzprojekt realisiert. Dort durfte TNC Consulting AG das ingenieurmässige Projekt ausarbeiten und die Ausschreibung durchführen. Das Konzept «Strom statt Lärm» beginnt sich langsam europaweit durchzusetzen.

Leider hat die Entwicklung in der Schweiz durch die Ergebnisse der Volksabstimmung vom 24.9.2000 mit einem 3-fachen NEIN und vor allem mit der Ablehnung der Förderabgabe einen herben Rückschlag erlitten.

Zusätzlich musste die Photovoltaik Branche im September 2002 die Ablehnung des EMG (Elektrizitätsmarktgesetz) hinnehmen. Besonders für das Konzept von gebäudeunabhängigen grösseren Photovoltaik-Schallschutzanlagen ist damit eine weitere Chance für die Projektfinanzierung in der Schweiz weggefallen.

Unsere Problemstellungen für die Zukunft sind in erster Linie nicht technischer sondern finanzieller Art. Es wird bei den unbefriedigenden Rahmenbedingungen immer schwieriger grössere Projekte in der Schweiz zu realisieren.

Erlenbach im Dezember 2002

Th. Nordmann

## Zusammenfassung

Die Kombination von Photovoltaik und Schallschutz wird in der Schweiz seit mehr als 12 Jahren erprobt und angewandt. Mit der 100 kW-Anlage an der A13 bei Domat/Ems wurde im Jahre 1989 die weltweit erste solche Anlage errichtet. Bezüglich der Qualität der Komponenten und der Ertragsstabilität liegen von diesem Projekt sehr gute Erfahrungen vor. Auch weitere Folgeprojekte in der Schweiz und Europa wurden erfolgreich realisiert.

Um die ökonomischen Vorteile der Idee Photovoltaik - Schallschutz voll wahrzunehmen, sind aber bedeutende Weiterentwicklungen notwendig. Integration der Module statt Befestigung an der Wand, Serienfertigung, Standardisierung etc. sind die notwendigen Schritte. Um diese Entwicklungen voranzutreiben wurde von der TNC Consulting AG im Jahr 1993 das Projekt «Integrale Photovoltaik-Schallschutzelemente für den Einsatz entlang von Verkehrsträgern» gestartet. Für die einzelnen Phasen des Projektes wurden unterschiedliche Projektorganisationen und Projektfinanzierungen gesucht und gefunden.

Das Gesamtprojekt wurde in der Schweiz und in Deutschland gemeinsam durchgeführt. In der Schweiz wurde das Projekt vom NEFF (Nationaler Energieforschungsfonds), den Bundesämtern für Energie und für Strassen und dem ewz-Stromsparmögensfonds gefördert. Der deutsche Projektteil wurde von der TNC Energie Consulting GmbH geleitet und vom deutschen Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie BMBF und der Bayernwerk AG finanziert.

Im vorliegenden Schlussbericht sind die Arbeiten für die Planung, den Bau, den Betrieb und die Messkampagne beschrieben. Die drei Versuchsanlagen an Verkehrswegen in der Schweiz wurden nördlich von Zürich in den Gemeinden Wallisellen und Brüttsellen errichtet.

Auf der Autobahnbrücke Aubugg (A1c) steht seit 1997 die weltweit erste Bifacial Photovoltaik -



Schallschutzanlage. Bifacial-Solarzellen sind auf beiden Seiten lichtempfindlich. Im Schallschutz werden sie in Nord-Süd-Richtung aufgestellt (Patent: TNC). Sie sind damit auf die Morgen- und die Abendsonne ausgerichtet, am Mittag erbringen sie einen reduzierten Ertrag. Trotzdem ist ihr Jahresertrag gleich hoch wie bei einer konventionellen südgerichteten Solarzelle. Die ersten Resultate bestätigen die vorangehenden theoretischen Überlegungen und die Voruntersuchungen. Da der Wirkungsgrad der beiden Zellenseiten bei den Prototypzellen noch ungleich ist, resultiert eine Einbusse von etwa 10% des Jahresertrages.

Die zweite Schweizer Anlage wurde in Wallisellen an der Bahnlinie Wallisellen - Dübendorf errichtet. Sie

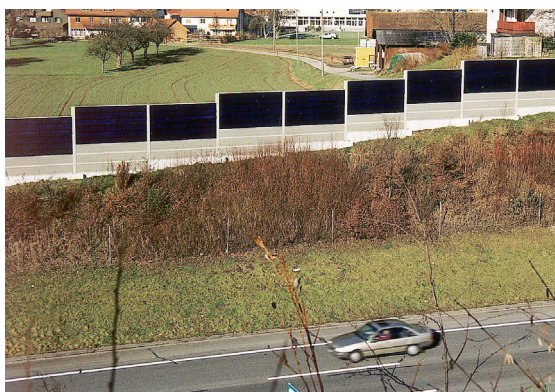


besteht aus zwei im Zickzack angeordneten Photovoltaik (PV)-Modulstreifen. Die Module sind auf Standard-Schallschutzkassetten aus Aluminium geklebt. Die Anlage weist eine Leistung von 9.6 kWp auf. Die 45 Kleinwechselrichter führen dazu, dass das Konzept sehr modular ist und nur eine minimale zentrale Infrastruktur (Stromeinspeisestelle) braucht.

Die dritte Anlage konnte im Rahmen eines Schallschutzprojektes des Tiefbauamtes des Kantons Zürich in die Schallschutzwand Steinacher an der A1 in Brüttsellen integriert werden. Die Standardkassetten stehen hier senkrecht, was den erwarteten Ertrag reduziert. Dafür entsteht

aber eine sehr einfache Konstruktion, welche sich von einer konventionellen Schallschutzwand nur wenig unterscheidet. Hier wurden neuartige amorphe PV-Module zum ersten Mal an einer Schallschutzwand eingesetzt.

Auch in Deutschland wurden drei Prototyp-Projekte realisiert, womit insgesamt sechs Demonstrationsanlagen zur Verfügung stehen.



In den vorangehenden Projektphasen waren neue PV-Schallschutzkonzepte entwickelt und untersucht worden. Ein wichtiger Teil davon war ein Ideenwettbewerb, bei welchem Arbeitsgemeinschaften von PV-Firmen und Schallschutzhersteller aufgefordert waren, neue, integrale PV-Schallschutz-Konzepte zu entwickeln. Die in der Phase IV errichteten Anlagen gehören zu den Siegerprojekten des Wettbewerbs.

Durch Messungen und Gutachten der EMPA und weiterer Fachstellen konnte im Projekt gezeigt werden, dass die Schallschutzfunktion auch von PV-Schallschutzanlagen in hohem Masse erfüllt wird. In der Hälfte aller Lärmschutz-Situationen ist die schall-

und die sonnenexponierte Seite nicht identisch: hier sind keine Einschränkungen bezüglich der Schallschutzeigenschaften zu erwarten. Für den Fall dass die stromerzeugende Seite auch lärmabsorbierend sein muss, gibt es Zick-Zack - Konzepte, welche eine sehr hohe Schallabsorption aufweisen, indem die nach unten weisenden Flächen hochabsorbierend ausgeführt werden. Schallreflexion tritt bei senkrechten PV-Schallschutz - Wänden (Bifacial-Wände, senkrechte Wände) auf, analog zu konventionellen Glaswänden, wie sie auf Brücken teilweise eingesetzt werden. In solchen Fällen muss die geforderte Absorption projektspezifisch durch die Festlegung eines maximalen Anteils der schallreflektierenden Fläche festgelegt werden.

Die Grösse der Anlagen und der Pilotcharakter lassen nur beschränkte Aussagen über die kommerziell erreichbaren Kosten zu. Der Grundaufwand für die Netzeinspeisung und die Projektleitung/Planung waren hoch. Die erzielbaren Preise für Grossprojekte sind aber abschätzbar.

Grundsätzlich kommt der Substitutionseffekt, d.h. die Kostenreduktion durch die Erfüllung von zwei Funktionen mit dem gleichen Element nur dann zum Tragen, wenn eine hoch integrierte Wand gebaut wird. Konkret müssen die Funktionen Schallschutz und Stromproduktion vom gleichen Bauelement erfüllt werden, wie es vor allem bei der Bifacial-, teilweise aber auch bei der senkrechten Anlage in Brüttsellen der Fall ist. Es gibt aber auch weitere Massnahmen, wie z.B. die Serienfertigung in der Werkstatt und effiziente Befestigungs- und Verkabelungsmöglichkeiten, welche die Kosten deutlich reduzieren können. Bezüglich der Finanzierung der Projekte wird bei zukünftigen Projekten davon ausgegangen, dass Drittparteien die Wand erstellen und vom Betreiber des Verkehrswegs eine Flächenpauschale für die Erfüllung der Schallschutzeigenschaften erhalten. Wird dieses Gutschriftskonzept mit Marktpreisen angewandt, so resultiert für die Photovoltaik ein attraktiver Preis.

Die Erfahrungen mit dem Bau der Anlagen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Der Schlüssel zum Erfolg liegt in einem Konzept, welches sich zumindest anhand eines Musterelementes bewährt und welches zum grössten Teil in der Werkstatt vorgefertigt ist. Im besten Fall werden auf der Baustelle nur die Elemente in die vorbereiteten Wandstützen eingesetzt und mit Steckern verbunden. Dem Diebstahlschutz muss ein grosses Augenmerk gewährt werden. Bei den drei Schweizer Anlagen sind infolge der hohen Integration bis jetzt keine Vorkommnisse zu erwähnen. Ein aktuelles Thema ist aber absichtliche oder unbeabsichtigte Beschädigung der Module: Die untersten Module müssen so hoch angebracht werden, dass von der Strasse wegfliegende Steine keinen Schaden verursachen können. Bei gut zugänglichen senkrechten Wänden ist das Besprayen mit Graffiti nicht auszuschliessen. Ein baulicher Zugangsschutz muss vorgesehen werden. Zudem ist auf Materialien zu achten, welche gut gereinigt werden können.

Im Rahmen eines europäischen Projektes der EU (Thermie B) wurde das Anwendungspotential von PV-Schallschutz in sechs europäischen Ländern, darunter die Schweiz, untersucht. Werden in der Schweiz alle geeigneten bestehenden und die in den nächsten fünf Jahren geplanten Wände aus - oder nachgerüstet, so können pro Jahr 67'000 MWh Strom produziert werden, genug um ca. 20'000 Haushalte mit Strom zu versorgen.

Das Projekt hat die Erfahrungen im Bereich Photovoltaik - Schallschutz massgeblich erweitert und das Interesse einer breiten Öffentlichkeit gesteigert. Für den Durchbruch der Photovoltaik sind noch weitere Schritte notwendig. Durch die genannten Vorteile des Konzeptes PV-Schallschutz kann aber erwartet werden, dass hier die Kostenreduktionen bei grossen Anlagen schnell und deutlich zum Tragen kommen.

## Résumé

La combinaison d'écrans insonorisants et de cellules photovoltaïques est testée et appliquée en Suisse depuis plus de 10 ans. L'installation de 100 kW sur la A13 à Domat/Ems, réalisée en 1989, a été la première de ce type dans le monde. Ce projet a permis d'acquérir des expériences précieuses en ce qui concerne la qualité des composants et la stabilité du rendement. D'autres projets ont ensuite été réalisés avec succès en Suisse et à l'étranger.

Des développements importants sont toutefois encore nécessaires avant de pouvoir mettre entièrement à profit les avantages économiques découlant de l'idée des écrans insonorisants photovoltaïques. Des étapes telles que l'intégration des modules au lieu de leur fixation contre des écrans, la fabrication en grande série, la normalisation, etc. sont encore nécessaires. Pour faire avancer ces développements, TNC Consulting SA a démarré en 1993 le projet «Éléments d'écrans insonorisants photovoltaïques intégrés pour la mise en œuvre le long des voies de transport». L'ensemble de ce projet a été réalisé communément en Suisse et en Allemagne. En Suisse, le projet a été subventionné par le NEFF (fonds national pour l'énergie), les offices fédéraux de l'énergie et des routes ainsi que par le fonds d'économie d'énergie de EWZ. (ewz-Stromsparfonds)

Le présent rapport décrit la phase IV, qui a obtenu le soutien de l'Office fédéral des routes OFROU. Il englobe la construction de trois installations pilotes, situées le long de voies de circulation en Suisse. Ces installations ont été érigées au Nord de Zürich, dans les communes de Wallisellen et Brüttsellen.



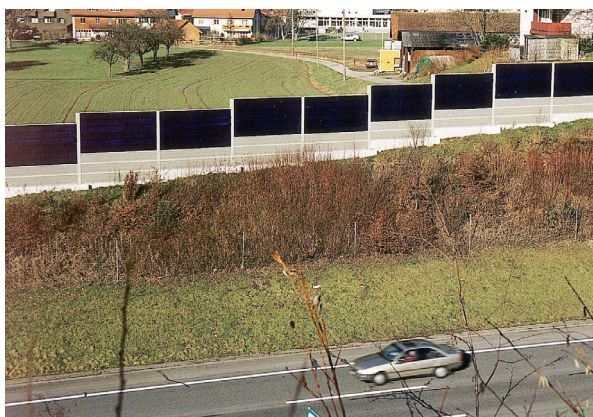
La première installation d'écrans insonorisants photovoltaïques bifaciaux au monde fonctionne depuis 1997 sur le pont autoroutier d'Aubrugg (A1c). Les cellules solaires bifaciales sont sensibles à la lumière sur les deux faces. Elles sont fixées sur des écrans insonorisants et leur tranche est orientée dans la direction Nord-Sud (brevet TNC). Elles font ainsi face au soleil le matin et l'après midi, à midi leur production est réduite. Malgré cela, leur production annuelle est équivalente à celle des cellules conventionnelles faisant face au sud, comme le montrent les résultats des études préliminaires.



La deuxième installation suisse est située le long de la ligne de chemin de fer Wallisellen - Dübendorf. Elle est constituée de deux bandes de modules photovoltaïques disposées en zig-zag et collées contre des cassettes insonorisantes standard en aluminium. Cette installation dispose de 45 petits onduleurs et n'exige qu'une infrastructure centrale minimale (poste d'insertion du courant).

La troisième installation a été intégrée dans l'écran insonorisant Steinacher sur l'autoroute A1 à Brüttsellen, dans le cadre d'un projet d'insonorisation du service des travaux publics du canton de Zurich. Ici, les cassettes standard, munies

de modules photovoltaïques amorphes, sont disposées verticalement, ce qui réduit la production maximale prévisible. Par contre, la construction est très simple et son aspect ne se différencie que très peu de celle d'un écran insonorisant conventionnel.



Trois projets pilotes ont également été réalisés en Allemagne. Six Ce projet a permis de montrer que la fonction d'insonorisation peut être prise en charge dans une large mesure par des installations d'insonorisation photovoltaïques. Dans la moitié des cas d'insonorisation, le côté bruit et le côté exposé au soleil ne sont pas identiques: dans ces cas, aucune limitation des caractéristiques d'insonorisation n'est à prévoir. Lorsque le côté production de courant et le côté bruit sont identiques, il existe des solutions en zig-zag, qui présentent un excellent coefficient d'absorption du bruit. Les surfaces dirigées vers le bas sont réalisées avec un pouvoir d'absorption du son particulièrement élevé. La réflexion du bruit contre les parois photovoltaïques est semblable

à celle des murs en verre conventionnels, tels qu'ils existent sur les ponts notamment.

La taille de ces installations et leur caractère d'essai pilote n'autorisent que des prévisions limitées en ce qui concerne les coûts réels. Le prix qui sera atteint pour des installations de grande envergure est toutefois prévisible. L'effet de substitution du prix n'est valable qu'en cas de construction d'une paroi hautement intégrée. Dans ce cas, les fonctions d'insonorisation et de production de courant sont remplies par le même élément de construction. Ceci est surtout applicable aux installations bifaciales et, dans une moindre mesure, aux installations verticales telles que celle de Brüttsellen.

Nous pouvons résumer les expériences faites avec la construction de ces installations comme suit: la clé du succès se situe dans un concept qui peut faire ses preuves au moyen d'un élément échantillon au moins et qui est préfabriqué en grande partie en atelier. Dans le meilleur des cas, les éléments photovoltaïques sont simplement fixés sur le chantier contre les éléments des parois et reliés par des fiches. Par ailleurs, la protection contre le vol et contre les dommages doit faire l'objet d'une attention particulière.

Dans le cadre d'un projet européen de l'UE (Thermie B), le potentiel d'applications de l'insonorisation photovoltaïque a été analysé dans six pays européens, dont la Suisse. Si l'ensemble des installations appropriées existantes et les parois projetées ou équipées ultérieurement sont réalisées, il sera possible de produire annuellement 67'000 MWh d'énergie électrique, assez pour alimenter 20'000 ménages en électricité.

Ce projet a permis d'acquérir des expériences supplémentaires importantes en matière d'écrans insonorisants photovoltaïques et d'augmenter l'intérêt dans un large public. D'autres étapes sont encore nécessaires pour obtenir une percée dans le domaine de la photovoltaïque. Dans l'application de l'insonorisation photovoltaïque, on peut s'attendre à ce que les réductions des coûts des installations de grande taille se révéleront rapidement et clairement porteuses.

<b>Übersicht</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>Bau und Erprobung von 3 integrierten PV-Schallschutz-Versuchsanlagen</b>	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>Résumé</b>	<b>8</b>
<b>1. Die Idee Photovoltaik - Schallschutz</b>	<b>13</b>
Die Vorteile des Konzeptes PV-Schallschutz sind hier kurz dargestellt	13
<b>2. Das Gesamtprojekt «Integrale Photovoltaik-Schallschutzelemente für den Einsatz entlang von Verkehrsträgern»</b>	<b>14</b>
2.1 Gesamtziel des Vorhabens	14
2.2 Projektfinanzierung	15
2.3 Ziele der einzelnen Projektphasen	15
2.4 Resultate der Phase I	16
2.5 Resultate der Phase II	18
2.6 Resultate der Phase III	18
2.7 Die Wettbewerbsresultate im Überblick	18
2.7 Die Phasen IV und V	19
2.8 Stand des Gesamtprojektes	19
<b>3. Planungs- und Realisierungsablauf in der Schweiz</b>	<b>20</b>
3.1 Standortevaluation	20
3.2 Der Schweizer Standort	21
<b>4. Die drei Anlagen im Ueberblick</b>	<b>22</b>
<b>5. Die erste Nord-Süd verlaufende Bifacial PV-Schallschutz-Anlage</b>	<b>24</b>
<b>6. Die Zick-Zack-Anlage an der Bahnlinie Wallisellen Dübendorf</b>	<b>26</b>
<b>7. Die senkrechte Anlage mit amorphen PV-Modulen an der A1 in Brütisellen</b>	<b>28</b>
<b>8. Schalltechnische Messungen</b>	<b>31</b>
8.1 Schweizer Teil	31
8.2 Messungen an den Anlagen in Deutschland	32
<b>9. Projektresultate und Erfahrungen</b>	<b>33</b>
9.1 Zusammenfassung der wichtigsten technischen und betrieblichen Erkenntnisse aus dem Bau der Wände	33
9.2 Preisentwicklung und Wirtschaftlichkeit	34
9.3 Schalltechnische Erkenntnisse	35
<b>10. Potentialstudie PV-Schallschutz</b>	<b>36</b>
<b>11. EXPO 2000 (Hannover, Deutschland)</b>	<b>37</b>
<b>12. Perspektiven</b>	<b>37</b>

<b>13. Messungen</b>	<b>37</b>
13.1 Bifacial PV-Schallschutzanlage Aubrugg	38
13.2 PV-Schallschutzanlage SBB Wallisellen	38
13.3 PV-Schallschutzanlage A1 Brüttisellen	39
<b>14. Auswertungen</b>	<b>39</b>
14.1 Anlage Aubrugg	40
Grafiken Anlage Aubrugg	41
14.2 Anlage Wallisellen	42
Grafiken Anlage Wallisellen	43
14.3 Anlage Brüttisellen	44
Grafiken Anlage Brüttisellen	45
14.4 Messdaten der drei Anlagen in Deutschland	46
<b>15. Symbole und Einheiten</b>	<b>47</b>
<b>16. Referenzen und Publikationen und Veranstaltungen</b>	<b>47</b>
16.1 Phase eins bis drei	47
16.2 Phase vier und fünf	48
16.3 Potentialstudien	48
16.4 Publikationen Photovoltaik/Schallschutz	48
16.5 Veranstaltungen	49
16.6 Referenzen	49
<b>A1. Kurze Einführung in die Photovoltaik</b>	<b>50</b>
A 1.1 Photovoltaik - Strom aus Sonnenlicht	50
A 1.2 Inselanlagen	50
A 1.3 Netzverbundanlagen	50
A 1.4 Solares Energieangebot	51
A 1.5 Photovoltaischer Wirkungsgrad	51
A 1.6 Lebenserwartung einer Photovoltaikanlage	51
<b>A 2. Schallschutz an Verkehrswegen</b>	<b>52</b>
A 2.1 Lärmschutz mit Schallschutzwänden	52
A 2.2 Schallschutz-Technologie	52
A 2.3 Schalltechnische Anforderungen	52
<b>A3 Photovoltaik-Schallschutz Info 1/97 (TNC GmbH)</b>	<b>54</b>
<b>A4 Photovoltaik-Schallschutz Info 1/98 (TNC GmbH)</b>	<b>54</b>
<b>A5 European Potential of PV-Noise Barriers: Goals and Background (Thermie B Project 12/99 TNC)</b>	<b>54</b>
<b>A6 European Potential of PV-Noise Barriers: Resultes for Europe (Thermie B Project 12/99 TNC)</b>	<b>54</b>
<b>A7 Die Europäische Potentialstudie PV auf Lärmschutzwänden: Resultate Schweiz (Thermie B Project 12/99 TNC)</b>	<b>54</b>



## 1. Die Idee Photovoltaik - Schallschutz

Seit der Inbetriebnahme der ersten 100 kW-Photovoltaik (PV) - Netzverbundanlage auf einer Schallschutzwand im Herbst 1989 (Mark I Domat/Ems, Bild 1, Ref. [20, 21, 22, 27, 28]), wurden wertvolle Betriebserfahrungen gesammelt sowie kontinuierlich Messdaten erfasst und ausgewertet. Dieses Know-How floss in das Folgeprojekt Mark II, einer 100 kWp-PV-Netzverbundanlage entlang der Eisenbahnlinie Bellinzona-Locarno im Tessin und in die 100 kWp PV-Schallschutzanlage an der A2 bei Giebenach (BL) ein. [27].



Abb. 1: Die erste PV-Schallschutzwand an der A13 bei Domat/Ems (Standardleistung 100 kW, erbaut 1989)

### Die Vorteile des Konzeptes PV-Schallschutz sind hier kurz dargestellt:

- **Doppelnutzen:** Eine vorhandene Infrastruktur wird zweimal genutzt: für den Schallschutz und für die Stromproduktion, ohne zusätzlichen Landverbrauch.
- **Serienfertigung:** PV-Schallschutzelemente sind Bauteile, welche in grossen Serien gefertigt werden können und damit ein hohes Rationalisierungspotential aufweisen. Dies führt zu ökonomisch interessanten Produkten.
- **Potential:** Schallschutz ist in den meisten europäischen Ländern erst lückenhaft eingeführt. Mit dem steigenden Verkehrsaufkommen wird dieses Thema immer wichtiger, auch in Ländern wie Frankreich und Italien, wo die Sensibilisierung bis vor kurzem noch tief war (vgl. Thermie B Projekt Europäische Potentialstudie, [16], [17], [18], [19], Anhang).
- **Öffentliche Bauherrschaften:** Schallschutz wird zum grössten Teil von der öffentlichen Hand gebaut und finanziert. Die geforderte Vorreiterfunktion des Staates in Verbindung mit einem bedeutenden Bauvolumen erlaubt es, in diesem Bereich einen grossen und publikumswirksamen Beitrag zur Diversifizierung der Energieproduktion und zur Produktion von Energie aus erneuerbaren inländischen Quellen zu leisten.

Mit dem Bau der Grossanlagen in der Schweiz und auch in Europa (z.B. in Saarbrücken D, Seewalchen A [23] und in Utrecht NL [24]) zeigten sich die notwendigen Stossrichtungen für weitere Entwicklungen der Technologie:

- **Material- und Kostensubstitution, optimale Integration:** Für die volle Realisierung der Kostenvorteile und um eine hohe Akzeptanz der Technologie zu erreichen, müssen die Wände von Beginn an als integrierte Wände gebaut werden. Der nachträgliche Bau der PV-Anlage verursacht Zusatzkosten und weitere Umtriebe.
- **Schallabsorption:** Für die Hälfte aller Schallschutzwände gilt, dass der Schall und die Sonnenstrahlung aus der gleichen Richtung kommen. Für diese Situationen müssen Lösungen gefunden werden, welche die Schallabsorption trotz grossflächiger (schallreflektierender) Verglasung ermöglichen.
- **Bauablauf:** Effiziente Lösungen verlangen nach dem gleichzeitigen Bau der Lärmschutzwand und des PV-Teils. Die Wandelemente müssen weitgehend vorgefertigt werden.
- **Schallschutz-Gutschrift:** Mit den Bauherrschaften müssen Finanzierungsmodelle gefunden werden, nach welchen die Kosten des substituierten Schallschutzes den PV-Anlagekosten gutgeschrieben werden können. Dies ist vor allem im Falle eines Drittbetreibers notwendig, welcher die Anlage auf eigene Kosten baut und betreibt und dafür eine Konzession der öffentlichen Hand erhält.
- **Zusammenarbeit PV-Hersteller - Schallschutzhersteller:** Hersteller von Schallschutzwänden und von Photovoltaikanlagen gehören in der Regel zu sehr unterschiedlichen Branchen. Die Zusammenarbeit zwischen diesen beiden Zweigen erfordert ein hohes Mass an Flexibilität und gegenseitigem Interesse. Solche Arbeitsgemeinschaften müssen geschaffen und gefördert werden.

## 2. Das Gesamtprojekt «Integrale Photovoltaik-Schallschutzelemente für den Einsatz entlang von Verkehrsträgern»

### 2.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Vorhaben wurde als NEFF-Projekt Nr. 656 «Integrale Photovoltaik-Schallschutzelemente für den Einsatz entlang von Verkehrsträgern» im Jahre 1993 gestartet. Das Gesamtprojekt wurde in 5 Phasen eingeteilt. Die hier beschriebene Phase IV beinhaltet den Aufbau von drei Versuchsfeldern und die dazugehörige Infrastruktur für den Betrieb der Testfelder wie Wechselrichter, Systemtechnik und Platzeranschliessung. Die anschliessende Phase V umfasst die Durchführung der zweijährigen Messkampagne, die Fortentwicklung zusammen mit den Industriepartnern, sowie die Weiterentwicklung der Konzepte und Verbreitung der Erkenntnisse. Eine Übersicht über das Gesamtprojekt ist in Abb. 2 dargestellt.

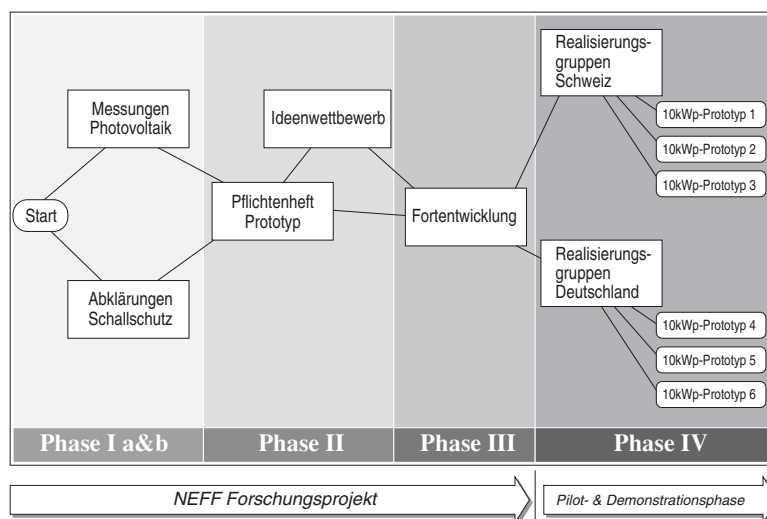


Abb. 2: Projekttafel des Gesamtprojektes. Im vorliegenden Bericht ist in erster Linie der Schweizer Teil der Phase IV beschrieben, welche vom Bundesamt für Energie, dem Bundesamt für Strassen und dem Elektrizitätswerk der Stadt Zürich finanziert wurde.

Die Ziele des Gesamtprojektes lassen sich wie folgt umschreiben:

- Weiterentwicklung der PV-Schallschutztechnologie
- Untersuchung von äusseren Einflüssen wie Verschmutzung, Schnee etc.
- Untersuchung und Erprobung der Bifacial-Technologie
- Etablierung von Projektpartnerschaften
- Entwicklung und Erprobung von verschiedenen Konzepten zur Integration von PV-Schallschutzelementen zusammen mit Industriepartnern
- Vergleich der verschiedenen konstruktiven Konzepte
- Verbesserung der ökonomischen Grundlagen der Projekte: Kostenreduktion durch möglichst gute Integration und Serienfertigung, Erarbeitung von Grundlagen für die Schallschutzgutschrift.
- Demonstration und Verbreitung der Resultate

## 2.2 Projektfinanzierung

Die einzelnen Phasen des Gesamtprojekts wurden unterschiedlich finanziert. Die Phasen 1 bis 3, welche der Analyse von grundlegenden Fragen, der Konzeptentwicklung und der Förderung von Industriepartnerschaften dienten, wurden wie erwähnt als NEFF-Projekt (Nationaler Energieforschungsfonds) beantragt und bewilligt. Der Bau der Versuchsfelder in der Schweiz (Phase IV) wurden von den folgenden Institutionen kofinanziert:

- Bundesamt für Strassen (ASTRA)
- dem Bundesamt für Energie (BFE)
- ewz-Stromsparfonds

Die Phase V (Messkampagnen der Versuchsfelder) wird vom Bundesamt für Energie alleine finanziert.

Das deutsche Parallelprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und die Bayernwerk AG finanziert.

## 2.3 Ziele der einzelnen Projektphasen

In der ersten der drei Phasen des Projektes ging es darum, prinzipiell neue Möglichkeiten zur Realisierung von integrierten PV-Schallschutzelementen einzuführen und zu untersuchen.

In der zweiten Phase sollten industrielle Hersteller in einem internationalen Wettbewerb angesprochen und motiviert werden, eigene Konzepte zu erarbeiten und geeignete Partner zu finden um diese Konzepte umzusetzen.

In der dritten Phase des Projektes war es das Ziel, diese Konzepte technisch weiterzuentwickeln und für die Realisierung vorzubereiten.

In der vierten Phase erfolgte nun die konkrete Planung, Ausschreibung und der Bau der Testfeldes sowie der zweijährige Betrieb der Versuchsanlagen.

Die im vorliegenden Bericht behandelte Phase IV war die Erprobungsphase für eine Auswahl der in den vorangehenden Projektphasen entwickelten Konzepte. Drei der bestplatzierten Wettbewerbersteilnehmer sollten die Gelegenheit erhalten, ihre Konzepte im Massstab von 10 kWp (Standardleistung) zu realisieren und in der Praxis zu erproben. Damit sollten das mechanische, elektrische und ökonomische Konzept der ausgewählten Varianten auf die Praxistauglichkeit getestet werden. Ein wichtiger Punkt war auch die Zusammenarbeit mit den Infrastrukturbetreibern, welche für das Gelingen der Projekte eine zentrale Stellung einnehmen. Drei weitere Versuchsanlagen wurden parallel zum hier beschriebenen Schweizer Projektteil von der TNC Energie Consulting GmbH in Deutschland (Bayern) gebaut.

Die anschliessende zweijährigen Messkampagne ist Bestandteil der Phase V des Projektes.

## 2.4 Resultate der Phase I

In Phase I wurden verschiedene Fragen zum Thema PV-Schallschutz (Verschmutzungseinfluss, Ertrag an Nord/Süd-verlaufenden Bifacial-Modulen u.a.) untersucht und erste Vorschläge für IPVS-Konzepte entwickelt.

Die Ziele der Projektphase waren:

1. Die Evaluation von neuen Konzepten:
  - a) Bifacial-PV-Module auf Schallschutzwänden, die in Nord/Süd-Richtung verlaufen.
  - b) Verbesserung der Moduloberfläche in Bezug auf Reflexion und Verschmutzung.
2. Messen von PV-Erträgen bei unterschiedlichen Modulmontagen.
3. Erstellen eines Strahlungskatasters im Bereich des Deutschen Verkehrsnetzes (deutscher Projektteil).

### Messinstallation entlang der Autobahn

Die Messresultate der PV-Anlage Mark I (A13, Domat/Ems) haben gezeigt, dass die Verschmutzung der Module keinen nennenswerten Einfluss auf den Ertrag hat. Strassenstaub und Pollen werden vom Regen gründlich weggeschwemmt. Inwiefern diese Erfahrung auch auf andere Montagearten zutrifft (Höhe, Neigung) war Gegenstand der Untersuchung.

Im Rahmen des Projektes wurde am Westende der 100 kW-PV-Anlage Mark I eine Messinstallation eingerichtet. Sie bestand aus einem Montagerahmen, auf dem vier Modulgruppen in verschiedenen Höhen vertikal montiert wurden. Diese wurden verglichen mit drei Modulgruppen in der geneigten Originalmontage.

Aus den Resultaten der **Messstation entlang der Autobahn** konnten folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Es kann keine signifikante Verschmutzung festgestellt werden.
2. Die Einstrahlungsdifferenz von der höchsten zur tiefsten Modulgruppe beträgt nur 1-3%.
3. Es gibt keine Anzeichen einer Beschädigung der Module.

### Ein neues Konzept: PV-Anwendung mit Bifacial-Solarzellen auf Schallschutzanlagen

Die Anwendung von PV-Technik im Bereich Schallschutz ist auf den ersten Blick auf Streckenabschnitte in Ost/West-Richtung beschränkt. Das Potential würde markant gesteigert, wenn auch in Nord-Süd-Richtung verlaufende Strassen genutzt werden könnten. Ein von der TNC entwickeltes Projekt ermöglicht diese erweiterte Anwendungsmöglichkeit. Grundidee des Konzeptes sind vertikal montierte Module längs der Autobahn (Abb. 3). Bestens dazu geeignet sind Module mit Bifacial-Zellen. Zellen also, welche auf beiden Seiten eine aktive Oberfläche aufweisen. Solche Zellen wurden vor Jahren entwickelt und hergestellt. Die Produktion wurde seit kurzem von der Firma ASE auf der Basis der MIS-Technologie wieder aufgenommen.

Anhand von Strahlungsdaten für vertikale Gebäudefassaden kann das Potential von solchen Bifacial-Modulen berechnet werden. Ausgehend von einem Modul, welches auf beiden Seiten den gleichen Wirkungsgrad aufweist, kann einfach der Energieertrag für die Ost- und die Westfassade addiert werden. Die Berechnung ergibt für ein Bifacial-Modul einen Jahresertrag von 106% jenes Ertrages, der ein

Standardmodul in der optimalen Südausrichtung liefert. Das bedeutet, dass das theoretische Potential des erwähnten Anwendungskonzeptes sogar grösser ist als die optimale Südausrichtung.

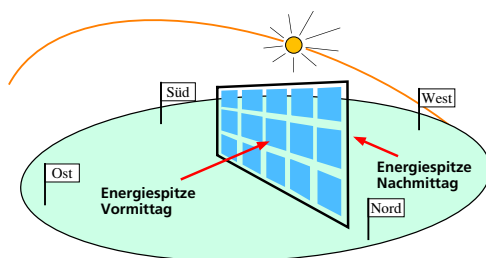


Abb. 3: PV - Schallschutzwände nach dem Bifacial - Prinzip: Die Strahlung trifft am Morgen vor allem auf die Ostseite und am Nachmittag auf die Westseite (Patentiert durch TNC).

Die aus dieser Anwendung resultierende Vergrößerung des technischen Potentials für die PV-Anwendung im Bereich Schallschutz ist bemerkenswert. Im Rahmen der europäischen Potentialstudie für Photovoltaik an Verkehrswegen (EU Thermie B - Projekt, Kap. 10), wurde auch das Potential an Bifacial-Anlagen eruiert. Die Schätzung des schweizerischen Potentials beläuft sich auf 64 MWp [16].

**Messungen an einem Bifacial-Prototyp**

Die Firma ASE produzierte ein Bifacial Prototyp mit einer Leistung von ca. 20 Wp. Dieses Modul wurde in eine Messinstallation integriert, mit dem Ziel, dessen Verhalten unter realistischen Bedingungen zu untersuchen. Das Modul wurde zusammen mit drei ESTI-Strahlungs-Sensoren auf einem Dreibeinstativ montiert. Es werden die folgenden Einstrahlungen gemessen: •Ost, vertikal, •West, vertikal, •Süd, Neigung 45°. Das Bifacial Modul wurde mittels einer steuerbaren Last im Arbeitspunkt (MPP) betrieben. Zusätzlich wurden die Globalstrahlung und die Aussentemperatur gemessen.

Die Messdaten der Bifacial-Messstation im Tagesverlauf zeigen die Idee der Bifacial-Anwendung deutlich. Die drei ESTI-Sensoren lieferten die Daten der Ost-, West- und Süd-Komponente der Einstrahlung. Das Angebot für eine bifacial Nord-Süd-Anwendung besteht an einem schönen Tag aus einer Vormittags- und einer Nachmittags-Spitze. Interessant ist nun der Vergleich dieser Ost/West-Summe mit der Süd-Einstrahlung. Abb. 4 zeigt einen Schönwetter-Tagesverlauf im Sommer. Im Winter ist die Summe der Ost/ West-Einstrahlung geringer als die Südausrichtung, Ende März sind beide etwa gleich, und im Sommer ist die Einstrahlungssumme für die Bifacial-Anwendung höher als für die konventionelle Südausrichtung.

Abb. 5 zeigt die Monatswerte der verschiedenen Ausrichtungen, wobei die Werte für die vertikale Ost- und West-Ausrichtung aufeinander gestellt wurden und so direkt mit der Südausrichtung verglichen werden können. Über die ganze Messperiode von Dezember 94 bis Juli 95 ergab sich eine Einstrahlung von 101 % für die Ost/West-Summe bezogen auf die 45° geneigte Südausrichtung. Für den gewählten Standort der Messstation in Stäfa wird (entsprechend dem Horizont und der Meteorologie) über das ganze Jahr ein Wert von knapp über 100 % geschätzt.

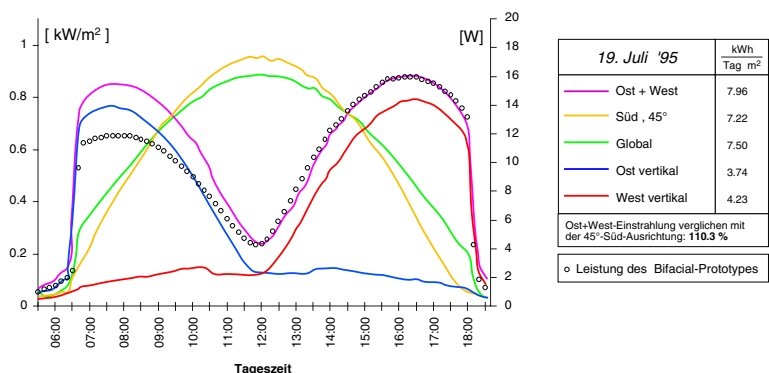


Abb. 4: Tagesverlauf einer Bifacial - PV - Anlage an einem schönen Sommertag

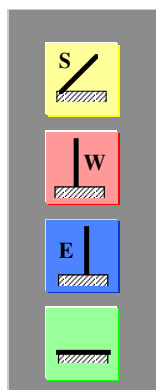
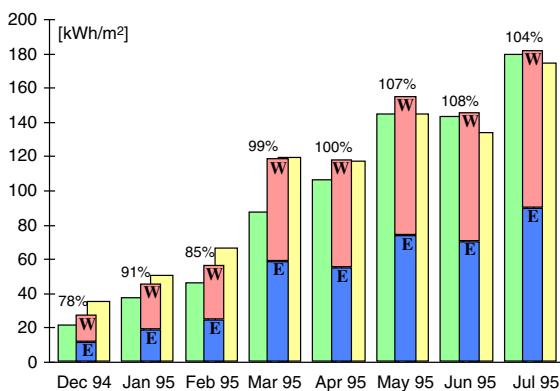


Abb. 5: Monatssummen der Einstrahlungen auf die vertikalen Ost- und West-Flächen, verglichen mit der 45° geneigten Südausrichtung.

## 2.5 Resultate der Phase II

In Phase II wurden Hersteller von Infrastruktureinrichtungen und Hersteller von PV-Modulen in einem internationalen Ideenwettbewerb angesprochen und motiviert, gemeinsam PV-integrierte Infrastruktureinrichtungen zu entwerfen.

Dieser Wettbewerb wurde 1995 in der Schweiz und parallel dazu in Deutschland ausgeschrieben: dort wurde er durchgeführt von der TNC Energie Consulting GmbH, der Schwesterfirma der oben genannten Firma. Insgesamt nahmen 19 Firmengemeinschaften mit total 31 Beiträgen am Wettbewerb teil (Abb. 6). Anfangs März 1996 wählte eine deutsch / schweizerische Jury von Experten verschiedener Fachrichtungen aus den Beiträgen insgesamt sechs Konzepte für die Weiterverfolgung aus. Von diesen Konzepten sollten drei in der Schweiz und drei in Deutschland realisiert werden.

## 2.6 Resultate der Phase III

In einer dritten Projektphase wurden die von der Jury in der Phase II ausgewählten Konzepte zur Realisierungsreife gebracht. Die Varianten wurden überarbeitet, und es wurden detaillierte Konstruktionspläne angefertigt. Gleichzeitig wurden aufgrund der spezifischen Anforderungen Standorte für die Realisierung der Versuchsanlagen gesucht. Dabei wurden die standortabhängigen Vor- und Nachteile der einzelnen Konzepte analysiert und berücksichtigt.

## 2.7 Die Wettbewerbsresultate im Überblick

Die 31 Beiträge lassen sich nach grundlegenden Konzepten einteilen. Von einer interdisziplinären Jury wurden von den erfolversprechenden Konzepten 6 Beiträge ausgewählt (in der Grafik durch Sonnen symbolisiert), von welchen nun Prototypen realisiert werden sollen.

### 1. 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 in der Schweiz durch die TNC Consulting AG.

### 2. Zick-Zack vertikal

Von diesem Typ wurde ein Beitrag der deutschen Firmengemeinschaft Alusyston GmbH / AMT GmbH / SET GmbH prämiert. Senkrechte Reihen von Solarzellen werden auf eine vertikal strukturierte Wand gesetzt. Die Strukturierung erlaubt bei verschieden verlaufenden Schallschutzwänden eine optimale Ausrichtung nach Süden.

### 3. Schindeln

Beim von der Firmengemeinschaft Züblin AG / Dorf Müller GmbH (Deutschland) eingereichten Beitrag wird die Belegung der Wand mit Solarzellen gegenüber einer Anlage vom Typ 1 um mehrere Lagen erweitert. Dieses Konzept eignet sich vor allem für die Nachrüstung bestehender Wände, kann jedoch auch bei neuen Anlagen kostengünstig realisiert werden.

### 4. Kassetten

Das vielversprechende Konzept der Lärmschutzkassetten vereint die Anforderungen an Lärmschutz und Photovoltaik in hohem Maße. Prämiert wurde der Vorschlag der Firmengemeinschaft Fabrimex AG (Schweiz) / PBE GmbH (Oesterreich). Bei diesem wird ein Typ einer Lärmschutzkassette entwickelt, welcher die für die Photovoltaik nutzbare Fläche mit einem optimalen Anstellwinkel besitzt. Die Solarzellen werden direkt auf die Kassette auflaminiert.

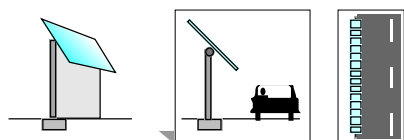
### 5. Zick-Zack horizontal

Das Konzept der wechselweise geneigten Flächenstreifen (Zick-Zack) verspricht durch den hohen Integrationsgrad niedrige Kosten. Es wurden 2 Beiträge ausgezeichnet, einer der deutschen Firmengemeinschaft Prof. Bitsch und Partner/GSS GmbH, der andere von der Schweizer Firmengemeinschaft Borra SA/Atlantis Energie AG. Bei beiden handelt es sich um Stahlbaukonstruktionen.

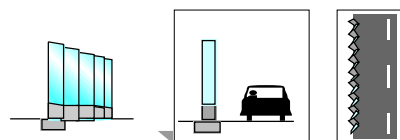
## 6. Senkrecht bifacial N-S

Das sehr innovative und vielversprechende Konzept 'Bifacial' ermöglicht die Anwendung von Photovoltaik - Schallschutz auch bei Nord-Süd-Strecken. Die beidseitig lichtempfindlichen Solarzellen erzielen bei diesem Konzept den gleich hohen Energieertrag wie eine optimal nach Süden ausgerichtete Anlage. Eingereicht wurde der Beitrag von der Firmengemeinschaft ASE GmbH / R. Kohlhauser GmbH (Deutschland).

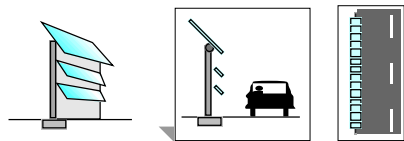
### 1. Aufgesetzt (realisiert)



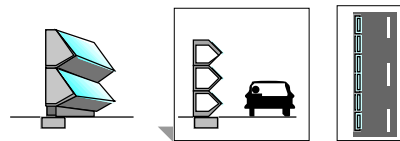
### 2. Zick-Zack vertikal



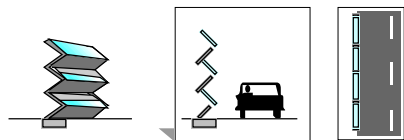
### 3. Schindeln



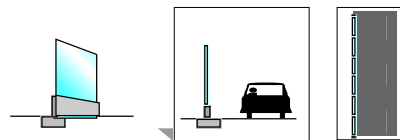
### 4. Kassetten



### 5. Zick-Zack horizontal



### 6. Senkrecht bifacial N-S



Grafik © 2002 TNC Consulting AG, Erlenbach

Abb.6: Zusammenfassung Ergebnis Internationaler Ideenwettbewerb  
«Integrierte PV-Schallschutz-Elemente»

## 2.7 Die Phasen IV und V

Der Schweizer Teil der Phase IV ist Gegenstand des vorliegenden Berichtes. Der deutsche Teil umfasste den Bau von drei Anlagen an der A96 am Ammersee (nähe München). Die Anlagen befinden sich seit 1997 am Netz. Sie wurden während einem Jahr intensiv ausgemessen. Die Resultate stehen für das Gesamtprojekt zur Verfügung und wurden verschiedentlich publiziert (Ref. [8], [9], Anhang).

Die Messkampagne an den drei CH-Anlagen wird von TNC ausserhalb des Projektes weitergeführt. Zwischenresultate der drei Anlagen Aubrugg, Wallisellen und Brüttsellen wurden in den BFE-Jahresberichten 1998, 1999 und 2000 publiziert [12].

## 2.8 Stand des Gesamtprojektes

Als Resultat des Vorhabens sind nun die sechs verschiedenen Konzepte neuartiger integrierter Photovoltaik-Schallschutzelemente in Betrieb, drei 10 kW Anlagen in der Schweiz und drei 10 kW Anlagen in Deutschland. Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, diese vielversprechende Möglichkeit der regenerativen Stromerzeugung zu erproben und zu vermessen, sowohl im Bereich der Schalltechnik wie auch im Bereich der Photovoltaik.

### 3. Planungs- und Realisierungsablauf in der Schweiz

Die Förderanträge für die hier beschriebene Phase IV wurden im Frühling 1996 eingereicht, aber erst im Sommer 1997 war die Finanzierung von allen Seiten verbindlich zugesagt. Gegenüber der Anfangsplanung wurde das Projekt in der Realisierung stark verzögert. Die Hauptgründe waren:

- Die Anlagen an drei Standorten erforderten je ein eigenes Baugesuch und weitere Bewilligungsverfahren. Man hatte mit einem Einzelprojekt gerechnet .
- Rekurse durch Anwohner (Wallisellen und Brüttisellen)
- Lieferverzögerungen des PV-Schallschutzherstellers in Wallisellen
- Lieferverzögerung des Stahlbauers in Brüttisellen
- Lieferverzögerung des PV-Schallschutzherstellers in Brüttisellen

Der tatsächliche Ablauf zeigt die Tabelle 1.

Firma Typ Ort	Konzept		
	ASE GmbH <b>Bifacial</b> Wallisellen-Aubugg	Borra SA / Atlantis AG <b>Zick-Zack</b> Wallisellen	AET GmbH <b>Vertikal-Kassetten</b> Brüttisellen
Standortevaluation	Frühling 97	Nov.96-März.97	Frühling 97
Grobplanung	Frühling 97	April 97-Nov.97	Frühling 98
Bewilligungen	Okt./Nov.97	Mai/Juni 98	Juni 98
Detailplanung	Aug.-Nov.97	Nov. 97-Juni 98	Juli 98-Jan. 99
Bau	Nov./Dez.97	Juli bis Okt. 98	Dez. 99
Inbetriebnahme/Abnahme	17.12.1997	24.9.1998	24.2.2000
Aufbau Messeinrichtung	Jan 98	Okt 98	Dez.99 .. Feb. 2000

Tab. 1: Projektablauf der Phase IV.

#### 3.1 Standortevaluation

Im Ideen-Wettbewerb waren 6 Konzepte mit der Note AA prämiert worden. Diese wurden den 6 Standorten in der Schweiz und Deutschland zugeordnet. Die drei deutschen Anlagen an der A96 (vgl. Kap. 2.7) sind alle nebeneinander autobahnzugewandt aufgebaut. Sie schützen die Besucher des Rastplatzes Walchstadt vom Lärm, erfüllen aber sonst vor allem einen Pilot- und Demonstrationszweck (Ref. [8] , [9], Anhang).

Für die Realisierung in der Schweiz wurden die Anlagen ASE Bifacial, das Zick-Zack-Kassetten-Konzept der Arbeitsgemeinschaft Borra/Atlantis und das Vertikal-Zick-Zack-Konzept der Firmengemeinschaft Alusyston/SET/AMT ausgewählt. Die Firmengemeinschaft Alusyston/SET/AMT zog sich aber schon in der Abklärungsphase vom Projekt zurück. Als Nachrücker wurde die Firma AET (Prämierung A) evaluiert, welche eine Vertikalkassette entwickelt hat.

Die Bifacial-Situation musste einerseits von Norden nach Süden verlaufen, andererseits durfte infolge der Schallreflexion der Oberfläche keine Besiedlung auf der gegenüberliegenden Seite vorhanden sein.

Das Zick-Zack-Konzept Borra ist verkehrszu- oder abgewandt einsetzbar. Es verwendet modulnahe Kleinwechselrichter und kann damit auch mit Teilabschattungen recht gut funktionieren. Es eignete sich deshalb für den von zeitweiser Abschattung betroffenen Standort an der SBB Linie Wallisellen- Dübendorf gut.

Das System AET reflektiert den Schall auf der Modulseite. Es kann also nur in Teilbereichen der Wand (Streifen), oder besser verkehrsabgewandt eingesetzt werden.

<b>Hersteller</b>	ASE GmbH Kohlhauer GmbH	Borra SA Atlantis AG	AET GmbH Hoesch GmbH
<b>Konzept</b>	Bifacial	Zick-Zack	Vertikal-Kassetten
<b>Schallschutzeigenschaften</b>			
Modulseite	reflektierend	teilabsorbierend	reflektierend
Hinterseite	reflektierend	hochabsorbierend	hochabsorbierend
<b>Einsatzgebiet *</b>	1,3	1,2,3	1,2,3
<b>Integration</b>	voll	mittel	mittel
<p>* Die Schallreflexion der PV-Modulflächen reduziert deren Einsatzgebiet. Gegenüberliegende Wohngebiete können dadurch mehr Lärmimmissionen erhalten.</p> <p><b>Situationstypen:</b></p> <p>1) Verkehrswege mit einseitiger Besiedlung 2) Verkehrswege mit beidseitiger Besiedlung 3) Brücken mit beidseitigem Schallschutz</p>			

Tab. 2: Die Konzepte und ihre Eigenschaften

Es wurden vorwiegend Standorte im Kanton Zürich und in den angrenzenden Regionen untersucht. Bedingung für das Schweizer Projekt war, dass nahe beieinander zwei südgerichtete Standorte und ein ost-west-gerichteter Standort (für die Bifacial-Anlage) gesucht werden mussten. Einer der Standorte wurde zudem bewusst an einer Bahnstrecke gesucht, um weitere Erfahrungen mit den spezifischen Begebenheiten der Bahnnähe (Eisenstaub, Präsenz von Hochspannungsleitungen u.a.) sammeln zu können.

### 3.2 Der Schweizer Standort

Die schlussendlich gewählte Situation im Norden von Zürich (beim Autobahnkreuz Aubrugg in Wallisellen) bot dabei die folgenden Vorteile:

- Nahezu abschattungsfreie Brückensituation für die Errichtung einer Bifacial-Anlage.
- Die Nähe zur Stadt bedeutet gute Erreichbarkeit und hohe Publikumswirksamkeit für das Demonstrationsvorhaben.
- Für die Bifacial-Anlage bot sich die Gelegenheit, den Inverter unter der Brücke in den Gewerbehallen zu installieren
- Für die beiden anderen, südgerichteten Situationen waren verschiedene Orte denkbar.

Die ursprünglich ins Auge gefassten südgerichteten Situationen erwiesen sich aus verschiedenen Gründen als ungünstig. Von den SBB wurde verständlicherweise die Forderung gestellt, dass eine solche Anlage in bewohntem Gebiet errichtet werden musste. Grundlage war der Lärmimmissionskataster der SBB, welcher soeben neu erarbeitet worden war. Eine ähnliche Argumentation wurde von den Autobahnbehörden angebracht.

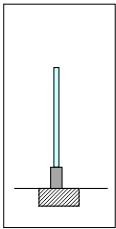
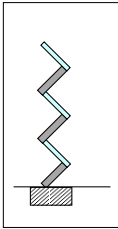
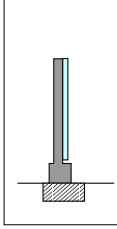
In Zusammenarbeit mit den SBB wurde deshalb der geplante Standort an der Bahnstrecke um ca. 1 km weiter nach Osten verschoben. Dort befindet sich eine Häusergruppe, welche dem Bahnlärm ausgesetzt ist, jedoch den Immissionsgrenzwert knapp nicht erreicht. Die Distanz zur Bifacial-Anlage beträgt ca. 2 km.

Für die dritte (senkrechte) Anlage bot das Tiefbauamt des Kantons Zürich eine sich in der Projektierung befindende Lärmschutzwand an der A1 in Brütisellen, rund 4.5 km von Aubrugg entfernt, an.

Damit lagen die Projekte nun aber deutlich weiter auseinander als ursprünglich geplant. Neben den so entstehenden meteorologischen Unterschieden entstanden aber auch drei separate Projekte, welche alle einen eigenen Ablauf hatten. Alle Bewilligungsverfahren und Abnahmen erfolgten mehrfach, was diesbezügliche Synergien verhinderte.

## 4. Die drei Anlagen im Ueberblick

Um einen einfachen Überblick über die Vor- und Nachteile der einzelnen Anlagen zu ermöglichen, sind hier die wichtigsten Eigenschaften im Überblick dargestellt.

Konzept Hersteller	Bifacial ASE (Pat. TNC)	Zick Zack Borra / Atlantis	Senkrecht AET
			
Standort Inbetriebnahme Elektrizitätswerk	Abrugg 17.12.97 Wallisellen	Wallisellen 24.9.98 Wallisellen	Brüttisellen 24.2.00 Brüttisellen
<b>Daten der realisierten Anlage</b>			
Länge (ohne Blindelemente) (m)	100	69	120
Höhe ab Sockel (m)	1.4	2	3
Leistung (kWp)	8.3	9.7	8.3
Leistungsdichte (W pro lfm) (W pro m <sup>2</sup> )	83.0 59.3	140.6 70.3	69.2 23.1
Schallschutz realisiert	beidseitig reflektierend	einseitig absorbierend	einseitig absorbierend
<b>Normierte Erwartungswerte</b>			
Erwarteter Jahresertrag (kWh pro kWp)	800	850	600
Leistungsdichte (W pro lfm) für eine 3 m hohe Wand	160	180	70
<b>Bewertungen</b>			
Vorteile	Nord-Süd Keine Auskrägung Retrofit möglich	Hohe Schallabsorption Hohe Leistungsdichte	Keine Auskrägung Retrofit möglich
Nachteile	schallreflektierend	Spezialstützen	Tiefer Flächenertrag
Zu beachten	Zellenwirkungsgrad	Abschattung unterer Reihen	Graffityschutz

Tab. 3:

*Eigenschaften und Bewertung der realisierten Anlagen. Die normierten Erwartungswerte werden angegeben, um einen fairen Vergleich der Anlagen zu ermöglichen. Die Werte sind aus den Daten der realisierten Anlagen hochgerechnet. Die Schallschutzparameter gelten nur für das realisierte Projekt. Bei Folgeprojekten können u. U. bessere Werte erzielt werden.*

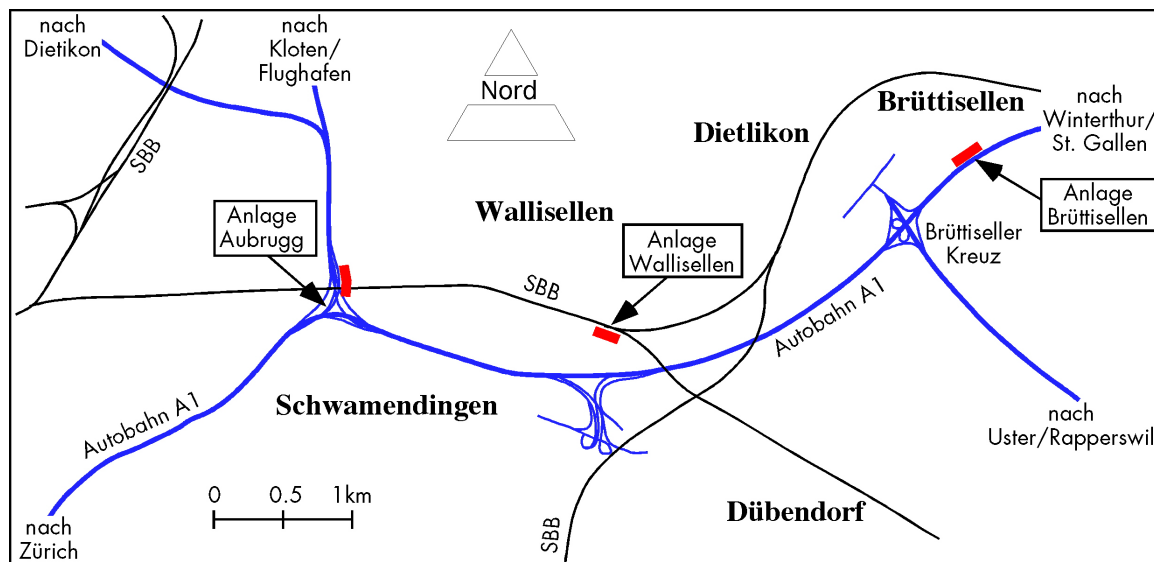


Abb. 7: Die Lage der drei Anlagen im Raum Zürich Nord

## 5. Die weltweit erste Nord-Süd verlaufende Bifacial PV-Schallschutz-Anlage

Die Autobahnbrücke der A1c, Zürich City - Zürich Flughafen, ist zu einem grossen Teil mit beidseitig an der Brücke befestigten Welleternit-Wänden ausgerüstet. Die Wände dienen nicht nur dem Schallschutz, sondern sie üben auch eine Sicherheitsfunktion aus. Ein Streckenstück dieser Wände, auf der rechten Fahrbahn gegen Zürich - Flughafen, wurde als ideale Situation für die Bifacial - PV-Schallschutz Versuchsanlage lokalisiert.

Die Anlage konnte als Retrofit in die bestehenden Stützen eingebaut werden. Die Wandelemente aus Eternit wurden auf einer Länge von 120 m durch PV-Schallschutzelemente mit integrierten Bifacial-Modulen ersetzt. Da die Baulinie nicht verändert wurde, war keine Baubewilligung notwendig.

Die Wände sind nur ca. 1.4 m hoch (ab OK Brückensockel). Für eine möglichst ökonomische Anlage wäre eine höhere Wand natürlich besser, da eine Anlage mit mehr Leistung pro Laufmeter gebaut werden könnte. Im Sinne des Pilot- und Demonstrationszweckes der Anlage ist die Situation aber sehr gut geeignet.



Abb. 8 (2 x 1)

Die Bifacial-PV-Anlage im Bau und Betrieb. Die Montage dauerte dank konsequenter Vormontage nur rund 6 Stunden. Rund zwei weitere Tage dauerte die elektrische Verkabelung der Wand.

Das eingesetzte Bifacial-Modul der Firma ASE GmbH weist die Besonderheiten auf, dass sich die beiden Seiten in Bezug auf den nominalen Wirkungsgrad und die Systemspannung deutlich unterscheiden. Die Module sind so ausgerichtet, dass die effizientere Seite auf der autobahnabgewandten Ostseite liegt, da hier kaum Verschmutzung zu erwarten ist und fast keine Abschattungen vorhanden sind.

Zellen/Modul (MPP,STC)		Vorderseite	Rückseite			
Modulleistung	W	179	145	Modul-Grösse	m	1.94 x 1.06
Modulspannung	V	54	58.4	Grösse nur Zellenbereich	m	1.64 x 0.814
Zellen-Wirkungsgrad	%	14	11.3			
Modul-Wirkungsgrad	%	13.5	10.9			
<b>Gesamtanlage</b>						
MPP-Leistung	kWp	8.95	7.25	Anzahl Strings	-	5
Anzahl Module / String	-		10	Gesamtlänge	m	120
Systemspannung	V	540	584	davon aktiv	m	100
Leistungsdichte	W/m	90	73	Höhe ab Sockel	m	1.49
<b>Inverter</b>						
Hersteller	Sputnik Engineering AG		Nennleistung	kW	10	
Typ	SolarMax 10					

Tabelle 4:

Projektdatei Aubrugg (Herstellerangaben).



Abb. 9 (2 x 2):  
Die Bifacial-PV-Anlage im Betrieb

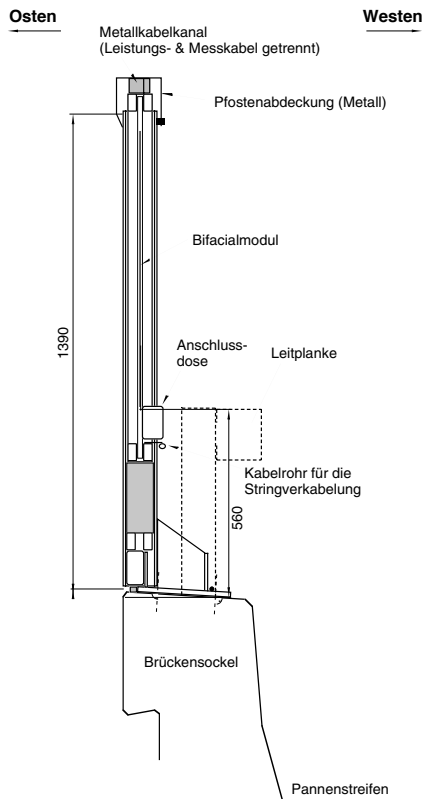


Abb.10:  
Querschnitt der Anlage Aubrugg. Die Verbindungen innerhalb der Strings erfolgen direkt von Anschlussdose zu Anschlussdose. Die Kabel zum Klemmenkasten verlaufen in einem Kabelkanal oberhalb der Wand.

## 6. Die Zick-Zack-Anlage an der Bahnlinie Wallisellen Dübendorf



*Abb.11 :  
Die Zick-Zack-Anlage der Arbeitsgemeinschaft Borra/Atlantis an der Bahnlinie Wallisellen - Dübendorf. Die Stahlstützen sind in Zick-Zack-Form geschweisst. Die PV-Module wurden auf Aluminium-Schallschutzkassetten geklebt.*

Die Anlage befindet sich an der Bahnlinie Wallisellen - Dübendorf, ca. 500 m östlich des Bahnhofes Wallisellen. Die hier zu lösenden Aufgaben waren in verschiedener Hinsicht anders gelagert als bei der Anlage Aubrugg. Ins Gewicht gefallen waren bei der Planung vor allem die hohen Sicherheitsanforderungen der Bahn sowie der erhöhte Bewilligungsaufwand für Projekte an der Bahn. Zudem wurde das Projekt durch einen Anwohnerrekurs verzögert. Das Projekt wurde in der Folge leicht abgeändert, um auf die Argumente der Rekurrenten einzugehen.

Die von der ARGE Borra SA / Atlantis Energie AG realisierte Anlage beinhaltet mehrere Innovationen:

- Sie stellt die erste PV-Schallschutzanlage an einer Bahnlinie dar. Die Erfahrungen werden aus diesem Grunde besonders wertvoll sein.
- Um die geforderte Modularität der Aufgabe PV-Schallschutz weiterzuführen wurden String-Inverter mit einer Leistung von je 180 W AC eingesetzt. Damit verläuft entlang der Anlage ein AC- und nicht mehr ein DC-Bus. Der Schaltschrank für die Netzeinspeisung und die Messung konnte dadurch kleiner werden.
- Die Anlage befindet sich an einem Ort, an dem im Winter teilweise deutliche Abschattungen auftreten. Durch das Kleininverter-Konzept sollen die Verluste vermindert werden.
- Eingesetzt wird eine Stahlstützen-Konstruktion, welche gleichzeitig die statische Last aufnimmt und die Zick-Zack-Form vorgibt.
- Es wurden Standard-Schallschutzkassetten aus Aluminium verwendet. Die PV-Lamine wurden aufgeklebt.

Der minimale Abstand vom Bahngleis und die maximale Höhe wurden von der SBB vorgegeben. Damit war die maximal erreichbare Leistungsdichte gegeben.

Aufgrund des Standortes und der Konstruktion muss mit einer Teilbeschattung gerechnet werden. Einerseits ist die Strahlung auf die schmalere untere Modulreihe geringer, da sie durch die obere Reihe leicht beschattet wird. Andererseits steht im westlichen Teil der Anlage ein Haus relativ nahe, so dass in den Wintermonaten eine zeitweise Teilbeschattung verursacht wird. Die Situation ist in diesem Sinne nicht ganz optimal, sie entspricht aber vielen realen Situationen.

Bei der Montage zeigte sich, dass das ästhetisch ansprechende Konzept noch einen gewissen Verbesserungsspielraum aufweist. Im Vergleich zu ähnlichen Anlagen dauerte die Montage auf der Baustelle sehr lange.

Im Rahmen der Messkampagne wird zusätzlich zu den Standardauswertungen vor allem die erwartete höhere Verschmutzung der Module durch den Eisenabrieb der Bahn zu diskutieren sein. Aber auch der Einfluss der nahen Hochspannung und der hohen Erdströme der Bahn muss beobachtet werden.

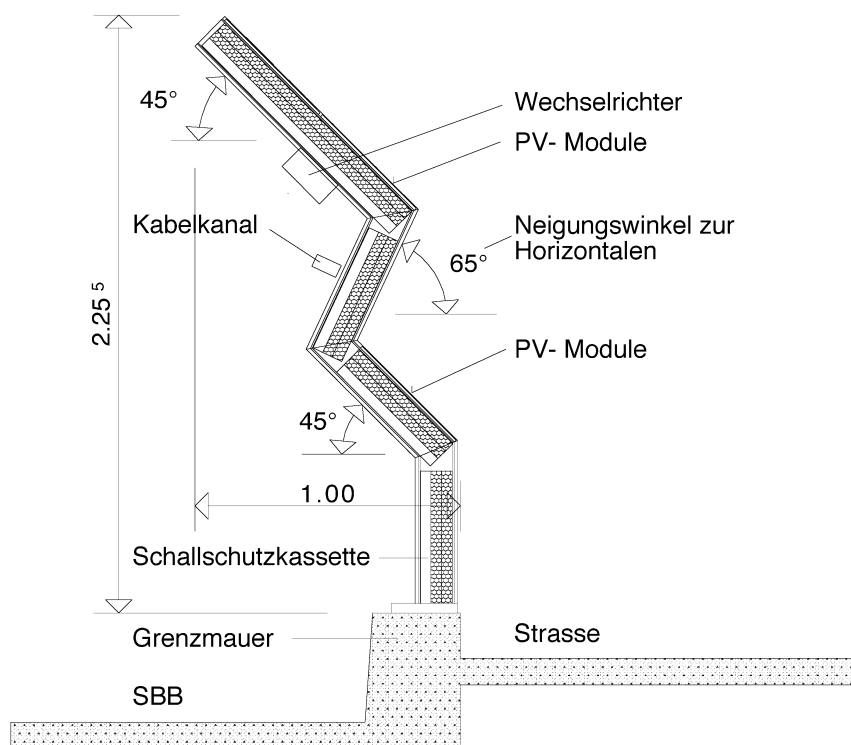


Abb. 12: Querschnitt der Anlage Wallisellen: Die Schallschutzelemente sind auf der Bahnseite schallabsorbierend, auf der Strassenseite reflektierend. Durch Verwendung von doppelseitig absorbierenden Kassetten kann auch auf der Moduleseite eine Teilabsorption erreicht werden.

#### Zellen/Modul

Modulleistung (STC)	Wp	71.5	Modulspannung (STC)	V	17
Hersteller Zelle		AstroPower	Modulgrösse	m	1.45 x 0.42
Hersteller Modul		Atlantis Solarsysteme AG	Modul-Wirkungsgrad	%	11.7

#### Gesamtanlage

Nennleistung (STC)	kWp	9.65	Gesamtlänge	m	72
Anzahl Module / String	-	3	davon aktiv	m	69
Anzahl Strings	-	45	Höhe ab Mauer	m	2.25
Systemspannung	V	51	Stützenabstand	m	3
			Leistungsdichte DC *	W/m	140

#### Inverter

Marke	Atlantis Energie AG	Nennleistung DC/AC pro Gerät	W	220/180
Hersteller	Sputnik Engineering AG	Anzahl Geräte	-	45
Typ	MINISINE 200	Nennleistung AC gesamt	kW	8.1

Tabelle 5: Anlagedaten Wallisellen

## 7. Die senkrechte Anlage mit amorphen PV-Modulen an der A1 in Brüttsellen

Die Anlage an der A1, Höhe Brüttsellen, wurde im Rahmen eines Bauvorhabens des Tiefbauamtes des Kantons Zürich als Teil der Lärmschutzwand erstellt. Das Projekt war seit 1997 durch einen Anwohnerrekurs blockiert. Dieser Rekurs konnte im Frühling 1998 erledigt werden. Die Detailplanung wurde anschliessend aufgenommen. Bau und Inbetriebsetzung konnten infolge diverser Verzögerungen erst Ende 1999 / Anfang 2000 erfolgen.

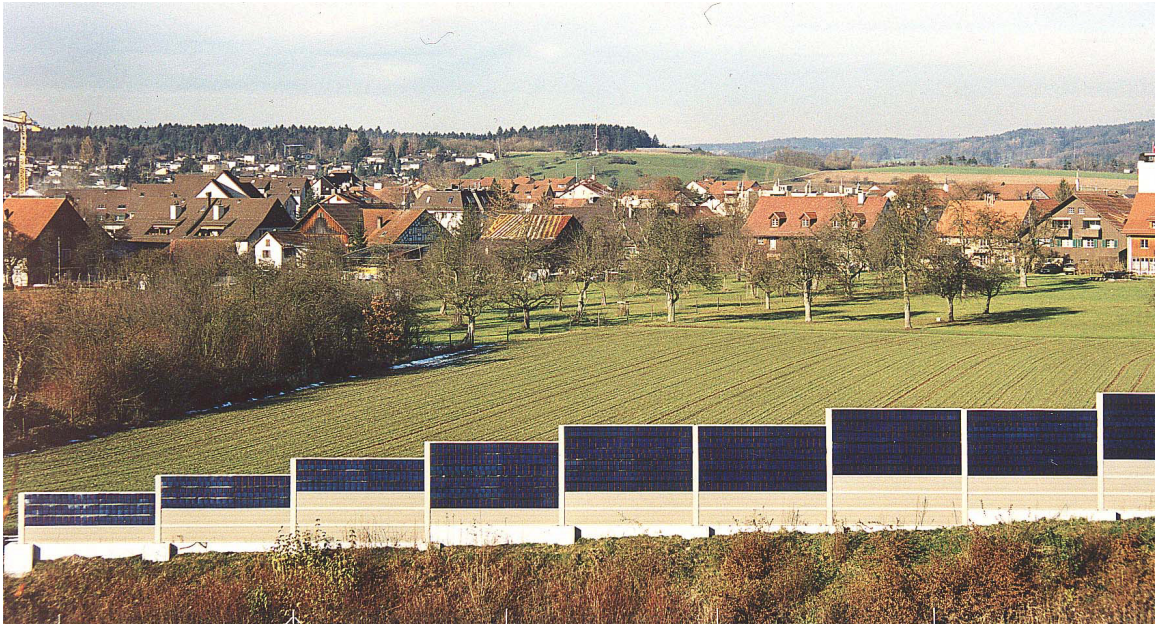


Abb. 13:

Die amorphe PV-Schallschutzanlage der Firma AET GmbH in Brüttsellen an der A1, kurz nach der Montage im Dezember 1999.

Die Konzession umfasst den Einsatz von PV-Schallschutzkassetten in einem Teil der Wand. Die Verwendung von amorphen (triple junction) UniSolar-Modulen stellt eine Innovation dar. Die Idee des Anbieters (AET GmbH) war es ursprünglich, PV-Zellen direkt auf das Kassettenblech zu laminieren. Da UniSolar für diese Anwendung keine Garantien abzugeben bereit war, wurde, um das Projektrisiko zu vermindern, nur ein Teil der Anlage so ausgeführt:

Teil 1: Bei der **Hauptanlage** von 10 kWp Leistung wurden die flexiblen UniSolar-Standardmodule auf konventionelle Alu-Lärmschutzkassetten aufgenietet. Da die Module nicht auf die Standardkassetten passten, mussten in der Breite je 2 Module teilweise überlappend befestigt werden.

Teil 2: **Sonderlamine** mit einer Leistung von total 0.55 kWp wurden auf einen Teil der Wand integriert. Hier wurden die Zellen direkt auf ein Stahlblech laminiert, welches abgebogen wurde und nun den vorderen Teil der Lärmschutzkassetten bildet.

Die Kassetten sind auf der Modulseite (Oberfläche aus Tefzel) lärmreflektierend.

**Feld 1: Standardlamine**

Zellen/Modul		Für alle elektrischen Werte gilt: MPP unter Standardbedingungen (STC)				
Modulleistung	Wp	17	Modulspannung	V	17	
Hersteller		UniSolar	Modulgrösse	m	2.19x0.305	
			Modul-Wirkungsgrad	%	6.7	
pro Schallschutzkassette						
PV-Leistung	Wp	59.5	Module in Serie		2	
Grösse	m	3.96 x 0.33	Anzahl Serieschaltungen		2	
Modul-Wirkungsgrad	%	4.6	PV-Schindeln teilweise abgedeckt			
Anlage						
Nennleistung (STC)	kWp	10.11	Gesamtlänge	m	120	
Anzahl Module / String	-	21	davon aktiv	m	116	
Anzahl Strings	-	8	Höhe ab Stützbrett	m	1 .. 2	
Systemspannung	V	536	Stützenabstand	m	4	
			Leistungsdichte DC *	W/m	87	
Inverter						
Hersteller	Sputnik Engineering AG			Nennleistung AC	kW	10
Typ	SolarMax 10					

\* ohne Berücksichtigung von Blindelementen etc.

**Feld 2: Sonderlamine**

Zellen/Modul		Für alle elektrischen Werte gilt: MPP unter Standardbedingungen (STC)			
Modulleistung	Wp	55	Modulspannung	V	17
Hersteller		UniSolar	Modulgrösse	m	3.965x0.33
			Modul-Wirkungsgrad	%	5
pro Schallschutzkassette					
PV-Leistung	Wp	55	Module in Serie		1
Grösse	m	3.96 x 0.33	Anzahl Serieschaltungen		2
Modul-Wirkungsgrad	%	4.2			
Anlage					
Nennleistung	kWp	0.55	Gesamtlänge	m	8
Anzahl Module / String	-	2	davon aktiv	m	8
Anzahl Strings	-	5	Höhe ab Stützbrett	m	2
Systemspannung	V	30	Stützenabstand	m	4
			Leistungsdichte DC *	W/m	69
Inverter					
Marke		Würth	Nennleistung DC	kW	0.84
Typ		WE 500 NWR	Nennleistung AC	kW	0.65

Tabelle 6: Anlagedaten Brüttsellen (Herstellerangaben, Vertragswerte)



Abb. 14: Die Anlage Brüttsellen bei der Montage. Durch die senkrechte Anordnung war die Montage einfach. Sie dauerte insgesamt ca. 3 Tage wobei jeweils 5 bis 6 Mann im Einsatz waren.

Die vom Vertragspartner vorgenommene Modulverschaltung erwies sich als sehr problematisch. Aufgrund der teilweise abgedeckten Zellen wurde trotz der Bypassdioden eine viel tiefere Leistung festgestellt als angeboten. Um die für den Inverter notwendige Systemspannung trotzdem zu erreichen, mussten mehr Kassetten als geplant in Serie geschaltet werden. Damit entsteht eine sehr hohe Leerlaufspannung, was vor allem bei niedrigen Temperaturen den Wechselrichter gefährdet. Vor der definitiven Inbetriebnahme musste eine Spannungsbegrenzung eingebaut werden.

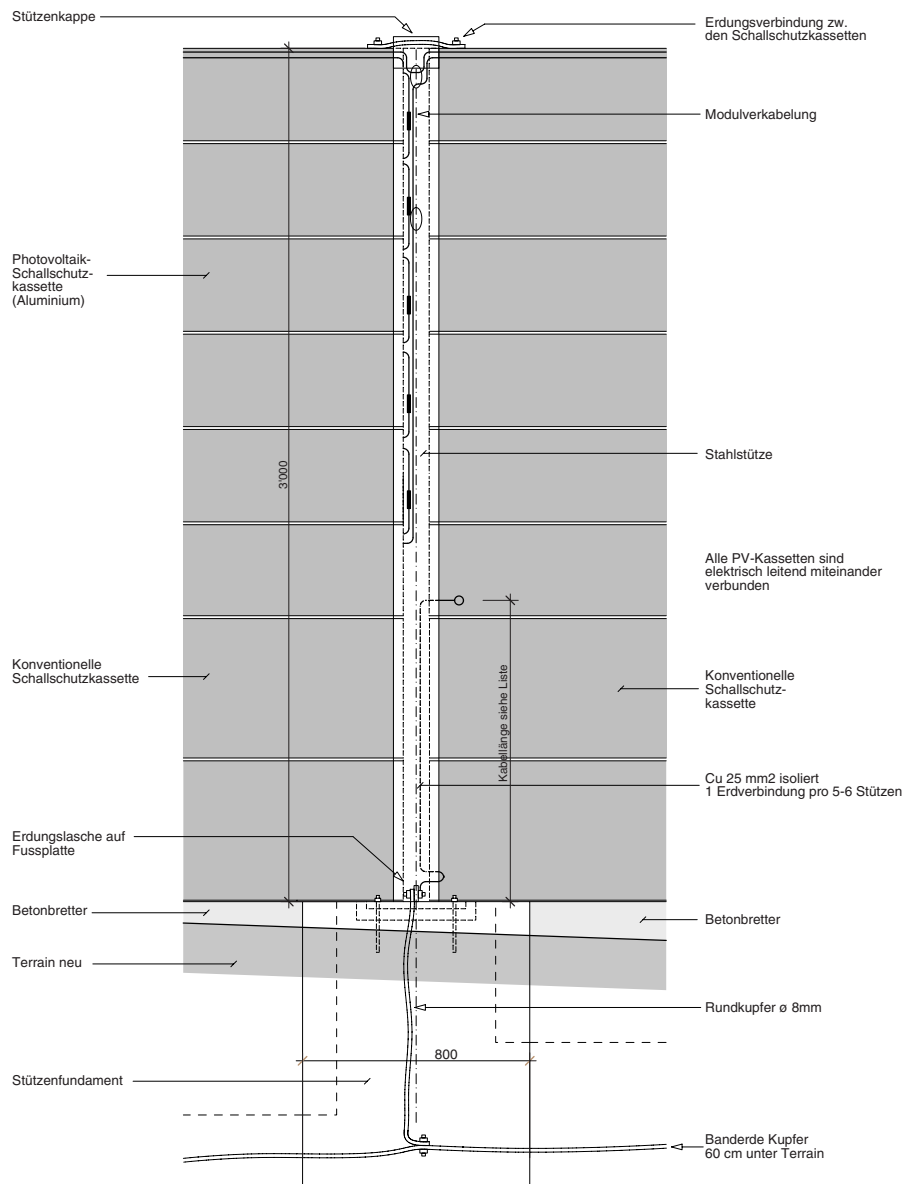


Abb. 15:

Detailansicht von Norden im Bereich der Stützen. Die Kassetten stehen senkrecht aufeinander wie bei einer konventionellen Schallschutzwand.

Die ersten Erfahrungen beim Bau und seit der Inbetriebnahme der Anlage zeigen, dass das Prinzip der senkrechten Kassetten zwar technisch einfach und sinnvoll ist, dass aber die Variante mit den Standard-Kunststofflamellen mechanisch nicht überzeugt. Die Lamellen lassen sich zuwenig gut befestigen. Andererseits ist der Teil mit den direkt auf das Blech laminierten Zellen mechanisch einwandfrei gelöst und bis jetzt ohne sichtbare Schäden.

Ein Problem mit den senkrechten Wänden zeigt sich schon kurz nach dem Bau des ersten Teils der Wand. Die Wand wurde mehrmals besprayed. Die Entfernung der Farbe erwies sich als relativ einfach, da auf der teflonartigen Oberfläche die Farbe schlecht haftet. Ein Teil der Wand wurde gleichzeitig mit der Reinigung mit einem Wachs behandelt, welcher die Entfernung bei allfälligen Wiederholungen erleichtern soll.

Ein durch das Tiefbauamt erstellter Zaun hat seither Wiederholungen verhindert.

## 8. Schalltechnische Messungen

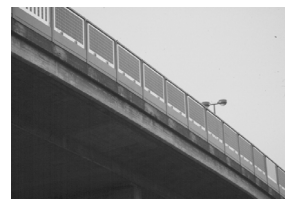
### 8.1 Schweizer Teil

Die schalltechnische Begleitung des Projektes erfolgte durch die Abteilung Akustik und Lärmbekämpfung der EMPA Dübendorf. Der Leiter der Abteilung, Herr Dr. Hofmann, wirkte in der Wettbewerbs-Jury mit und führte die Beratung während den Phasen I bis III durch. Die EMPA half bei der Aufstellung des Messprogrammes mit und führte einige Messungen selber durch. Eine abschliessende Projektbeurteilung bestätigte die Gesamtergebnisse.

Als Resultat der Messungen und Beurteilungen lassen sich die schalltechnischen Eigenschaften der drei in der Schweiz erstellten Anlagen im Einzelnen wie folgt beschreiben.

#### Aubruigg

**Abschirmung:** Der Abschirmungseffekt wurde von der EMPA vor Ort, in Anlehnung an die Methode ISO 10847 gemessen. Eine Messung erfolgte entlang dem alten Teil der Wand (Well-Eternit), eine Messung erfolgte bei der neuen Bifacial-PV-Schallschutzwand. Der D-Wert entspricht mit 12 dB den Erwartungen an eine Wand von dieser Höhe. Er ist bei der konventionellen und bei der PV-Wand etwa gleich hoch (EMPA-Bericht 170'693 vom 24.2.1998).



**Absorption:** Die Wand besitzt Glas- und Metalloberflächen, welche den Schall reflektieren. Eine Messung erübrigte sich. Eine Teilabsorption könnte eventuell erreicht werden, wenn der untere Teil mit Lochblechen abgedeckt wird.

#### Wallisellen

**Abschirmung:** Die Abschirmwirkung einer korrekt ausgeführten Schallschutzwand ist nur sehr wenig von der Konstruktion und der Materialwahl abhängig. Vorausgesetzt, dass die Wand ein minimales Flächengewicht und keine offenen Spalten aufweist, wird bei einer vorgegebenen Höhe etwa der gleiche Wert erreicht. Da die Bedingungen bei der Wand erfüllt sind, wurde auf den messtechnischen Nachweis verzichtet.

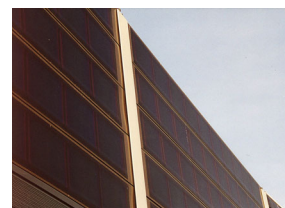


**Absorption:** Die Wand wurde so ausgeführt, dass sie nur auf der Bahnseite absorbierend wird. Auf der Strassenseite herrscht nur wenig Verkehr, weshalb auf die Forderung einer Teilabsorption verzichtet wurde. Die verwendeten Standard-Schallschutz-Kassetten absorbieren den Schall nur auf einer Seite. Die Kassetten-Absorptionswerte sind bekannt. Um die Konstruktion spezifisch auszumessen, wurde bei der EMPA eine Hallraum-Messung nach der Norm EN 20354 in der Zick-Zackanordnung vorgenommen. Erwartungsgemäss wurden sehr gute Werte erreicht: Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s = 0.99$  im Bereich 500 - 2000 Hz und 0.89 im Bereich 125 - 4000 Hz (EMPA-Bericht 174'485 vom 7.10.1998).

Auf der Strassenseite könnte durchaus auch eine Teilabsorption erreicht werden, wenn alle nicht mit PV belegten Flächen mit Lochblech und Dämmmaterial ausgeführt würden. Da das Konzept aber sehr individuell eingesetzt werden kann und soll, muss auch die Absorption jeweils projektspezifisch festgelegt und gemessen werden. Eine entsprechende Messung wurde hier nicht vorgenommen. Von den drei ähnlich konstruierten deutschen Anlagen existieren diesbezügliche Messwerte.

#### Brüttisellen

**Abschirmung:** Auf den Nachweis wurde aus den gleichen Gründen wie bei der zweiten Anlage verzichtet. **Absorption:** Die senkrecht liegenden PV-Module reflektieren mit ihrer harten Kunststoffoberfläche den Schall. Deshalb ist die Wand auf der Autobahnseite im PV-Bereich reflektierend und nur im konventionellen Bereich absorbierend. Da keine Besiedlung auf der gegenüberliegenden Strassenseite vorhanden ist, und dort eine gewisse Schallpegelerhöhung in Kauf genommen werden kann, wurde dieser Umstand vom Tiefbauamt akzeptiert.



## 8.2 Messungen an den Anlagen in Deutschland

Die offizielle Klassierung der Schallschutzwände entlang von deutschen Autobahnen umfasst drei Kategorien, je nach dem Grad der Schallabsorption:

- schallreflektierend: < 4 dB
- schallabsorbierend: zwischen 4 dB und 8 dB.
- hoch absorbierend: > 8 dB

Für alle deutschen Anlagen (siehe Anhang) wurden Norm-Messungen im Hallraum ausgeführt. Das Resultat war, dass die Kassetten und der Zickzack absorbierend sind, während der Schindeltyp hochabsorbierend ist. Der Kassettentyp kann mit geringen Änderungen auch hochabsorbierend ausgeführt werden (dickere absorbierende Glaswolle innen). Für den Zickzack müssten konstruktive Änderungen vorgenommen werden, um hochabsorbierend zu werden (Änderungen des Verhältnisses Glas - Schallschutzkassette).

Um den Einfluss der oberen Wandkante besser zu verstehen, wurden durch das ITAP (Oldenburg) auch Messungen am Standort durchgeführt. Messung und Auswertungen erfolgten gemäss ISO/DIS 10847. (Bericht Institut für technische und angewandte Physik GmbH - ITAP vom 5.3.1998).

Gemessene Einfügungsdämpfung nach ISO 10847 (20 m hinter der Wand)					
	Wand- höhe (m)	Mess- höhe (m)	Einfügungs- dämpfung dB	Mess- höhe (m)	Einfügungs- dämpfung dB
Kassetten	3.2	1.5	13.7	5	9.7
Schindeln	3.0	1.5	11.7	5	3.8
Zick-Zack	3.9	1.5	14.1	5	4.3

Tab.7: Resultate der In-Situ-Schallmessungen an den drei deutschen Anlagen

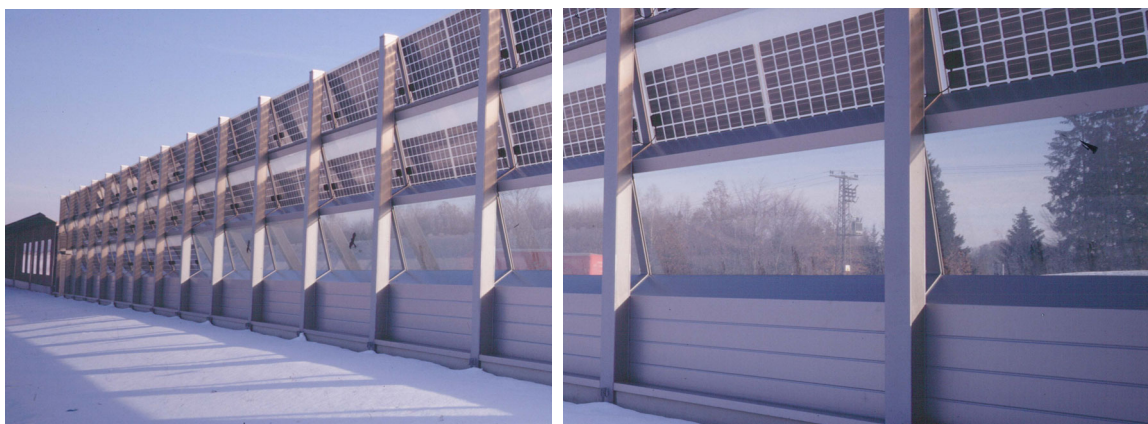


Abb. 16:  
Die 10.08 kWp Zick-Zack Testanlagen von Bitsch und Partner / GSS GmbH / DLW Metecno in Deutschland

## 9. Projektresultate und Erfahrungen

### 9.1 Zusammenfassung der wichtigsten technischen und betrieblichen Erkenntnisse aus dem Bau der Wände

#### Rastermass

- Die üblichen Rastermasse von 3 oder 4 m (Ausnahmsweise auch 2 m) sollen nach Möglichkeit eingehalten werden. Der einfache Ersatz von bestehenden konventionellen Elementen ist nur so möglich. Dies wird auch in Zukunft so sein, wenn allenfalls später alte PV-Schallschutzelemente ausgewechselt werden müssen.

#### Auswechslung / Service

- Die Elemente müssen im Schadenfall einfach ausgewechselt werden können. Dabei muss beachtet werden, dass Autobahnen nur im Ausnahmefall gesperrt werden können und auch bei Bahnstrecken sehr hohe Sicherheitsanforderungen gelten. Eine rationelle Auswechslung ist deshalb sehr wichtig.

#### Rationelle Montage

- Die Montagezeiten auf der Baustelle der einzelnen Versuchsfelder variierten stark. Sie lagen zwischen weniger als einem Tag bis zu 3 bis 4 Wochen. Mit den 100 kW - Anlagen war in diesem Punkt schon viel Erfahrung gewonnen worden: eine weitgehende Vormontage in der Werkhalle erwies sich als sehr rationell und qualitätsfördernd. Auf der vom Wetter abhängigen Baustelle dürfen 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. In diesem Punkt lohnt sich aber eindeutig die Suche nach optimalen Transportmöglichkeiten.

#### 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 stets ein wichtiges Thema. Bei den Bahnen ist es die Beeinträchtigung des Bahnbetriebs während Bau und Betrieb sowie die Anlagen-Erdung.

#### Kriechströme

- Auf Brücken ist es wichtig, auf eine besonders gute Isolation gegen den Beton ein Augenmerk zu legen. Durch Kriechströme beschädigte Betonbrücken haben die Verantwortlichen in diesem Punkt sehr wachsam gemacht.

#### Ästhetik

- Die ästhetische Wirkung der realisierten Anlagen lässt sich nicht überall verallgemeinern. Wird auf die Details Wert gelegt, so stellt eine PV-Schallschutzwand in jedem Fall eine Verbesserung gegenüber einer konventionellen Schallschutzwand dar.

#### Eigenabschattung

- Das Problem der Abschattung von untenliegenden Modulreihen durch obenliegende wird im allgemeinen unterschätzt. Der Effekt lässt sich auch bei einem sehr grossen Abstand der Modulreihen voneinander nicht eliminieren, da das Hauptproblem darin besteht, dass die Sonne im Sommer im Nordosten aufgeht und im Nordwesten untergeht. In den Randstunden ist deshalb immer eine Abschattung vorhanden. Wird die Geometrie so gewählt, dass die obere Reihe bei Sonnenhöchststand im Sommer (ca. 65°) gerade keinen Schatten auf der unteren Reihe verursacht, so beträgt der Jahresminderertrag der unteren Reihen trotzdem etwa 15%.

#### Wechselrichter (gross / klein)

- Kleinwechselrichter haben den Vorteil, dass sie sich für modulare Anlagen, wie sie PV-Schallschutzanlagen sind, gut einsetzen lassen. Da jedoch eine grosse Wahrscheinlichkeit vorhanden ist, dass ein Wechselrichter ausfällt, sollen sie nur dort eingesetzt werden, wo sie einerseits geschützt sind (Diebstahl / Wetter) und andererseits doch gut zugänglich sind. Dieser Widerspruch ist nicht immer einfach zu lösen. Grossinverter erfordern demgegenüber stets eine eigene (rel. teure) Kabine. Die Wartung und Fehlerbehebung ist aber deutlich einfacher.

#### Verschmutzung

- Schmutz ist auf den Modulen zu gewissen Zeiten deutlich sichtbar. Eine dauerhafte Beeinflussung der Ertragswerte konnte bis jetzt aber nirgendwo festgestellt werden. Die Anlage an der Bahn muss in dieser Beziehung speziell beachtet werden (Eisenabrieb).

#### Diebstahlschutz

- Dem Diebstahlschutz wurde bei allen Anlagen grosse Aufmerksamkeit geschenkt. 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.

#### Modulbrüche

- Bei der Anlage in Aubrugg wurden im Verlaufe der ersten beiden Jahre zwei Module beschädigt, wahrscheinlich durch Steinschlag vorbeifahrender Autos. Die Einschläge waren in beiden Fällen im untersten Bereich des Moduls. In dieser Situation wäre es besser gewesen, die Modul-Unterkante etwas höher zu setzen. Die minimale Höhe muss aber projektspezifisch in Abhängigkeit des Abstandes von der Fahrbahn festgelegt werden. Auch bei der Anlage in Wallisellen ist ein Modul zersprungen. Die Ursache dürfte hier in der Umgebung (spielende Kinder/Jugendliche) zu suchen sein. Die Anlagen funktionieren trotzdem ohne Einbusse weiter.

#### Graffiti

- Die Anlage in Brüttsellen wurde kurz nach der Montage mehrmals mit Graffiti übersprayed. Das Delikt wurde der Polizei gemeldet. Aussichten, die Täter zu finden, bestehen kaum. Der Farbspray lässt sich auf dem teflonartigen Material relativ gut entfernen. Als Versuch wurde bei der Reinigung der Fläche in einem Teilbereich ein Wachs aufgebracht, welcher die Reinigung von Graffiti stark erleichtern soll.

## 9.2 Preisentwicklung und Wirtschaftlichkeit

Das Ziel, auch bezüglich der Ökonomie weitere Fortschritte zu erzielen, kann hier nur beurteilt, aber nicht quantifiziert werden. Die Gründe dafür liegen in den Grössen der Prototypen und den vielen Schwierigkeiten an den teilweise speziellen Standorten. Sie verursachten höhere Kosten als erwartet. Den Herstellern der Anlagen wurden für ihre Leistungen Pauschalpreise angeboten. Zudem wurden von ihnen gewisse Eigenleistungen erwartet.

Die folgenden Rahmenbedingungen sind bei PV-Schallschutz Projekten zu beachten:

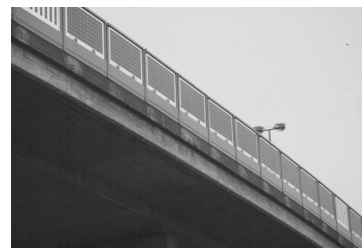
- Die Grundaufwendungen sind in Projekten dieser Art hoch:
  - der Planungs-Grundaufwand und der Aufwand für das Einholen von Bewilligungen ist von der Grösse der Anlage wenig abhängig.
  - der Netzanschluss kostet etwa gleich viel bei kleinen und bei grossen Anlagen.
- Durch Substitution konventioneller Bauteile durch PV-Module lässt sich bekanntlich ein Teil der Kosten einsparen. Diese Substitution kommt aber nur dann zum Tragen, wenn sie konsequent durchgeführt wird. Es lohnt sich nicht, Flächen eines billigen Standardproduktes einzusparen, wenn dafür die Befestigung der (noch teuren) PV-Module aufwendig wird.

Auf eine Aufstellung der Projektkosten wird hier verzichtet, da die Kosten mehr über die Situation des

Anlagenstandortes und der damit verbundenen Schwierigkeiten sagen würden, als über die Ökonomie der einzelnen Konzepte. Im folgenden werden aber die ökonomischen Potentiale der drei realisierten Anlagen kurz bewertet.

### 1. Bifacial

Hier wird die Substitution von konventionellen Bauteilen (Glaswand) durch PV sehr konsequent durchgeführt. Dementsprechend ist das ökonomische Potential der Anlage gross, wenn man bedenkt, dass auch konventionelle Glaswände nicht billig sind. Hinderlich ist im Moment noch der hohe Preis der in Pilotfertigung erstellten PV-Zellen- und Module. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass Bifacial-Module in der Serienfertigung nur wenig teurer sind als konventionelle PV-Module.



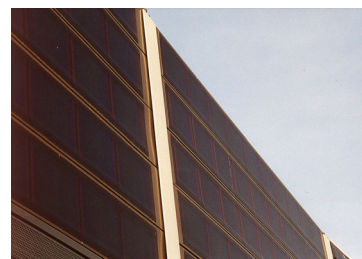
### 2. Zick-Zack

Das Konzept nutzt die Substitution kaum, da die PV-Module auf die Standard-Kassetten aufgeklebt sind. Die Kassetten sind als Serienprodukt aber so billig, dass sich ein Ersatz kaum lohnen würde. Ein hohes ökonomisches Potential hat das Konzept aber dann, wenn die PV-Module schon im Fertigungsprozess der Schallschutzkassetten integriert werden. Damit, und mit einer weitgehenden Vormontage/Vorverkabelung, lassen sich die BOS-Kosten (Balance of System) des Konzeptes minimieren.



### 3. Senkrecht

Auch hier wurden im Projekt konventionelle Kassetten mit daran befestigten PV-Modulen eingesetzt. Damit gilt das gleiche wie beim Zick-Zack. Eine echte ökonomische Alternative stellen die ebenfalls in Brütisellen erprobten Sonderlamine dar. Die Zellen wurden auf das Edelstahl-Blech laminiert, welches direkt als vordere Abdeckung der Schallschutzkassetten dient. Damit ist eine echte Substitution und ebenfalls eine starke Rationalisierung bei der Serienfertigung möglich. Zu beachten ist aber auch der reduzierte Ertrag infolge der senkrechten Lage, was sich auf den schlussendlich erzielten kWh-Preis auswirkt.



Für genauere Aussagen über die realen ökonomischen Weiterentwicklungen bedarf es weiterer grosser Projekte, bei welchen der eingeschlagene Weg weiterverfolgt wird.

## 9.3 Schalltechnische Erkenntnisse

Die Schallabsorption stellt bei PV-Schallschutzanlagen grundsätzlich eine Herausforderung dar. Die für die witterungsfeste Umhüllung von Solarzellen bewährten Materialien, Glas und Kunststoff, reflektieren den Schall. Trotzdem kann durch konstruktive Massnahmen bei vielen Konzepten eine Schallabsorption erreicht werden, welche einer voll absorbierenden Wand nur wenig nachsteht.

Das Problem wird zudem dadurch reduziert, als bei rund der Hälfte aller Schallschutzwände die Schallabsorptionsfläche und die Lichteinfallfläche nicht zusammenfallen, was eine Vielzahl von Konstruktionskonzepten ermöglicht.

Ein interessanter Aspekt der Zick-Zack-förmigen Anlagen ist die Idee, dass durch die gerichteten Flächen gezielt eine Absorption der von unten kommenden Schallwellen gefördert wird, während die schallreflektierenden Flächen nach oben gerichtet sind. Damit entsteht eine gerichtete Wirkung, welche aber mit der vollkommen ungerichteten Norm-Messung im Hallraum nicht festgestellt und nicht beurteilt wird.

Untersuchungen in diesen Richtungen müssten gezielt getätigt werden:

1. Gibt es Flächenverhältnisse und Geometrien, welche trotz eines hohen Anteils von schallharten Flächen eine hohe Absorption aufweisen?
2. Kann mit einer optimalen Geometrie der Schall in einer bestimmten Richtung, vorzugsweise in Bodennähe absorbiert werden, während er in die Höhe reflektiert wird?

Verbesserte Kenntnisse bei diesen Fragen könnten die Anwendung von PV-Schallschutz auch in Situationen ermöglichen, wo heute aus Furcht vor Schallreflexionen nicht an ein entsprechendes Projekt gedacht wird.

## 10. Potentialstudie PV-Schallschutz

Im Rahmen eines Projektes der Europäischen Union (Programm Thermie B) wurde 1999 das Anwendungspotential an PV-Schallschutzanlagen in 6 Ländern der EU untersucht. Als Ergänzung zum vorliegenden Projekt sollen die Resultate hier zusammenfassend wiedergegeben werden.

Eine ausführlichere Zusammenfassung befindet sich im Anhang zu diesem Bericht. Der vollständige Schlussbericht der Studie kann über das Internet ([www.tnc.ch](http://www.tnc.ch)) oder bei den Autoren dieses Berichtes bezogen werden. **Vergleiche auch [15 ... 19] und Anhang 5, 6 und 7**

Tab. 8: Potential an PV-Schallschutz an Autobahnen in den 6 untersuchten Ländern. Das technische

Technisches Potential	Land						Total
	CH	D	NL	UK	I	F	
Schallschutz an Autobahnen (geplant und gebaut) [km]	303.8	1'525.0	475.9	204.0	50.7	352.2	2'911.7
Schallschutz an Bahnlinien (geplant und gebaut) [km]	94.7	600.0	444.6	16.5	7.0	139.0	1'302.1
Installierbare Leistung an Autobahnen [MW <sub>p</sub> ]	58.5	293.8	114.6	39.3	9.8	67.9	583.9
Installierbare Leistung an Bahnlinien [MW <sub>p</sub> ]	14.9	94.5	82.4	2.6	1.1	21.9	217.4
<b>Installierbare Leistung Bahn&amp;Strasse [MW<sub>p</sub>]</b>	<b>73.4</b>	<b>388.3</b>	<b>197.0</b>	<b>41.9</b>	<b>10.9</b>	<b>89.7</b>	<b>801.3</b>
Jahresertrag an Autobahnen [GWh/a]	53.4	247.5	91.8	29.9	10.3	63.7	496.6
Jahresertrag an Bahnlinien [GWh/a]	13.6	82.4	65.6	2.0	1.2	21.4	186.1
<b>Jahresertrag Bahn&amp;Strasse [GWh/a]</b>	<b>67.0</b>	<b>329.9</b>	<b>157.3</b>	<b>32.0</b>	<b>11.5</b>	<b>85.1</b>	<b>682.8</b>

Potential umfasst alle Wände, welche schon gebaut sind und alle in den nächsten Jahren geplanten Wände. Es wird vom heutigen Stand der Technik ausgegangen. Abschattung durch Häuser und Bäume wurde summarisch berücksichtigt. In Frankreich, Italien und Grossbritannien waren keine ausreichenden Planungsdaten erhältlich, weshalb hier von diesen Ländern nur die bestehenden Wände berücksichtigt werden.

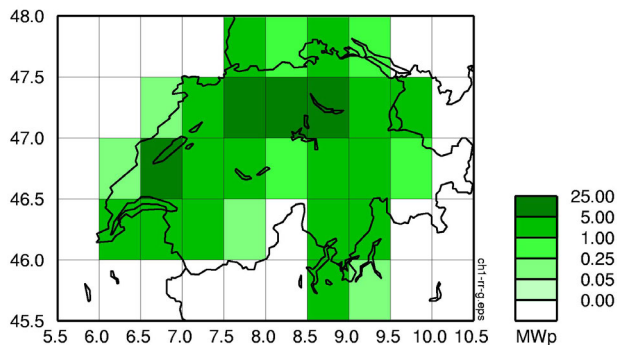


Abb. 17: Die geographische Verteilung des technischen Potentials an Autobahnen in der Schweiz.

## 11. EXPO 2000

Das Projekt der sechs Photovoltaik-Schallschutz-Versuchsfelder wurde 1999 von der Jury der Weltausstellung Expo 2000 in Hannover als sogenanntes «Weltweites Projekt der EXPO 2000» ausgewählt. Diese Auszeichnung attestiert dem Vorhaben einen hohen Grad an Innovation und Zukunftspotential.

Das Projekt profitiert damit von einer gewissen Publizität, indem es in diversen Veröffentlichungen in Buchform und im Internet dargestellt ist. Andererseits bestanden keine finanziell tragbaren Möglichkeiten, an der Expo selbst das Projekt aus- oder vorzustellen.



## 12. Perspektiven

Die Erfahrungen mit den sechs Anlagen haben das Spektrum der PV-Schallschutzanwendung in Europa stark erweitert. Mit den vorliegenden Projekten wurde die Anwendbarkeit von diversen Konzepten gezeigt. Weitere Konzepte existieren, welche im Rahmen des Projektes noch nicht ausprobiert wurden.

Für die Realisation von neuen Anlagen soll auf die gemachten Erfahrungen zurückgegriffen werden. Die Anlagen dienen einerseits als Demonstrationsobjekte für potentielle Bauherrschaften, andererseits sind die während des Baus und im Rahmen der Messkampagne gemachten Erfahrungen die Grundlage für weitere Entwicklungen von PV-Schallschutzelementen.

## 13. Messungen

Die Messeinrichtungen aller drei Anlagen sind in Anlehnung an die EU-Guidelines aufgebaut. Bei allen Anlagen werden noch zusätzliche Parameter erfasst. Generell wurden Stundenmittelwerte oder Summen aller Parameter während der gesamten Messperiode erfasst. Zum Teil sind Spezial- Messungen mit höherer Zeitauflösung durchgeführt worden.[33], [34]

Die Frage der lokalen Verschmutzung der Module durch Emissionen der Autobahn, respektive Bahn, stellt sich vor allem bei der Anlage Aubrugg. Hier befindet sich die Fahrbahn in unmittelbarer Nähe der Module.

Von einer Beeinträchtigung des Systemwirkungsgrades muss man besonders nach längeren Trockenperioden ausgehen. Sie liegt aber unter der messtechnischen Genauigkeit und kann schwer quantifiziert werden. Wir gehen von einer Beeinträchtigung durch Verschmutzung von weniger als 3% aus.

### 13.1 Bifacial PV-Schallschutzanlage Aubrugg

Die Einstrahlung wird mit 4 Referenzzellen, 2 Richtung Ost und 2 Richtung West erfasst. Zusätzlich werden die Modultemperatur und alle 5 Stringströme aufgezeichnet.

Bei der Auswertung der Ertragsdaten und der Berechnung der Performance (PR) stellt sich bald die Frage, mit welcher Nominalleistung der Zelle gerechnet werden soll: der Wirkungsgrad der Frontseite liegt nominal deutlich über demjenigen der Rückseite. Da die Zelle in Nord-Süd-Richtung aufgestellt ist und sie deshalb etwa gleichviel Strahlung auf beiden Seiten sieht, wurde als Nennleistung der Mittelwert der beiden Seiten genommen. In diesem Sinne wird hier also ein aufstellungsabhängiger Wirkungsgrad einer Zelle postuliert. Würde die Zelle gegen Süden gerichtet, müsste also mit einer höheren Nennleistung der Anlage gerechnet werden.

Als Nennleistung der Module wurde der Mittelwert der beiden Seiten eingesetzt. Hi ist hier die Summe der senkrecht nach Osten und Westen gemessenen Strahlung.

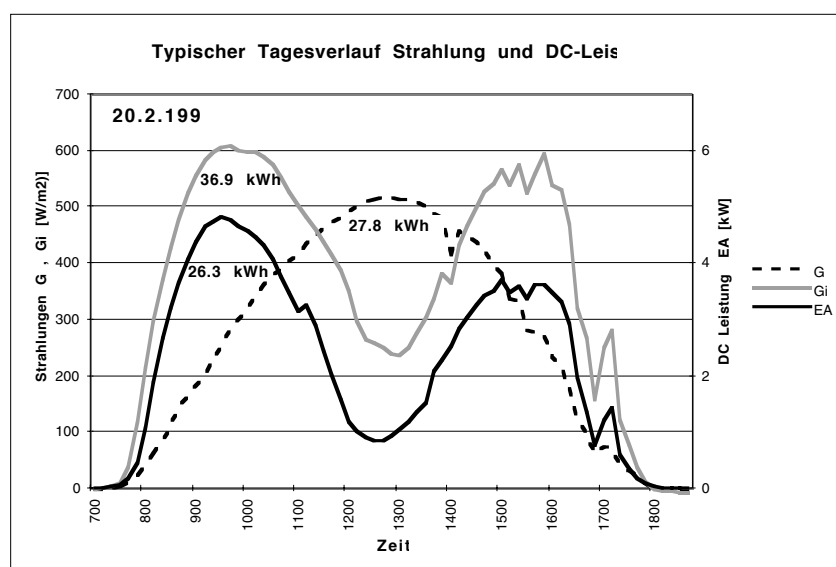


Abb. 18:

Erste Messwerte der Bifacial PV-Anlage Aubrugg, Tagesverlauf vom 20.2.1998, 10-Minuten-Werte. Globalstrahlung G, Strahlung in Feldebene Gi, DC-Leistung EA. Die kWh-Angaben im Diagramm bezeichnen die normierten Energiesummen der Kurven.

Nach einigen kurzen Anfangsschwierigkeiten des Wechselrichters lief die Anlage in der Folge mit grosser Zuverlässigkeit. Es zeigte sich, dass die neuartige Bifacial Zelle den Wirkungsgrad als Gesamtheit nicht ganz erfüllt. Während die bessere Frontseite (gegen Osten gerichtet, „Morgenseite“) den Erwartungen entspricht, ist am Abend ein zu tiefer Wirkungsgrad festzustellen. Der gute Morgenwirkungsgrad wird zudem nur während kurzer Zeit erreicht.

### 13.2 PV-Schallschutzanlage SBB Wallisellen

Die Einstrahlung wird mit 3 auf der gesamten Länge der Anlage platzierten Referenzzellen erfasst. Zusätzlich werden die Modultemperatur an drei Orten, alle 45 Stringströme sowie DC und AC Leistung von 3 Strings aufgezeichnet. Da die Anlage aus 45 Kleinwechselrichtern besteht, wurde auf eine Aufzeichnung der gesamten DC Leistung verzichtet.

Die Nähe der schalltechnisch zu schützenden Häuser führt dazu, dass die Anlage in den Wintermonaten teilweise von Abschattung betroffen ist. Die messtechnische Erfassung der Strahlungssituation gestaltet sich dementsprechend als schwierig.

### 13.3 PV-Schallschutzanlage A1 Brüttisellen

Die Einstrahlung wird mit 3 auf der gesamten Länge der Anlage platzierten Referenzzellen erfasst. Zusätzlich werden die Modultemperatur an vier Orten und alle 8 Stringströme aufgezeichnet. Die Daten der 550 Wp Anlage mit den Sonderlaminaten wurden ebenfalls registriert.

Die vom Vertragspartner vorgenommene Modulverschaltung erwies sich als sehr problematisch. Aufgrund der teilweise abgedeckten Zellen wurde trotz der Bypassdioden eine viel tiefere Leistung festgestellt als angeboten. Um die für den Inverter notwendige Systemspannung trotzdem zu erreichen, mussten mehr Kassetten als geplant in Serie geschaltet werden. Damit entsteht eine sehr hohe Leerlaufspannung, was vor allem bei tiefen Temperaturen den Wechselrichter gefährden könnte. Wegen der teilweisen Abdeckung von einigen Modulen wurde die Nennleistung der Hauptanlage nach unten korrigiert.

Ort	Aubrugg	Aubrugg	Wallisellen	Brüttisellen	Brüttisellen
Hersteller PV-Schallschutz		ASE	Borra SA / Atlantis	Hauptfeld AET	Sonderlaminat

Hersteller Zelle	Hersteller Modul / Kasette	Typ	Vorderseite	Rückseite	Anlage		UniSolar	UniSolar
					ASE	Atlantis	AET	AET
					spezial	spezial	Kassette	Kassette
Zellen					m-Si	p-Si	UniSolar Tripple Junction	UniSolar Tripple Junction
<b>PV Modul / Kasette</b>			Bifacial	Bifacial	Bifacial		Standard Kassetten	Sonderlaminierung
Modulleistung	W		179 (*)	145 (*)	165	71.5	48.7 (**)	55
Modulspannung	V		54	58.4	56.2	17	25.5	17
Modulfläche	m <sup>2</sup>				2.05	0.61	1.29	1.29
Zellen-Wirkungsgrad	%		14	11.3	12.4			
Modul-Wirkungsgrad	%				8.05	11.74	3.79	4.27

#### Gesamtanlage

Leistung	P <sub>0</sub> kWp	ost	west	Anlage	9.7	8.2	0.55
		8.95	7.25	8.3			
Systemspannung	V	540	584		51	536	34
Fläche	A <sub>0</sub> m <sup>2</sup>			102.5	82.2	216.0	12.9
Feld-Wirkungsgrad (STC)	%	8.73	7.07	8.05	11.74	3.79	4.27
Anzahl Module / String	-			10	3	21	2
Anzahl Strings	-			5	45	8	5
Anzahl Module / Kassetten	-			50	135	168	10
Neigung	°			90	45	90	90
Ausrichtung	°	83	263		197	142	142
Gesamtlänge	m			120	72	120	8
Leistungsdichte DC (***)	W/m	90	73	82	143	73.2	82.5

#### Inverter

Marke	Hersteller	Typ	Sputnik	Atlantis	Sputnik	Würth
			SolarMax 10	Sputnik MINISINE 200	SolarMax 10	WE 500 NWR
Nennleistung AC	kW		10	0.18	10	0.65
Anzahl Geräte	-		1	45	1	1
Nennleistung AC gesamt	kW		10	8.1	10	0.65

(\* Herstellerangaben

(\*\* korrigierter Wert, da einzelne Module zum Teil abgedeckt sind

(\*\*\* ohne Berücksichtigung von Blindelementen etc.

Tabelle 9: Technische Daten der drei schweizer PV-Schallschutz Anlagen.

## 14. Auswertungen

Die Monatsauswertungen auf den folgenden Seiten repräsentieren die Messresultate der drei Schweizer Anlagen während den letzten 12 Betriebsmonaten (Nov. 2000 bis Okt. 2001). Ausgewertet wurden die Hauptmessungen der drei Anlagen.

## 14.1 Anlage Aubrugg

AUBRUGG 8.27 [kWp]	tM [h]	M —	O —	Betr. Inv [h]	H [kWh/m²]	HI [°C]	T am	E A [kWh]	E IO+ [kWh]	E IO- [kWh]	E IO [kWh]
1998	8,592	0.98	0.05	4,193	1,105	1,239	10.4	7,126	6,254	23.8	6,230
1999	8,760	1.00	0.05	4,256	1,008	1,163	10.1	6,498	5,754	23.2	5,731
2000	8,784	1.00	0.07	4,215	1,062	1,236	11.0	6,264	5,530	25.5	5,505
2001	7,408	0.85	0.04	3,807	994	1,151	12.0	6,197	5,487	22.8	5,464
98...01 total				16,470	4,170	4,789		26,086	23,025	95.3	22,930
Mittel	8,386	0.96	0.05	4,118	1,042	1,197	10.9	6,521	5,756	23.8	5,732
12 Monate	8,760	1.00	0.05	4,263	1,035	1,202	10.8	6,423	5,658	27.6	5,630
Nov. 00	720	1.00	0.09	263	30	42	6.1	197	162	2.3	159
Dez. 00	744	1.00	0.22	242	18	23	3.8	102	74	2.6	71
Jan. 01	744	1.00	0.13	251	23	30	1.6	139	109	3.0	106
Feb. 01	672	1.00	0.10	272	43	55	3.8	255	216	1.9	215
Mär. 01	744	1.00	0.07	346	54	61	7.3	302	253	2.9	250
Apr. 01	720	1.00	0.03	393	94	105	7.7	570	500	2.0	498
Mai. 01	744	1.00	0.02	456	158	177	16.6	1,019	918	2.4	915
Jun. 01	720	1.00	0.03	462	163	183	16.5	1,013	911	2.4	908
Jul. 01	744	1.00	0.03	464	171	193	20.1	1,067	961	2.1	959
Aug. 01	744	1.00	0.02	431	145	168	20.3	946	851	1.8	849
Sept. 01	720	1.00	0.06	358	72	82	12.4	402	345	2.5	343
Okt. 01	744	1.00	0.06	325	63	83	13.5	412	358	1.5	356
00/01	8,760	1.00	0.05	4,263	1,035	1,202	10.8	6,423	5,658	27.6	5,630

Tabelle 10: Anlage Aubrugg: Betriebswerte Meteo und Energien, Jahreswerte 1998 ... 2001 und die letzten 12 Monatswerte.

AUBRUGG 8.27 [kWp]	Y r,g	Y r	Y a	Y f	L s	L c	PR ---	n Feld ---	n Inv ---	n tot ---	Betr [%]	Tp b [°C]	spez. Ertr. [kWh/kWp]
1998	3.06	3.43	2.38	2.08	0.30	1.05	<b>0.61</b>	0.081	0.874	0.071	95	30.7	753
1999	2.77	3.20	2.16	1.90	0.25	1.04	<b>0.60</b>	0.078	0.882	0.069	95	30.9	693
2000	2.90	3.38	2.07	1.82	0.25	1.31	<b>0.54</b>	0.071	0.879	0.063	93	28.4	666
2001	3.22	3.72	2.43	2.14	0.29	1.30	<b>0.57</b>	0.076	0.882	0.067	96	26.5	661
Mittel	2.99	3.43	2.26	1.99	0.27	1.17	<b>0.58</b>	0.076	0.879	0.067	95	29.1	693
12 Monate	2.83	3.29	2.13	1.87	0.26	1.16	<b>0.57</b>	0.075	0.877	0.066	95	26.5	681
Nov. 00	1.01	1.39	0.79	0.64	0.15	0.59	<b>0.46</b>	0.066	0.811	0.054	91	14.1	
Dez. 00	0.60	0.74	0.40	0.28	0.12	0.35	<b>0.37</b>	0.062	0.699	0.043	78	9.1	
Jan. 01	0.75	0.98	0.54	0.41	0.13	0.44	<b>0.42</b>	0.064	0.762	0.049	87	7.2	
Feb. 01	1.53	1.97	1.10	0.93	0.18	0.86	<b>0.47</b>	0.065	0.840	0.055	90	11.6	
Mär. 01	1.75	1.98	1.18	0.98	0.20	0.80	<b>0.49</b>	0.069	0.829	0.057	93	15.4	
Apr. 01	3.14	3.50	2.30	2.01	0.29	1.20	<b>0.57</b>	0.076	0.875	0.067	97	19.5	
Mai. 01	5.09	5.71	3.97	3.57	0.40	1.74	<b>0.63</b>	0.081	0.898	0.073	98	29.5	
Jun. 01	5.44	6.09	4.08	3.66	0.42	2.01	<b>0.60</b>	0.078	0.896	0.070	97	29.6	
Jul. 01	5.52	6.21	4.16	3.74	0.42	2.05	<b>0.60</b>	0.078	0.899	0.070	97	32.9	
Aug. 01	4.66	5.42	3.69	3.31	0.38	1.73	<b>0.61</b>	0.079	0.898	0.071	98	33.0	
Sept. 01	2.39	2.75	1.62	1.38	0.24	1.13	<b>0.50</b>	0.069	0.853	0.058	94	21.1	
Okt. 01	2.02	2.67	1.61	1.39	0.22	1.06	<b>0.52</b>	0.070	0.865	0.061	94	23.2	
00/01	2.83	3.29	2.13	1.87	0.26	1.16	<b>0.57</b>	0.075	0.877	0.066	95	26.5	

Tabelle 11: Anlage Aubrugg: Betriebswerte, Ertrag, Performance und Verluste, Jahreswerte 1998 ... 2001 und die letzten 12 Monatswerte.

## Grafiken Anlage Aubrugg

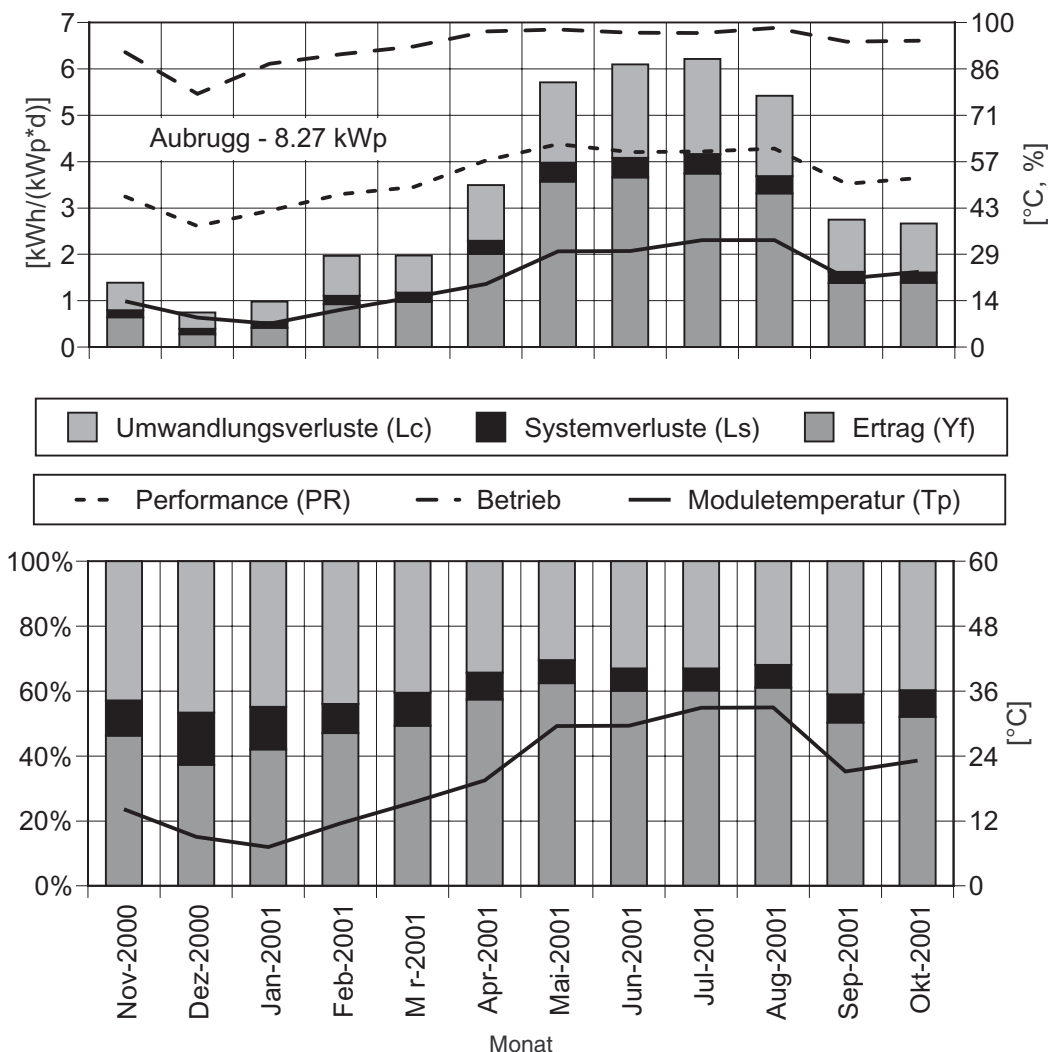


Abb.19: Anlage Aubrugg: Ertrag und Verluste der letzten 12 Monate, in  $[kWh/kWp*d]$  und in [%].

Die Bifacial Anlage Aubrugg zeigt für die letzten 12 Betriebsmonate eine Performance von 57 % und einen spezifischen Jahresertrag von 681  $kWh/kWp$  bei einer Verfügbarkeit von 95 %. Bedingt durch den tiefer als erwarteten Modulwirkungsgrad und die geographische Lage mit relativ niedriger Einstrahlung in den Wintermonaten (Morgennebel), erreichte die Anlage Aubrugg eher die Performance und Ertrag einer Fassaden-Anlage und nicht wie erwartet, einer optimal nach Süden ausgerichteten Anlage. Der mittlere Feldwirkungsgrad (STC) der bifacialen monokristallinen Module ist 8.1 % und der gemessene Feldwirkungsgrad beim Betrieb der Anlage ist 7.6 %.

## 14.2 Anlage Wallisellen

WALL 9.65 [kWp]	i M [h]	M ---	O ---	Betr. Inv [h]	H [kWh/m <sup>2</sup> ]	H I [°C]	T am	E IO+ [kWh]	E IO- [kWh]	E IO [kWh]
1999	8,758	1.00	0.07	3,756	1,002	924	7.8	5,377	34.0	5,343
2000	8,784	1.00	0.22	2,922	1,064	948	8.6	4,575	104.9	4,470
2001	7,408	0.85	0.07	3,055	982	818	9.5	4,727	101.0	4,626
99...01	total			9,732	3,048	2,690		14,678	239.8	14,438
Mittel	8,317	0.95	0.12	3,244	1,016	897	8.6	4,893	79.9	4,813
12 Monate	8,760	1.00	0.08	3,358	1,025	872	8.4	4,921	120.9	4,801
Nov. 00	720	1.00	0.34	154	32	40	3.8	147	8.5	139
Dez. 00	744	1.00	0.10	189	19	24	1.6	103	12.5	90
Jan. 01	744	1.00	0.02	189	24	31	-0.6	158	14.3	144
Feb. 01	672	1.00	0.01	238	43	47	1.4	296	12.7	283
Mär. 01	744	1.00	0.06	269	55	49	5.0	295	13.4	282
Apr. 01	720	1.00	0.00	344	93	76	5.2	513	11.4	502
Mai. 01	744	1.00	0.02	384	156	115	14.0	733	11.9	721
Jun. 01	720	1.00	0.03	387	159	110	13.9	681	11.5	670
Jul. 01	744	1.00	0.30	295	168	124	17.6	522	9.8	512
Aug. 01	744	1.00	0.07	333	142	119	17.8	635	9.5	626
Sept. 01	720	1.00	0.02	296	71	65	9.9	404	2.0	402
Okt. 01	744	1.00	0.02	279	64	72	11.0	434	3.3	430
00/01	8,760	1.00	0.08	3,358	1,025	872	8.4	4,921	120.9	4,801

Tabelle 12: Anlage Wallisellen: Betriebswerte Meteo und Energien, Jahreswerte 1999 ... 2001 und die letzten 12 Monatswerte.

WALL 9.65 [kWp]	Y r,g [kWh/(kWp*d)]	Y r ---	Y f ---	L s ---	PR ---	n tot ---	Betr [%]	Tp b [°C]	spez. Ertr. [kWh/kWp]
1999	2.74	2.53	1.52	1.02	<b>0.60</b>	0.070	93	43.8	554
2000	2.91	2.59	1.27	1.32	<b>0.49</b>	0.057	78	46.5	463
2001	3.18	2.65	1.55	1.10	<b>0.59</b>	0.069	93	44.8	479
Mittel	2.94	2.59	1.44	1.15	<b>0.56</b>	0.065	88	45.0	499
12 Monate	2.81	2.39	1.36	1.03	<b>0.57</b>	0.067	92	43.9	497
Nov. 00	1.06	1.35	0.48	0.87	<b>0.36</b>	0.042	66	32.7	
Dez. 00	0.62	0.77	0.30	0.47	<b>0.39</b>	0.046	90	27.5	
Jan. 01	0.78	1.00	0.48	0.51	<b>0.48</b>	0.057	98	25.8	
Feb. 01	1.53	1.67	1.05	0.62	<b>0.63</b>	0.074	99	28.9	
Mär. 01	1.76	1.57	0.94	0.63	<b>0.60</b>	0.071	94	31.0	
Apr. 01	3.09	2.54	1.73	0.81	<b>0.68</b>	0.080	100	36.7	
Mai. 01	5.03	3.72	2.41	1.31	<b>0.65</b>	0.076	98	49.4	
Jun. 01	5.29	3.67	2.31	1.36	<b>0.63</b>	0.074	97	48.7	
Jul. 01	5.40	3.99	1.71	2.28	<b>0.43</b>	0.050	70	51.5	
Aug. 01	4.57	3.84	2.09	1.75	<b>0.54</b>	0.064	93	54.4	
Sept. 01	2.38	2.16	1.39	0.77	<b>0.64</b>	0.076	98	40.6	
Okt. 01	2.08	2.33	1.44	0.89	<b>0.62</b>	0.073	98	44.8	
00/01	2.81	2.39	1.36	1.03	<b>0.57</b>	0.067	92	43.9	

Tabelle 13: Anlage Wallisellen: Betriebswerte, Ertrag, Performance und Verluste, Jahreswerte 1999 ... 2001 und die letzten 12 Monatswerte.

## Grafiken Anlage Wallisellen

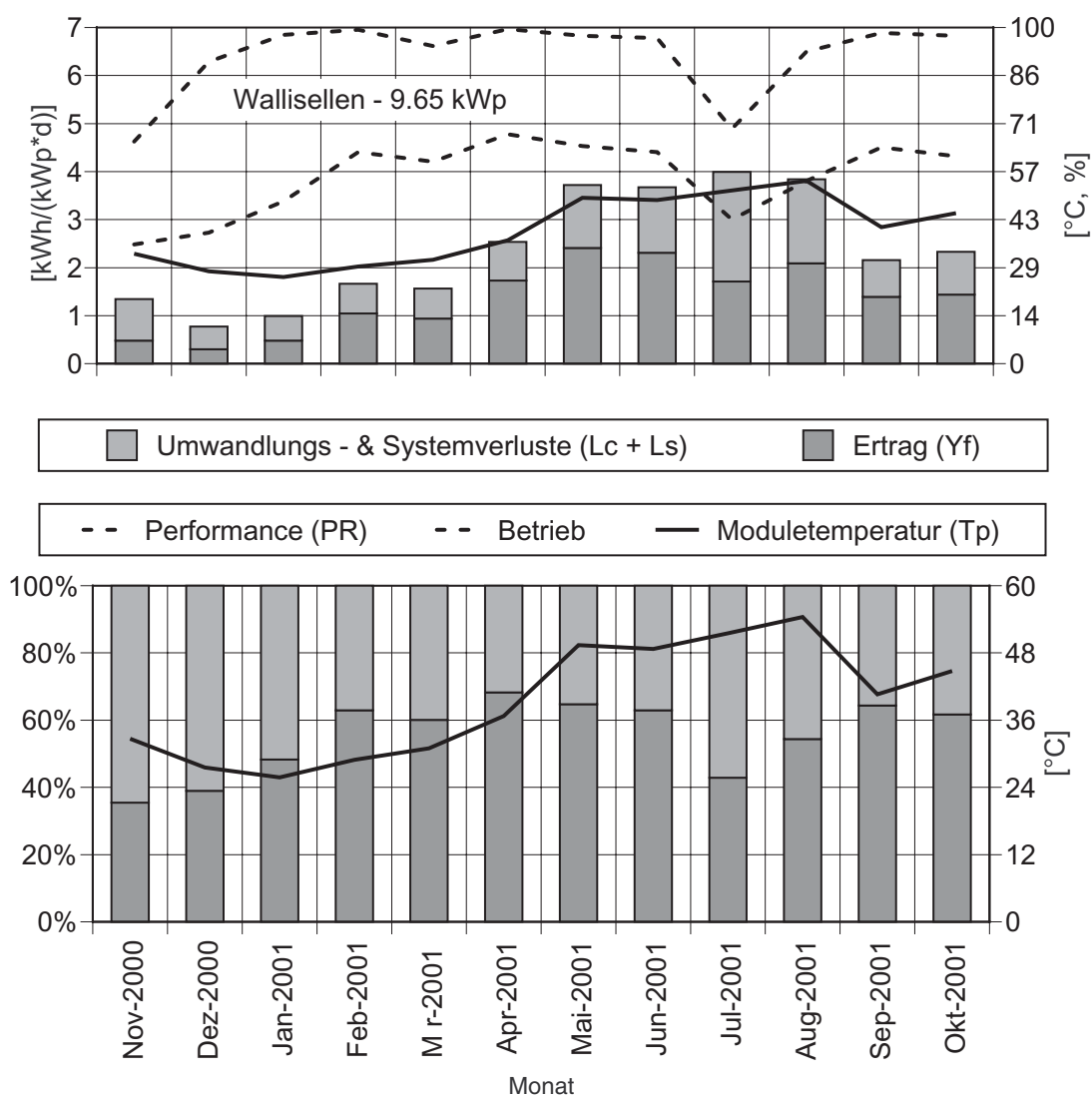


Abb. 20: Anlage Wallisellen: Ertrag und Verluste der letzten 12 Monate, in [kWh/kWp\*d] und in [%].

Die Anlage SBB Wallisellen zeigt für die letzten 12 Betriebsmonate eine Performance von 57 % und einen spezifischen Jahresertrag von 497 kWh/kWp bei einer Verfügbarkeit von 92 %. Konzeptbedingt wurde die DC Leistung nicht erfasst. Die Umwandlungs- und die Systemverluste (Lc, Ls) sind in den Darstellungen der Tabelle 12/13 und in der Abb. 20 zusammengefasst. Die detaillierten Messungen an den 3 von 45 Invertern zeigen einen mittleren Inverterbetriebswirkungsgrad von 86 %. Wie in der Tabelle 6, unter EIO ersichtlich ist, sind die Stillstandverluste der Inverter relativ hoch. Im August 2001 wurde bei der Anlage eine Schaltuhr eingebaut, welche alle 45 Inverter nachts vom Netz trennt. Dadurch konnten die Stillstandverluste wesentlich verringert werden. Da die Module nicht genügend hinterlüftet sind, ist die mittlere jährliche Modultemperatur mit 44 °C relativ hoch. Der Feldwirkungsgrad (STC) der polykristallinen Module ist 11.7 % und der gemessene Feldwirkungsgrad der detaillierten Messungen an 3 von 45 Strings beim Betrieb der Anlage ist 10 %. Der tiefere Ertrag gegenüber der Voraussage ist auf das tiefere Strahlungsangebot (- 6 %), Beschattung durch Bäume und Häuser (- 8 %), Beschattung der untersten Modulreihe (- 5 %), erhöhte Modultemperatur (- 5 %) tiefer Inverterwirkungsgrad (- 5 %) und keine Nachtabschaltung der Inverter (-2.5 %) zurückzuführen.

### 14.3 Anlage Brüttisellen

BRUETTI 8.20 [kWp]	t M	M	O	Betr. Inv	H	HI	T am	E A	E IO+	E IO-	E IO
	[h]	---	---	[h]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[°C]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
2000	7,211	0.82	0.26	3,866	1,042	671	10.7	2,895	2,555	37.1	2,518
2001	7,407	0.85	0.04	4,002	1,056	674	9.9	3,767	3,408	44.3	3,363
00...01	total			7,868	2,098	1,345		6,661	5,963	81.4	5,881
Mittel	7,309	0.84	0.15	3,934	1,049	673	10.3	3,331	2,981	40.7	2,941
12 Monate	8,760	1.00	0.04	4,509	1,102	730	8.8	4,120	3,706	52.4	3,654
Nov. 00	720	1.00	0.02	287	34	44	4.1	265	233	4.2	229
Dez. 00	744	1.00	0.01	270	21	25	1.9	153	125	4.3	120
Jan. 01	744	1.00	0.04	280	29	38	-0.3	228	201	5.0	196
Feb. 01	672	1.00	0.01	293	48	48	1.8	300	270	3.3	267
Mär. 01	744	1.00	0.01	369	59	41	5.5	267	231	4.7	226
Apr. 01	720	1.00	0.00	411	99	58	5.7	367	326	3.9	322
Mai. 01	744	1.00	0.03	472	168	90	14.6	518	479	4.4	475
Jun. 01	720	1.00	0.09	477	167	80	14.2	435	397	4.8	392
Jul. 01	744	1.00	0.07	483	177	87	17.9	462	431	4.7	427
Aug. 01	744	1.00	0.04	444	153	93	18.1	491	458	4.8	454
Sept. 01	720	1.00	0.04	379	75	52	10.2	272	232	5.1	227
Okt. 01	744	1.00	0.03	345	73	73	11.4	361	323	3.3	319
00/01	8,760	1.00	0.04	4,509	1,102	730	8.8	4,120	3,706	52.4	3,654

Tabelle 14: Anlage Brüttisellen: Betriebswerte Meteo und Energien, Jahreswerte 2000 und 2001 und die letzten 12 Monatswerte.

BRUETTI 8.198 [kWp]	Y r,g	Y r	Y a	Y f	L s	L c	PR	n Feld	n Inv	n tot	Betr	Tp b	spez. Ertr.
	[kWh/(kWp*d)]						---	---	---	---	[%]	[°C]	[kWh/kWp]
2000	3.47	2.24	1.18	1.02	0.15	1.06	<b>0.46</b>	0.020	0.870	0.017	74	36.6	307
2001	3.42	2.18	1.49	1.33	0.16	0.69	<b>0.61</b>	0.026	0.893	0.023	96	36.0	410
Mittel	3.45	2.21	1.33	1.18	0.16	0.88	<b>0.53</b>	0.023	0.881	0.020	85	36.3	359
12 Monate	3.02	2.00	1.38	1.22	0.16	0.62	<b>0.61</b>	0.026	0.887	0.023	96	34.8	446
Nov. 00	1.14	1.48	1.08	0.93	0.15	0.40	<b>0.63</b>	0.028	0.864	0.024	98	29.3	
Dez. 00	0.69	0.82	0.60	0.47	0.13	0.22	<b>0.58</b>	0.028	0.785	0.022	99	24.7	
Jan. 01	0.93	1.23	0.90	0.77	0.13	0.34	<b>0.62</b>	0.028	0.859	0.024	96	26.0	
Feb. 01	1.70	1.73	1.31	1.16	0.14	0.42	<b>0.67</b>	0.029	0.889	0.026	99	25.7	
Mär. 01	1.89	1.34	1.05	0.89	0.16	0.29	<b>0.66</b>	0.030	0.845	0.025	99	25.2	
Apr. 01	3.28	1.94	1.49	1.31	0.18	0.45	<b>0.68</b>	0.029	0.880	0.026	100	27.8	
Mai. 01	5.42	2.89	2.04	1.87	0.17	0.85	<b>0.65</b>	0.027	0.916	0.025	97	38.3	
Jun. 01	5.58	2.66	1.77	1.59	0.18	0.89	<b>0.60</b>	0.025	0.901	0.023	91	36.6	
Jul. 01	5.70	2.81	1.82	1.68	0.14	1.00	<b>0.60</b>	0.025	0.924	0.023	93	40.9	
Aug. 01	4.95	3.01	1.93	1.79	0.15	1.08	<b>0.59</b>	0.024	0.923	0.023	96	44.9	
Sept. 01	2.50	1.72	1.11	0.92	0.18	0.61	<b>0.54</b>	0.024	0.834	0.020	96	33.9	
Okt. 01	2.35	2.34	1.42	1.26	0.16	0.92	<b>0.54</b>	0.023	0.885	0.020	97	40.4	
00/01	3.02	2.00	1.38	1.22	0.16	0.62	<b>0.61</b>	0.026	0.887	0.023	96	34.8	

Tabelle 15: Anlage Brüttisellen: Betriebswerte, Ertrag, Performance und Verluste, Jahreswerte 2000 und 2001 und die letzten 12 Monatswerte.

## Grafiken Anlage Brüttsellen

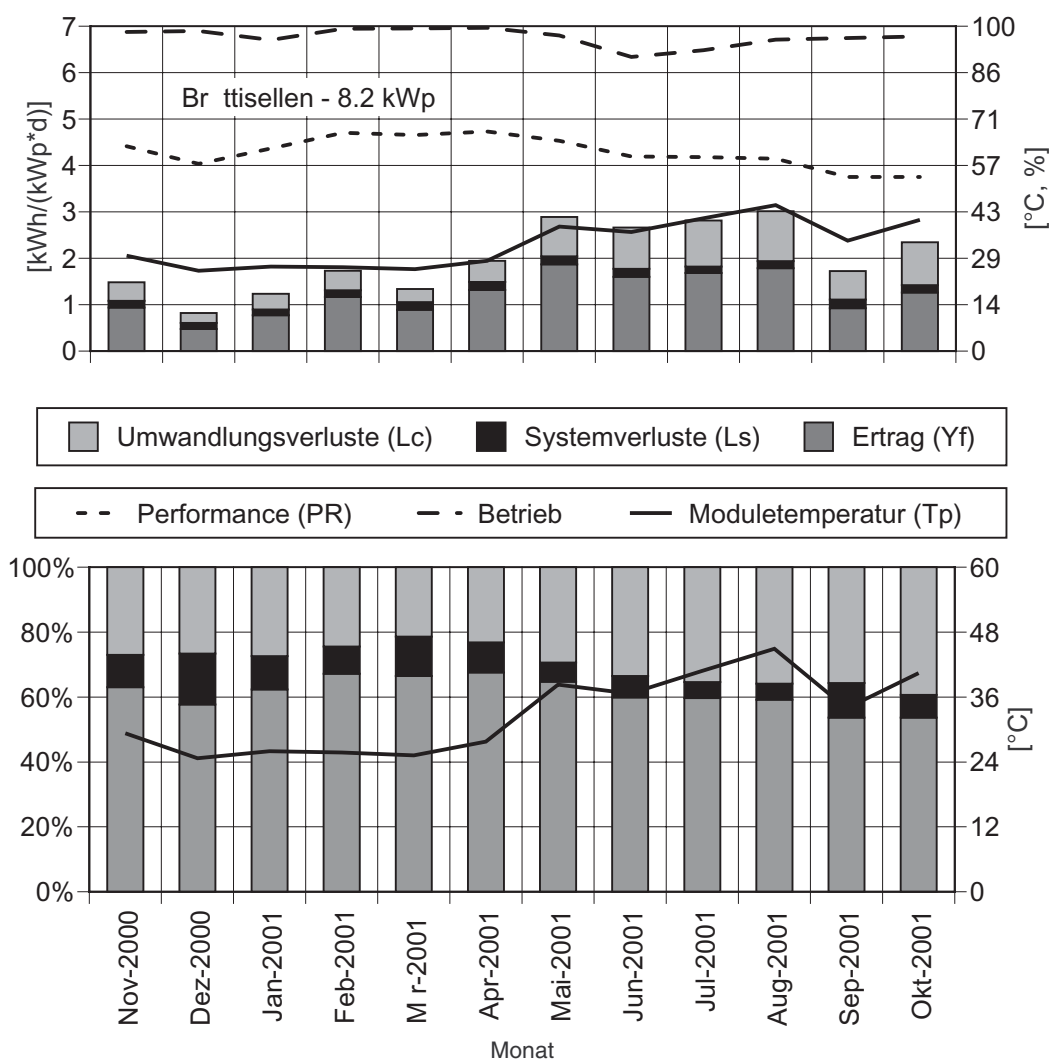


Abb. 21: Anlage Brüttsellen: Ertrag und Verluste der letzten 12 Monate, in  $\text{kWh}/\text{kWp}\cdot\text{d}$  und in [%]

Die Anlage A1 Brüttsellen zeigt für die letzten 12 Betriebsmonate eine Performance von 61 % und einen spezifischen Jahresertrag von  $446 \text{ kWh}/\text{kWp}$  bei einer Verfügbarkeit von 96 %. Wegen der teilweisen Überlappung der Module an einzelnen Kassetten musste die Nennleistung der Anlage von 10 kWp auf 8.2 kWp korrigiert werden. Der Feldwirkungsgrad (STC) der amorphen Triple Junction Module ist somit 3.8 % und der gemessene Feldwirkungsgrad beim Betrieb der Anlage ist 2.5 %. Die genaue Ursache für den relativ tiefen Feldwirkungsgrad kann nur mittels gezielter zusätzlicher Messungen an den Modulfeldern ermittelt werden. Konstruktionsbedingt liegt auch bei dieser Anlage die mittlere Modultemperatur besonders in den Sommermonaten relativ hoch.

## 14.4 Messdaten der drei Anlagen in Deutschland

Die Messungen an den drei PV-Schallschutz Anlagen wurden im September 1998 abgeschlossen die folgenden Tabellen zeigen die Daten von 12 Betriebsmonaten (98/99).

	tM [h]	M ---	O ---	Betr. Inv [h]	H [kWh/m <sup>2</sup> ]	HI [°C]	T am	E A [kWh]	E IO+ [kWh]	E IO- [kWh]	E IO [kWh]
<b>FABRISOLAR</b>	<b>8.77 kWp</b>										
97/98	8'760	1.00	0.08	3'872	1'145	1'162	7.9	7'145	6'604	14.0	6'589
<b>ZUEBLIN</b>	<b>9.13 kWp</b>										
97/98	8'760	1.00	0.14	3'665	1'143	1'219	8.7	7'432		7'432	
<b>DLW METECNO</b>	<b>10.08 kWp</b>										
97/98	8'760	1.00	0.00	4'219	1'145	1'032	7.9	9'035	8'055	56.0	8'000

Tabelle 16: Anlagen in Deutschland: Betriebswerte Meteo und Energien, Jahreswerte 97/98.

	Yr.g	Yr	Ya	Yf	Ls	Lc	PR	n Feld	n Inv	n tot	Betr [%]	Tp b [°C]	spez. Ertr. [kWh/kWp]
	[kWh/(kWp*d)]						---	---	---	---			
<b>FABRISOLAR</b>	<b>8.77 kWp</b>												
97/98	3.14	3.18	2.23	2.06	0.17	0.95	<b>0.65</b>	0.090	0.922	0.083	92	40.9	751
<b>ZUEBLIN</b>	<b>9.13 kWp</b>												
97/98	3.13	3.34	2.23		1.11		<b>0.67</b>			0.084	86	43.9	814
<b>DLW METECNO</b>	<b>10.08 kWp</b>												
97/98	3.14	2.83	2.46	2.17	0.28	0.37	<b>0.77</b>	0.094	0.885	0.083	100	27.0	794

Tabelle 17: Anlagen in Deutschland: Betriebswerte, Ertrag, Performance und Verluste, Jahreswerte 97/98.

Die drei PV-Schallschutzanlagen in Deutschland wurden mit folgenden Konzepten ausgeführt:

- 8.77 kWp Kassetten: Fabrimex AG.
- 9.13 kWp Schindeln: Züblin AG / Dorf Müller GmbH.
- 10.08 kWp Zick-Zack: Bitsch und Partner / GSS GmbH / DLW Metecno

Die Anlage Züblin/ Dorf Müller wurde mit 26 modulnahen Kleinwechselrichtern ausgerüstet ist. Auffallend ist die relativ niedrige Modultemperatur der Zick-Zack Anlage bei der die Module freistehend eingebaut sind. **Vergleiche auch Anhang 3 und 4**

## 15. Symbole und Einheiten

Meteo und Energien			Ertrag und Verluste		
			Y r,g	Referenz (Global)	[kWh/(kWp*d)]
			Y r	Referenz (Modulebene)	[kWh/(kWp*d)]
t M	verfügbare Daten	[h]	Y a	Generator Ertrag	[kWh/(kWp*d)]
M	Monitoring Fraktion	---	Y f	Anlagen Ertrag	[kWh/(kWp*d)]
O	Output Fraktion der Anlage	---	L s	Inverterverluste	[kWh/(kWp*d)]
Betr. Inv	Betriebsstunden Inverter	[h]	L c	Feldverluste	[kWh/(kWp*d)]
H	Einstrahlungssumme (Global)	[kWh]	PR	Performance Ratio	---
H I	Einstrahlungssumme (Modulebene)	[kWh]	n Feld	Betriebswirkungsgrad (Generator)	---
T am	mitl. Umgebungstemperatur	[°C]	n Inv	Betriebswirkungsgrad (Inverter)	---
E A	Energie vom Solargenerator	[kWh]	n tot	Gesamtwirkungsgrad der Anlage	---
E IO+	Energie vom Inverter	[kWh]	Betr	zeitliche Verfügbarkeit des Inverters	[%]
E IO-	Energie zum Inverter	[kWh]	Feld	Verfügbarkeit Feld	[%]
E IO	Energiebilanz Inverter	[kWh]	Tp b	mitl. Modultemperatur bei Betrieb	[°C]
E M	Energie Datenerfassung	[kWh]	spez. Ertrag	spezifischer Jahresertrag	[kWh/(kWp*a)]

Tabelle 18: Verwendete Symbole und Einheiten. [35]

## 16. Referenzen und Publikationen und Veranstaltungen

Einige der neueren Publikation sind auch auf [www.tnc.ch](http://www.tnc.ch) als pdf-File zugänglich.

### 16.1 Phase eins bis drei

- [1] Th. Nordmann, Motorway sound barriers: Recent results and new concepts for advancement of technology, First World Conference on Photovoltaic Energy conversion, Waikoloa USA, 1994
- [2] Th. Nordmann, A. Goetzberger: The Solar Sound Barriers: The Bifacial North/South Concept and the Application Potential in Germany, 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 23-27 October 1995, Nice, France
- [3] Th. Nordmann, Th. Bähler, Photovoltaik-Schallschutz-Integration; Neue Konzepte und erste Messresultate, Zehntes Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1995
- [4] Annual Report 1995, NEFF Project 656, Motorway sound barriers: recent results and new concepts for advancement of technology, BEW 1995
- [5] Th. Nordmann: Photovoltaic Building and Infrastructure Integration, The European Experience of Improvement in Technology and Economics, 9th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Nov. 11-15, 1996, Miyazaki, Japan
- [6] K. Reiche, A. Goetzberger, A. Frölich, Th. Nordmann: Integrated PV-Soundbarriers: Results from the International Competition and Realisation of Six 10 kWp Testing Facilities, 14 th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 30 June - 4 July 1997
- [7] TNC Consulting AG, «Strom statt Lärm», Poster und Dokumentation zur Wettbewerbs-Ausstellung Photovoltaik Schallschutz, ETH Zürich, 30.8.-6.9.96, Deutsches Museum München, 2. Oktober - 15. November 1996

## 16.2 Phase vier und fünf

- [8] Th. Nordmann, A. Frölich, K. Reiche, G. Kleiss, A. Goetzberger. Sechs 10 kWp Testanlagen für integrierten PV-Schallschutz. Erste Betriebserfahrungen und Messresultate aus Deutschland und der Schweiz, 13. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 1998
- [9] Th. Nordmann, A. Frölich, K. Reiche, G. Kleiss, A. Goetzberger: Integrated PV Noise Barriers: Six Innovative 10 kWp Testing Facilities - A German/Swiss Technological and Economical Success Story!, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, 6. - 10. Juli 1998
- [10] Solarstrom statt Verkehrslärm, Umweltschutz 2/99, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft, Juli 1999.
- [11] Th. Nordmann, A. Frölich: «Strom statt Lärm», Drei PV-Schallschutz Versuchsfelder. Nationale Photovoltaiktagung, 10./11. November 1999, Zürich, Poster
- [12] Th. Nordmann, A. Frölich: Drei integrierte PV-Schallschutz Versuchsfelder, Jahresberichte - E2000 - Photovoltaik-Programm, Pilot- und Demonstrationsprojekte, Bundesamt für Energie, 1997 bis 1999
- [13] Internet-Homepage der Expo 2000, Hannover, «Weltweite Projekte»: [http://www.expo2000.de/deutsch/projekte/wpindex\\_i.html](http://www.expo2000.de/deutsch/projekte/wpindex_i.html)
- [14] Th. Nordmann, A. Frölich, Martin Dürr, Adolf Goetzberger: First experience with a bifacial PV noise barrier, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1 - 5 May 2000, Glasgow, United Kingdom

## 16.3 Potentialstudien

- [15] G. Hille, K. Reiche, Potential der Photovoltaik auf Lärmschutzwänden an deutschen Verkehrswegen, Elfes Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1996
- [16] EU Thermie B Project: Evaluation of the potential of noise barrier technology for electricity production and market share, Final Report (Volume 1 und 2), Freiburg, 29.6.99 (Diverse Zusammenfassungen auf Deutsch erhältlich). Auch erhältlich als pdf-File auf [www.tnc.ch](http://www.tnc.ch)
- [17] Th. Nordmann, A. Frölich: Europäische Potentialstudie PV-Schallschutz, Nationale Photovoltaiktagung, 10./11. November 1999, Zürich, Poster
- [18] A. Goetzberger, Th. Nordmann, G. Hille: Das Potential von Photovoltaik auf Lärmschutzwänden in Europa, 15. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 2000
- [19] Th. Nordmann, G.Hille et al.: The Potential of PV Noise Barrier Technology in Europe, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1 - 5 May 2000, Glasgow, United Kingdom

## 16.4 Publikationen Photovoltaik/Schallschutz

- [20] Th. Nordmann, L. Clavadetscher, R. Hächler: Construction of a 100 KW Grid Connected PV-Installation using the Soundbarriers along a Motorway in the Swiss Alps. Proceedings of the Ninth E.C. PV Solar Energy Conference, Freiburg i. Br., p. 669 - 673 (1989).
- [21] R. Hächler und Th. Nordmann: 100 kW grid-connected PV-Installation along railway infrastructure in southern Switzerland. Feasibility study. Proceedings of the 10th European PV Solar Energy Conference, Lissabon, Portugal, S. 738-741 (1991).

- [22] Th. Nordmann, L. Clavadetscher: Prediction and effective yield of a 100 kW grid-connected PV-Installation. *Solar Energy* **51** 2, 101-107 (1993).
- [23] H. Wilk: 40 kW Photovoltaikanlage an der Autobahn-Schallschutzwand Seewalchen / Oberösterreich. *ÖZE*, Jg. 46, Heft 3, S. 113-120 (1993).
- [24] J. Schlangen, R. Van Puffelen: Integration of PV in a Dutch sound barrier. *Proceedings of the 12th European PV Solar Energy Conference*, S. 885-886, Amsterdam (1994).
- [25] L. Clavadetscher and Th. Nordmann: Evaluation of Grid-Connected PV-Installations , 12th European Photovoltaic Energy Conference, Amsterdam, 1994.
- [26] Th. Nordmann: Die solare Lärmschutzwand, Eurosolar Ulm, 27. - 29.6.1996
- [27] Th. Nordmann, A. Frölich, L. Clavadetscher: Eight Years of Operation Experience with two 100 kWp PV Soundbarriers, 14 th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 30 June - 4 July 1997
- [28] Luzi Clavadetscher, Thomas Nordmann: Gridconnected PV Plant A13 in Switzerland - 10 Years and 1'000'000 kWh later, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1 - 5 May 2000, Glasgow, United Kingdom

### 16.5 Veranstaltungen

- [29] Informationsveranstaltung und Pressekonferenz, PV-Anlage Mark I Domat Ems: Eine Million Kilowattstunden produziert, 3.9.99.
- [30] Eröffnung und Pressekonferenz, 10 kWp Bifacial Photovoltaik-Schallschutz Versuchsanlage Wallisellen-Aubugg, 6. März 1998.
- [31] Eröffnung und Pressekonferenz, 10 kWp Zick-Zack Photovoltaik-Schallschutz Versuchsanlage Wallisellen SBB, 27. Oktober 1998.
- [32] Photovoltaik Schallschutz Messergebnisse und Optimierung, Abschlusstreffen des deutschen Projektteils (BMFT), Freiburg i.B., 24. November 1998.

### 16.6 Referenzen

- [33] G. Blässer: Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants, Document A, Photovoltaic System Monitoring, Document B, Analysis and Presentation of Monitoring Data, JRC, ESTI Labor, Ispra, Italien 1991/92.
- [34] International Electrotechnical Commission (IEC): Standard IEC 61724, Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis.
- [35] Förderprogramm Photovoltaik, c/o TNC Consulting AG: Richtlinien zur Auswertung und Darstellung von Messdaten von PV-Netzverbundanlagen, Januar 1995.

# Anhänge

## A1. Kurze Einführung in die Photovoltaik

### A 1.1 Photovoltaik - Strom aus Sonnenlicht

Licht ist Energie. Auf einer Fläche von einem Quadratmeter fällt auch in unseren Breitengraden eine Sonnenleistung von bis zu 1000 Watt. Sonnenlicht kann direkt in Elektrizität umgewandelt werden. Man nennt diese Technik Photovoltaik. Die Umwandlung findet in Solarzellen statt. Solarzellen sind Halbleiterscheiben. Ihre Herstellung ist ähnlich derer von Computerchips. Basismaterial ist meist reines Silizium.

Die Energieumwandlung von Licht in Elektrizität geschieht lautlos und ohne bewegte Teile. So gibt es beim Betrieb von Photovoltaikanlagen keinen Lärm und keine mechanische Abnutzung. Die gewonnene Energie wird entweder in Batterien gespeichert oder in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

Trifft Licht auf eine Solarzelle auf, entsteht eine elektrische Spannung. Schliesst man einen elektrischen Verbraucher an die beiden Pole an, so fließt der Strom. Mehrere Solarzellen werden elektrisch zu Modulen zusammengeschaltet. Ihre Grösse und Form unterscheiden sich je nach Hersteller. Einzelne Firmen bieten auch auf Mass gefertigte Module an.

Solarmodule sind der Hauptbestandteil von Photovoltaikanlagen, die entweder als Insel- oder Netzverbundanlagen betrieben werden.

### A 1.2 Inselanlagen

Eine Photovoltaikanlage, die unabhängig vom öffentlichen Stromnetz funktioniert, bezeichnet man als Inselanlage. Ein Akkumulator speichert den Solarstrom des Tages für die Nacht.

Inselanlagen eignen sich für die Stromversorgung in abgelegenen Gebieten ohne Anschluss ans Elektrizitätsnetz. Es sind Anlagen wie man sie in Ferienhäuschen, Jagd- oder SAC-Hütten und bei abgelegenen Telekommunikationssystemen antrifft. Dieser Typ der Solaranlage muss so dimensioniert werden, dass im Akkumulator ausreichend Solarstrom gespeichert werden kann, um auch während einer längeren Schlechtwetterperiode alle benötigten Geräte zu betreiben.

### A 1.3 Netzverbundanlagen

PV-Anlagen im Netzverbund (Abb. 21) sind über einen Wechselrichter mit dem Elektrizitätsnetz gekoppelt, welches die Funktion des Speichers übernimmt. Der Wechselrichter wandelt den solaren Gleichstrom in netzkonformen Wechselstrom um. Der solar erzeugte Strom wird entweder direkt verbraucht oder in das Elektrizitätsnetz eingespeist.

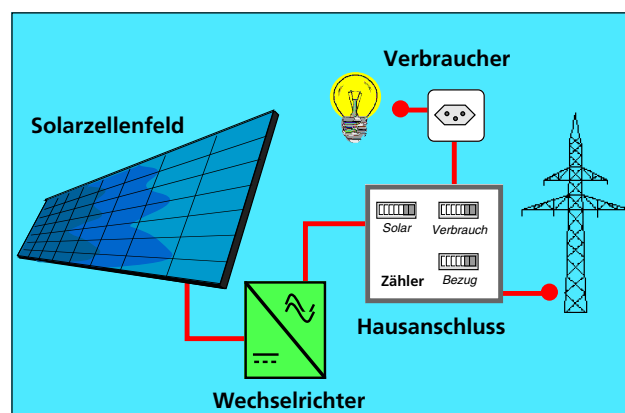


Abb. 21: Vereinfachtes Schema einer Photovoltaik-Netzverbundanlage

## A 1.4 Solares Energieangebot

Pro Jahr trifft auf einen horizontalen Quadratmeter Schweizerboden zwischen 1'000 und 1'500 Kilowattstunden Energie in Form von Licht auf. Der Gesamtenergieverbrauch der Schweiz beläuft sich im Jahr auf rund 250 Milliarden kWh. Dies entspricht rund 0.5% der Energie, welche von der Sonne auf das Gebiet unseres Landes eingestrahlt wird.

## A 1.5 Photovoltaischer Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der Umwandlung von Licht in Elektrizität liegt bei käuflichen Solarmodulen zwischen 8% und 15%. In den Forschungslabors werden zur Zeit Zellentypen entwickelt, welche einen Wirkungsgrad von bis zu 30% aufweisen.

## A 1.6 Lebenserwartung einer Photovoltaikanlage

Alle namhaften Herstellern von Solarmodulen gewähren eine Leistungsgarantie von bis zu 25 Jahren, was der minimalen Lebenserwartung entspricht. Die Komponenten einer PV-Anlage sind ungiftig und zum grössten Teil rezyklierbar.

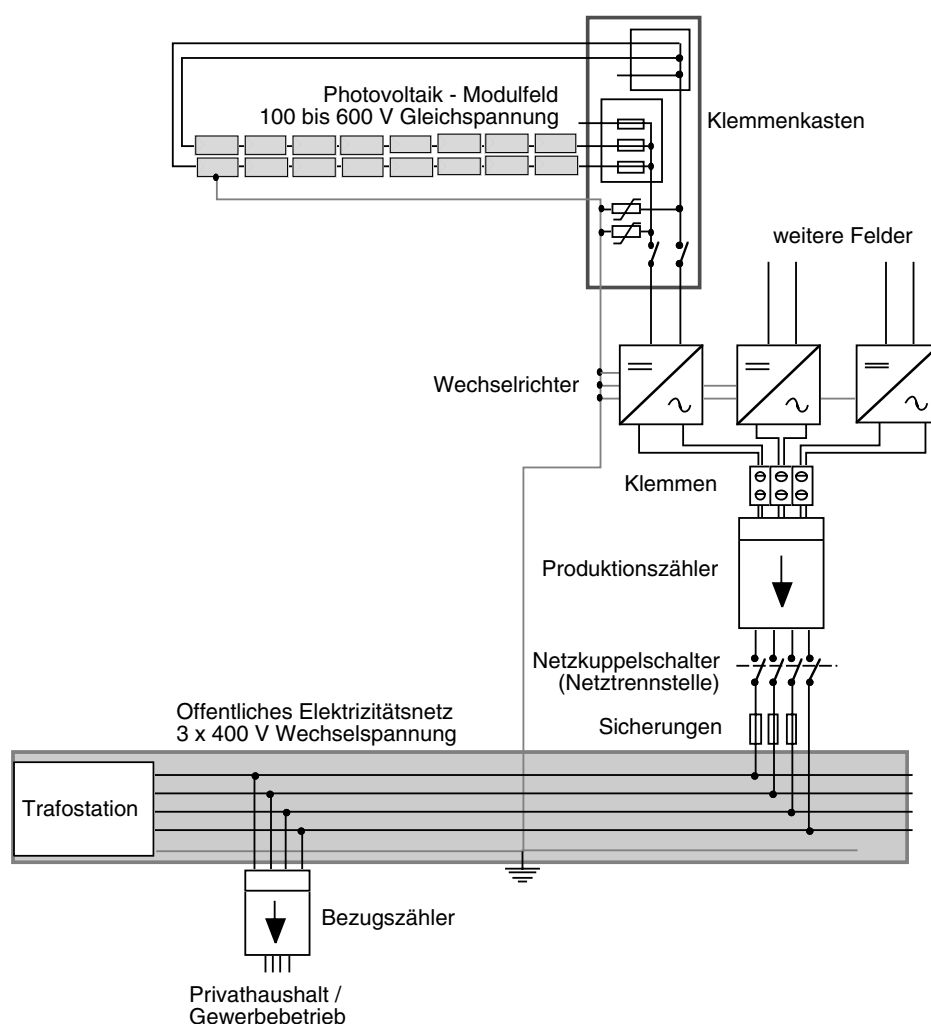


Abb. 22: Elektisches Konzept einer typischen PV-Netzverbundanlage. In der Schweiz und Deutschland werden die meisten PV-Anlagen im Netzverbund betrieben.

## A 2. Schallschutz an Verkehrswegen

### A 2.1 Lärmschutz mit Schallschutzwänden

Schallschutzwände an Verkehrswegen sind wandartige Baukörper, die zwischen Verkehrsweg und zu schützenden Bereichen angeordnet werden. Sie sind dazu bestimmt, den vom Verkehrsweg ausgehenden Schall zu hindern, ungedämpft in einen vor Lärm zu schützenden Bereich zu gelangen.

Standard-Schallschutzwände bestehen aus Pfosten mit zwischengesetzten, austauschbaren Wandelementen, die bezüglich deren Länge und maximalen Dicke der Enden standardisiert sind.

Befindet sich der zu schützende Bereich nur auf der lärmabgewandten Seite der Wand, erfolgt der Lärmschutz allein durch die Schalldämmwirkung der Wand (a). Sind auf beiden Seiten der Lärmschutzwand zu schützende Objekte, werden auch Anforderungen an die Schallabsorption der Wand gestellt (b). Schall-Reflexionen sind in diesem Fall unerwünscht. Abb. 23 stellt dies schematisch dar.

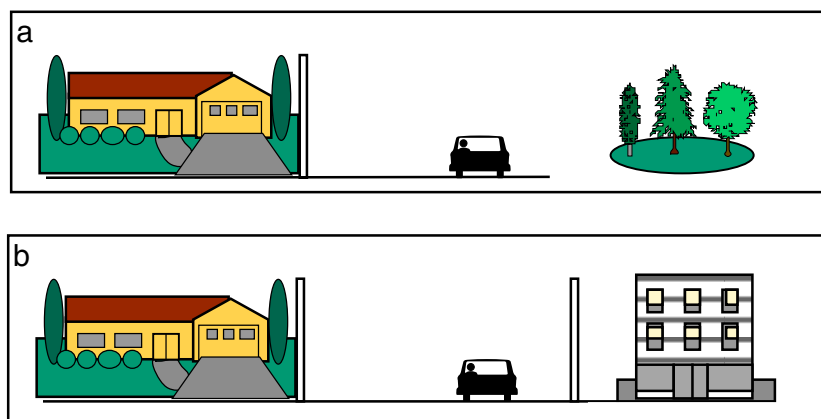


Abb. 23: Lärmschutzwände bei einseitiger Besiedlung (a) und bei beidseitiger Besiedlung (b).

### A 2.2 Schallschutz-Technologie

Schallabsorption wird üblicherweise dadurch erreicht, daß die Wand einen Lochanteil von ca. 20 % hat, durch den der Schall in die Wand eindringen kann. In der Wand befindet sich ein Dämpfungsmaterial (z.B. Mineralwolle), welches den Schall über Reibung in Wärme wandelt.

Neuartige Konzepte gehen derzeit dahin, eine hohe Absorption alternativ über faserfreie Absorber zu erreichen (z.B. Folien-, Membran- oder Plattenabsorber). Allen diesen Schallabsorbern ist gemein, dass ihre akustische Wirksamkeit auf bestimmten, an sich ganz unterschiedlich aufgebauten, vielfach gekoppelten Resonanz-Systemen inhärenten Reibungskräften beruht. Sie funktionieren alle ohne den Einbau zusätzlicher Dämpfungsmaterialien in ihre Hohlräume. Da die Materialeigenschaften der Folien, Membranen und Platten sowie der verschiedenen Unterkonstruktionen keinen großen Einfluss auf ihre Absorption haben, lassen sich diese alternativen Schallabsorber aus jedem beliebigen, den jeweiligen Einsatzbedingungen angepassten Material herstellen.

### A 2.3 Schalltechnische Anforderungen

Schallschutzwände müssen bezüglich ihrer Schalldämmungs- und Schallabsorptionseigenschaften vorgegebenen Anforderungen genügen. In Deutschland existiert dazu eine verbindliche Vorschrift, die ZTV LSW 88. In der Schweiz arbeiten die einzelnen Kantone nach verschiedenen, zum Teil eigenen, Richtlinien. Eine gesamtschweizerische Richtlinie, welche auf der europäischen Normen beruht, ist in Vorbereitung.

### Erforderliche Nachweise in Deutschland

Die Liste der erforderlichen Nachweise für eine zu erstellende Schallschutzwand kann in baustoff-unabhängige (Tab. 19) und in baustoffabhängige Nachweise unterteilt werden.

Prüfungsart	Notwendigkeit	ZTV-Lsw 88
Luftschalldämmung	Alle Baustoffe mit einem Flächengewicht < 40 kg/m <sup>2</sup> an der dünnsten Stelle	7.2.1
Schallabsorption	Alle absorbierenden und hochabsorbierenden Lärmschutzwände und Bekleidungen	7.2.2
Standsicherheit	Rechnerischer Nachweis für alle Systeme	3.3
Verhalten unter Eigengewicht	Rechnerischer Nachweis oder Lastversuch für alle Lärmschutzwände über 5,0 m Höhe	3.3.2
Standsicherheit der Elemente unter Windlast	Rechnerischer Nachweis oder Lastversuch für alle Elemente	3.3.3 und 7.2.3

Tab. 19: Baustoffunabhängige Nachweise für eine Schallschutzwand

In Tabelle 20 sind die in Deutschland geltenden Anforderungen für die drei definierten Typen von Schallschutzwänden (reflektierend, absorbierend, hochabsorbierend) aufgeführt.

Typ	Schalldämmung	Schallabsorption
reflektierend	> 25 dB	< 4 dB
absorbierend	> 25 dB	4dB < ΔL < 8dB
hochabsorbierend	> 25 dB	> 8dB

Tab. 20: Typologie und schalltechnische Anforderungen an Schallschutzwände [ZTV 88, S. 10]

Die Absorptionseigenschaften sind nur nachzuweisen, wenn «absorbierende» oder «hochabsorbierende» Systeme verlangt werden. Der Nachweis erfolgt durch Prüfung [ZTV 88, 7.2.2].

Die geforderte Dämmung aufgrund von Prüfungen [ZTV 88, 7.2.1] ist nur dann nachzuweisen, wenn das Flächengewicht einer Wand an der dünnsten Stelle nicht mindestens 40 kg/m<sup>2</sup> beträgt.

### Erforderliche Nachweise in der Schweiz

In der Schweiz wird von den Behörden in der Regel ein schalltechnischer Nachweis der EMPA verlangt. Die Absorptions-Prüfung bei der EMPA erfolgt dabei im Hallraum nach der Methode EN 20'354. Dafür wird ein 12 m<sup>2</sup> grosses Segment der Wand benötigt.

Die Abschirmungswirkung kann vor Ort nachgewiesen werden mit einer Messung nach der Norm ISO 10847. Sie wird aber in der Regel nicht gemessen, da sie mit genügend Materialkenntnissen und technischer Sorgfalt gut erreicht werden kann.

**A3: Photovoltaik-Schallschutz Info 1/97 (TNC GmbH)**

**A4: Photovoltaik-Schallschutz Info 1/98 (TNC GmbH)**

**A5: European Potential of PV-Noise Barriers:  
Goals and Background (Thermie B Project 12/99 TNC)**

**A6: European Potential of PV-Noise Barriers:  
Resultes for Europe (Thermie B Project 12/99 TNC)**

**A7: Die Europäische Potentialstudie PV auf Lärmschutzwänden:  
Resultate Schweiz (Thermie B Project 12/99 TNC)**