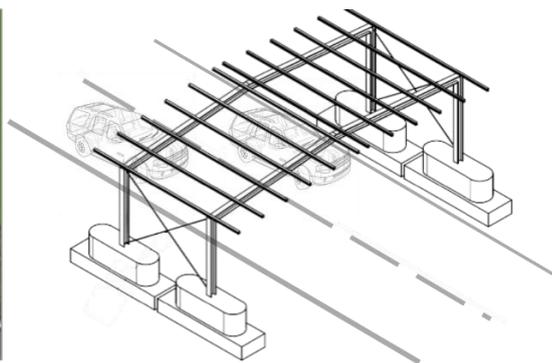
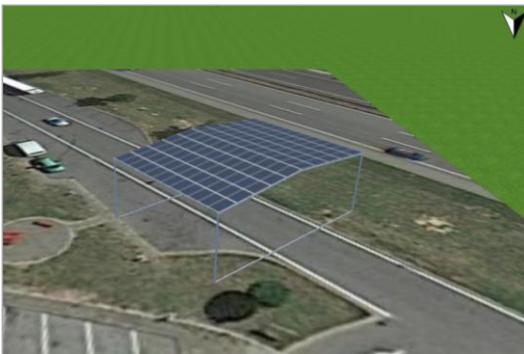


PV-Straßenüberdachung - Konzept PV - SÜD - K

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
D-A-CH Kooperation
Verkehrsinfrastrukturforschung 2019
DACH 2019

Februar 2021



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich



Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Mühlestrasse 2, Ittigen
3003 Bern
Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

Für den Inhalt verantwortlich:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH (AIT)
Center for Low-Emission Transport und Center for Energy
Giefinggasse 4
1210 Wien
Österreich



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
Deutschland



Forster Industrietechnik GmbH
Weyrer Straße 135
3340 Waidhofen an der Ybbs
Österreich



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich



PV-Straßenüberdachung - Konzept PV - SÜD - K

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
D-A-CH Kooperation
Verkehrsinfrastrukturforschung 2019
DACH 2019

AutorInnen:

**Dipl.-Ing. Manfred Haider, Dipl.-Ing. Dr. Dominik Prammer, Dipl.-Ing. Dr. Alois
Vorwagner**

**Dipl.-Ing. Christoph Mayr, Dr. Marcus Rennhofer, Dipl.-Ing. Karl A. Berger, Dr. Rita
Ebner**

**Dr. Martin Heinrich, Felix Basler, Andreas J. Beinert, Jonas D. Huyeng
Ing. Markus Fehringer, Tobias Beck**

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und
Technologie, Österreich

Bundesamt für Strassen, Schweiz

Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Österreich

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Deutschland

Forster Industrietechnik GmbH, Österreich

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	6
1 Einleitung und Motivation	9
1.1 Bereits errichtete Autobahnüberdachungen	10
2 Überblick und Pflichtenheft Gesamtkonstruktion	21
2.1 Grundprinzipien des Konzeptes	21
2.2 Anforderungen im Bereich Photovoltaik	23
2.3 Anforderungen im Bereich Tragkonstruktion	26
2.4 Bestimmung der Bauwerksform in Längs und Querrichtung	47
2.5 Sonderanforderungen	52
3 Konzept für die Photovoltaik	53
3.1 Allgemeine Informationen zu Silizium PV-Modulen	56
3.2 Allgemeiner PV-Modulaufbau	57
3.2.1 Glas-Folie-Module	57
3.2.2 Glas-Glas-Module	57
3.2.3 Gerahmte Module	58
3.3 Modulvariationen	58
3.3.1 FEM Modell	58
3.3.2 Untersuchte Modulvariationen	59
3.3.3 Durchbiegung verschiedener Modulaufbauten	59
3.4 Module für Überkopfmontage	61
3.4.1 Kommerzielle Angebote	62
3.4.2 Abschließende Bewertung für den Demonstratorbau	62
3.5 Modulorientierung und -neigung	63
3.5.1 Orientierung	63
3.5.2 Neigung	63
3.5.3 Standort	65
3.6 Montagetechnik und Entwässerung	73
3.6.1 Lösungen für Montage und Entwässerungen	73
3.6.2 Kommerzielle Anbieter	74
3.6.3 Wasserabfuhr	76
3.6.4 Empfehlung für den Demonstratorbau	76
3.7 Anschlusstechnik	76
3.8 Brand	84
4 Konzept für die Tragkonstruktion	85

4.1	Allgemeine und festgelegte Geometrie und Materialien	85
4.2	Statisch konstruktive Grundausslegung.....	90
4.3	Sonderlasten einer Autobahn-PV- Überdachung	93
4.3.1	Detaillierte Untersuchung zu Anforderungen betreffend Brandschutz	93
4.3.2	Ermüdungsbeanspruchung PV-Modul	109
4.4	Gründung und Anprallschutz	121
4.5	Montage und Aufstellungskonzept	122
5	Messtechnik-Konzept.....	123
5.1	Allgemeines.....	123
5.2	Überblick über die untersuchten Parameter.....	124
5.3	Konzept für Datenerfassung und -verarbeitung.....	124
5.4	Messungen im Bereich Photovoltaik	126
5.5	Messungen an der Tragkonstruktion und Auswirkungen auf die Infrastruktur ..	130
5.6	Messungen im Bereich Akustik und Lärmschutz.....	136
6	Energie- und Wirtschaftlichkeitsrechnung sowie Analyse der Nebeneffekte	138
6.1	Energieerträge aus der Photovoltaik.....	138
6.2	Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur.....	145
6.2.1	Auswirkung der Temperatur auf die Fahrbahnschädigung	145
6.2.2	Datenbasierte Auswertung der Fahrbahnschädigung unter Überdachungen 154	
6.2.3	Abschätzung des Lebensdauerverlängerung des Straßenoberbaus	160
6.2.4	Auswirkung der Überdachung auf Schallausbreitung und Lärmschutz.....	163
6.2.5	Optische Auswirkung der Konstruktion auf die Verkehrsteilnehmer	170
6.3	Abschätzung der Kosten.....	172
6.3.1	Investitionskosten PV-SÜD Überdachungs-Modul	172
6.3.2	Skalierungseffekte	174
6.3.3	Kosteneffekte durch die Lebensdauerverlängerung der Fahrbahndecke ..	176
6.4	Wirtschaftlichkeitsrechnung	176
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	184
8	Literatur.....	185
9	Anhänge	190

KURZZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts Photovoltaik-Straßenüberdachung-Konzept (PV-SÜD-K) wurde ein Konzept für eine Überdachung der Fahrbahn im hochrangigen Straßennetz im D-A-CH Raum mit Solarpaneelen erstellt und deren sekundäre Effekte auf die Straßeninfrastruktur analysiert. Dabei wurden die technischen Randbedingungen und Anforderungen, die sich aus diesem Einsatzgebiet ergeben, im Hinblick auf die eingesetzte Photovoltaiktechnologie, die mögliche Energiegewinnung sowie die erforderliche Tragkonstruktion ermittelt. Diese wurden durch umfassende Recherchen der geltenden Regelwerke für Autobahnen erhoben und in Form eines Pflichtenheftes zusammengestellt. Daraus ergab sich, dass Grundprinzipien aus den Regelwerken für Schilderbrücken auch für diese Form der Überdachungen herangezogen werden können.

Diese Anforderungen und die Forderung einer möglichst flexibel und wenig in den Verkehrsbetrieb eingreifenden Lösung wurde in Form eines in Stahl aufgeständerten Satteldaches für Straßenabschnitte mit vorwiegenden Nord-Süd-Verlauf sowie in Form eines aufgeständerten Pultdaches für Straßenabschnitte mit vorwiegend Ost-West-Verlauf entsprechend der optimalen PV-Ertragsausnutzung gewählt. Diese Überdachung soll als Stahlrahmenkonstruktion mit beidseitig aktiven PV-Elementen in Glas-Glastechnologie realisiert werden. Die Solarpaneele sollten für den Überkopf-Einsatz angepasst sein und dieses durch eine Zertifizierung nachgewiesen haben. Ergänzende Anforderungen wie die unbekannte aerodynamische Lasteinwirkung von LKW-Vorbeifahrten wurden mittels Messkampagnen an Straßenabschnitten ermittelt und in Versuchen an PV-Paneelen getestet.

Das Konzept sieht ein Grundelement mit einer Basislänge von 10 m in Fahrtrichtung, 5,5 m lichter Höhe unter der Überdachung und einer Nennleistung von 37,8 kWp vor, das bis zu einer Länge von 80 m modular erweitert werden kann. Damit kann die Konstruktion flexibel an den bestehenden Straßenverlauf (z.B. Wanne, Kuppe, Bogen) angepasst werden, und aus sicherheitstechnischer Sicht ist jedes Tragelement für sich selbsttragend. Ein Grundprinzip des Konzeptes war, die wesentlich höheren technischen Anforderungen eines Tunnels oder einer Einhausung zu vermeiden. Daher ist aufgrund der Regelwerke die maximale durchgehend überdachte Länge auf 80 m beschränkt, um sicherheitstechnischen Anforderungen mit einfach umzusetzenden Mitteln gerecht zu werden. Das so erstellte Grundkonzept wurde als Stahlrahmenkonstruktion mit querliegenden Pfetten unter anderem im Hinblick auf die statischen Erfordernisse wie die Lastfälle Wind, Schnee und Anprall sowie aerodynamische Einwirkungen und Brand für den voraussichtlichen späteren Demonstratorstandort vordimensioniert und untersucht. Die Fundierung erfolgt auf Stahlbetonfundamenten, sicherheitstechnische Leiteinrichtungen zur Reduktion der Anpralllasten sind analog wie bei Schilderbrücken vorzusehen. Für die Photovoltaik wurde

ein geeignetes Montagesystem gewählt, das ausreichenden Wasserabfluss gewährleistet, und die Ausrichtung sowie die mechanische Wechselwirkung mit der Tragkonstruktion betrachtet. Im Hinblick auf den zu errichtenden Demonstrator wurde auch ein Konzept für begleitende Messungen und die messtechnische Instrumentierung erstellt.

Schließlich wurden auch die solaren Energieerträge, die zu erwartenden Auswirkungen auf Infrastruktur und Lärmschutz sowie die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer derartigen PV-Überdachung analysiert. Dazu wurden Simulationen und existierende Daten aus möglichst vergleichbaren Situationen herangezogen. Für die geplanten Standorte im Bereich Baden-Württemberg konnte ein solarer Jahresenergieertrag von etwa 40 MWh/Jahr pro Modul bzw. 4 MWh/Jahr je Meter überdachter Fahrbahnlänge (1040 kWh/kWp) ermittelt werden. Zur Analyse der sekundären Effekte dienten vertiefte Auswertungen von Messdaten von Straßenoberflächeneigenschaften und Mess- sowie Simulationsdaten von Temperatur-Spannungszusammenhängen in Betonfahrbahndecken. Die Analyse von Fahrbahnoberflächen im Bereich unter breiten Brücken (überdachungsähnlich) zeigte eine erhebliche Reduktion der Fahrbahntemperaturen und der damit einhergehenden Spannungen in der der Fahrbahndecke. Weiters konnte eine verminderte Entwicklung von Rissen und Spurrinnen, aber auch eine leichte Reduktion der Griffigkeit festgestellt werden. Insgesamt konnte daraus eine Verlängerung der Lebensdauer des Fahrbahnoberbaus um etwa 15-30% abgeschätzt werden. Im Bereich Lärmschutz zeigten Simulationen, dass durch den Einsatz einer PV-Überdachung mit Schalldruckpegelerhöhungen aufgrund zusätzlicher Reflexionen der Schallwellen an der Unterseite der Überdachung zu rechnen ist. Für die Satteldachvariante ohne Vorhandensein von Lärmschutzwänden beschränken sich diese Pegelerhöhungen auf den unmittelbaren Nahbereich der Straße (bis 25 m). Lärmschutzwände mittlerer Höhe (2 - 4 m) werden in ihrer Wirksamkeit durch die Überdachung erheblich reduziert, und erst wenn die Lärmschutzwand 5 m Höhe erreicht, wird ein gewisser zusätzlicher Schallschutz durch die Überdachung erreicht. Aus verkehrstechnischer Sicht ist aufgrund der Stützen/Rahmenanordnungen nicht mit nachteiligen Wirkungen aus Stroboskop-Effekten zu rechnen. Betreffend Anprall und Brandsicherheit wurden entsprechende Sicherheitsvorkehrungen als Entscheidungsgrundlage vorgeschlagen. Damit ist aus Sicht des Konsortiums die technische Umsetzbarkeit eines entsprechenden Demonstrators gegeben.

Die gesamte Wirtschaftlichkeitsrechnung unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten zeigt einen geringen Einfluss durch die Nebeneffekte auf die Infrastruktur und hängt im Wesentlichen von den Investitionskosten und den angesetzten Strompreisen ab, wobei davon ausgegangen wurde, dass der erzeugte Strom für den Eigenverbrauch der Straßenbetreiber eingesetzt wird. Bei einem Bezugstarif von 30 Cent/kWh konnte eine Amortisation innerhalb von etwa 16-18 Jahren errechnet werden, womit auch eine Mehrfachnutzung bereits versiegelter Flächen erreicht werden könnte. Im Rahmen der

Konzepterstellung wurden soweit wie möglich auch schon Informationen bezüglich des geplanten Demonstrators ermittelt, wobei allerdings die konkrete Ausführungsplanung, Errichtung und messtechnische Begleitung des Demonstrators Teil des anschließenden Projektes PV-SÜD-D sein wird.

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die Energiegewinnung durch Photovoltaik (PV) gehört zu den Schlüsseltechnologien zur Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energiequellen an der Primärenergieproduktion. Der Einsatz dieser Technologie in großem Maßstab setzt die Verfügbarkeit entsprechender Flächen für die Installation von Photovoltaikmodulen voraus. Das Straßennetz und die zugehörigen Flächen in Deutschland, Österreich und der Schweiz stellen daher ein derzeit noch weitgehend ungenutztes Potential für solare Nutzung dar. Obwohl bereits eine große Anzahl von Projekten durchgeführt wurde und die prinzipielle Umsetzbarkeit gezeigt werden konnte, so ist die Wirtschaftlichkeit oft nur in Spezialfällen wie zum Beispiel bei der Energieversorgung von Rastplätzen und Tunnelbeleuchtungen gegeben. Allerdings hat eine Solaranlage in Form einer Überdachung von befahrenen Verkehrsflächen neben der eigentlichen solaren Energiegewinnung und der Mehrfachnutzung der Fläche auch potentiell weitere positive Wirkungen für den Infrastrukturbetreiber, die in eine Gesamtbetrachtung einbezogen werden sollten. Zu diesen Wirkungen gehören vor allem der Schutz der Straßenoberfläche vor Niederschlägen (Regen, Schnee, Eis) und Überhitzung im Sommer, die dadurch mögliche Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Fahrbahndecken und der mögliche zusätzliche Lärmschutz durch Abschirmungswirkungen.

Im Projekt PV-Straßenüberdachung-Konzept (PV-SÜD-K), das gemeinsam mit dem Projekt PV-Straßenüberdachung-Demonstrator (PV-SÜD-D) einen Projektcluster bildet, wurde das vorliegende Konzept für einen Prototypen für eine derartigen PV-Straßenüberdachung erstellt. Dieser Prototyp soll dann in PV-SÜD-D als Demonstrator erstellt, mit Messtechnik ausgerüstet und ein Jahr lang im Betrieb wissenschaftlich begleitet werden. Bei der Konzeption des Demonstrators müssen die vielfältigen Anforderungen an eine derartige Konstruktion im hochrangigen Straßennetz wie zum Beispiel Entwässerung, Wind- und Schneelasten, Standsicherheit und Anprallsicherheit, Wartungsmöglichkeiten und Verkehrssicherheit berücksichtigt werden. Auch die Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit der PV Elemente, ihre statische Eignung sowie ihr effizienter Einsatz für diese Anwendung ist wichtige Aspekte dieser Untersuchungen. Aus den Analysen der Konzeptphase sowie im Falle der Umsetzung als Demonstrator aus den Messdaten können wertvolle Ergebnisse für den zukünftigen Einsatz solcher Photovoltaiksysteme im D-A-CH-Raum gewonnen werden, die für diesen Bereich wegweisend sein werden.

Durch die PV-Überdachung sollen soweit möglich folgende Ziele erreicht werden:

- Energiegewinnung durch Photovoltaik mit Hilfe geeigneter PV-Modultechnik
- Nutzung von bestehenden verbauten Flächen

- Flexibler Einsatz im hochrangigen Straßennetz
- Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Fahrbahn durch Schutz vor Überhitzung, Niederschlägen
- Positive Auswirkungen auf Fahrbahnoberflächeneigenschaften
- Zusätzlicher Lärmschutz

Diese Anforderungen sollen in Bezug auf technische Machbarkeit und ökonomische Umsetzbarkeit geprüft werden und an einem Demonstrator verifiziert werden.

1.1 Bereits errichtete Autobahnüberdachungen

Es wurden bereits Photovoltaikanlagen an Tunnelportalen und Lärmschutzwänden errichtet und diese sind in Betrieb, um direkt am Ort des Verbrauchs Eigenenergie umweltfreundlich zu erzeugen. Es besteht ein sehr hohes Potential für einen weiteren Ausbau der Photovoltaik an Autobahnmeistereien, Rastplätzen, Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Tunnelanlagen und vielen weiteren Infrastruktureinrichtungen, welche einen elektrischen Energiebedarf haben. In den folgenden Abschnitten werden einige der bereits umgesetzten Projekte dargestellt und die Kernmerkmale beleuchtet.

DE: A3-Einhausung zwischen Hösbach und Aschaffenburg

Südöstlich von Aschaffenburg wurde zum Zwecke des Lärmschutzes eine Autobahn-Einhausung aus Beton errichtet, welche teilweise begrünt, teilweise mit Blechdach versehen ist. Auf der Einhausung wurde ein 2.700 Meter langes Solardach errichtet. Alle betrieblichen Belange der Beton-Einhausung bleiben gewährleistet und gleichzeitig entsprechen die Lage, Alter und Zustand des Bauwerks den Voraussetzungen zur Errichtung des Solarkraftwerks. Das PV-System besteht aus drei Anlagenteilen (West: 1.018 kWp; Mitte: 851 kWp; Ost: 780 kWp) mit insgesamt 2.649 kWp. Jeder Anlagenteil besitzt eine eigene PV-Wechselrichterstation (SMA), Messung und 20-kV-Einspeisung. Es wurden insgesamt 16.000 Standard-PV-Module von EvergreenSolar verbaut.¹ Anhand dieses Beispiels ist ersichtlich, dass PV-Kraftwerke auch sehr erfolgreich in der Länge aufgebaut werden können, was für die Integration an Straßen inhärent ist. Beispielhafte Ansichten der Anlage sind in Abbildung 1 zu finden.

¹ <https://www.sonnenenergie.de/sonnenenergie-redaktion/SE-2009-03/Layout-fertig/PDF/Einzelartikel/SE-2009-03-s030-Photovoltaik-Autobahn-Solarstromdach.pdf>



Abbildung 1: Ansichten der Autobahn-Einhausung mit PV Anlage entlang der A3 bei Aschaffenburg. Foto: Rüdiger Dunker (dpa) Quelle: www.hna.de

AT: Südportal Katschbergtunnel

Entlang der A10 Tauernautobahn wurde auf dem Portal eines Autobahntunnels eine 180 kWp PV-Anlage errichtet. Die 670 Module sind auf einer Länge von 180 Metern am Flachdach (Kies) montiert. Die erzeugte Energie wird direkt von den Betriebsmitteln im Tunnel verbraucht, von der Beleuchtung und von der gesamten Sicherheitstechnik. Eine Rückspeisung in das öffentliche Netz ist nicht vorgesehen, da die gesamte erzeugte Energie für den Eigenbedarf verwendet wird.²



Abbildung 2: Standard-PV-Anlage auf dem Dach des Südportals des Katschbergtunnels in Österreich. Bildquelle: ASFINAG

DE: Lärmschutzeinhausung der A1 in Köln-Lövenich

Die 1,5 Kilometer lange Lärmschutzeinhausung über der A1 bei Köln-Lövenich ist eine Mischung aus Tunnel und Trog. Die bis zu sieben Meter hohen Betonwände sind mit einer über 30.000 m² großen Stahl-Glas-Konstruktion überdacht, in die 1.500 zweieinhalb Tonnen schwere Fensterelemente integriert sind. Insgesamt besteht die gesamte Lärmschutzeinhausung aus drei Betonwänden mit ca. 4,5 Meter lichter Höhe, je eine an

² https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20181204_OTS0082/asfinag-die-kraft-der-sonne-versorgt-den-katschbergtunnel-kuenftig-mit-strom

den Fahrbahnseiten und eine auf dem Mittelstreifen (siehe Abbildung 3). Das elektromotorische Öffnen und Schließen der Fensterflügel ist vorgesehen.

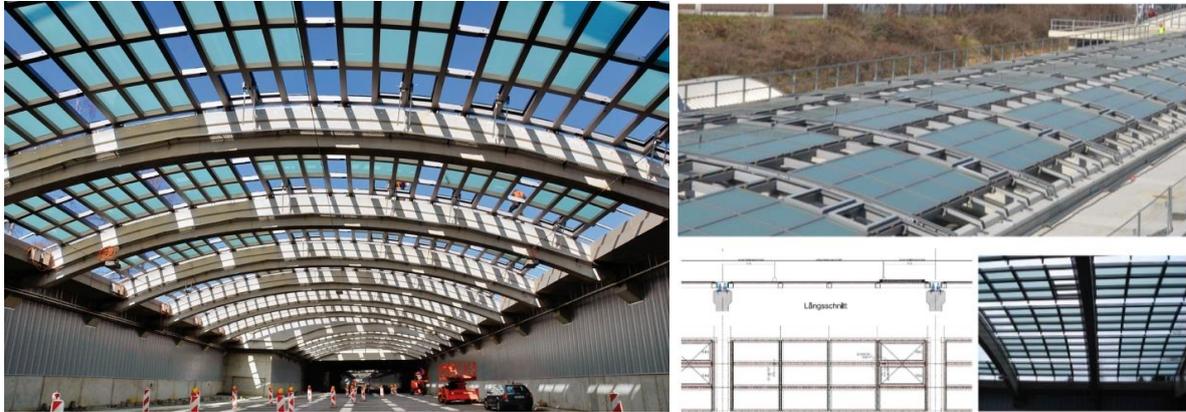


Abbildung 3: Ansichten der Lärmschutzeinhausung der A1 in Köln Lövenich. Quellen:
https://bauforumstahl.de/upload/documents/publikationen/Lehmann_Schmidt_Vortrag.pdf
https://www.dbz.de/artikel/dbz_Ein_Dach_aus_Glas_Pilotprojekt_Laermschutz_einhausung_Autobahn_A1_Koeln-L_1844245.html

Dieses Projekt wurde als reine Lärmschutzmaßnahme realisiert und enthält keine PV-Komponenten. Besonders ist hier das Glasdach, durch welches das Tageslicht auf die Fahrbahn fällt und eine angenehme Atmosphäre schafft. Die Gläser sind als Verbundsicherheitsglas (VSG) aus drei Schichten mit teilvorgespanntem Glas (TVG) aufgebaut, die mit einem Polymer (PVB) zusammengehalten werden. Dabei wurden Anforderungen durch die Statik (Sog und Druck), Begehbarkeit für Wartungszwecke, sowie eine Opferschicht gegen Vandalismus und Steinschlag implementiert. Der resultierende Glasaufbau ist:

6 mm TVG / PVB / 8 mm TVG / PVB / 6 mm TVG mit 1x transluzenter Folie



Abbildung 4: Draufsicht der Lärmschutzeinhausung der A1 in Köln Lövenich.³

Das Bauwerk ist rechtlich als Tunnel anzusehen, abweichend von der geplanten Ausgestaltung der PV-Überdachung in diesem Vorhaben. Die Errichtung konnte unter laufendem Verkehr erfolgen, was die Beeinträchtigung reduziert.

DE Photovoltaikanlage am Parkhausdach

Die größte Photovoltaikanlage Deutschlands aus Glas-Glas-Modulen wurde in Vilsbiburg (Bayern) errichtet. 4.200 auf einer Stahlkonstruktion installierte 305 Wp-Module liefern eine Gesamtleistung von 1,281 MWp (s. Abbildung 5).

³ Quelle: <https://die-glaswerkstatt-krein.de/referenzen/item/12-laermschutzeinhausung-a1-koeln-loevenich.html#gallery771a23ea9e-3>



Abbildung 5: Photovoltaikanlage am Parkhausdach mit Glas-Glas PV Modulen.⁴

Bei diesem Objekt sind die PV-Module unmittelbar als Abdeckung eingesetzt und werden von der Tragkonstruktion gehalten. Durch den Abstand der Silizium Solarzellen innerhalb der Module, kann auch hier Tageslicht auf die Parkfläche fallen. Die hier eingesetzten PV-Module haben eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung und können daher wie Verbundsicherheitsglas eingeplant werden.

KR Schallschutztunnel in Südkorea

Die Korea Expressway Corporation hat auf dem Dach eines 1,3 km langen schalldichten Tunnels in Gwanggyo, Provinz Gyeonggi eine Photovoltaikanlage mit 2,6 MWp installiert. Dabei handelt es sich um eine Stahlkonstruktion mit eingesetzten Gläsern zum Schallschutz und darauf aufgesetzten, auf einer Alu-Unterkonstruktion aufgeständerten Photovoltaikmodulen im Rastermaß der Glaselemente.

⁴ Quellen: <https://www.solarwatt.de/gruende/kundenstimmen/draexlmaier-parkhaus>;
<https://www.pv-magazine.de/2020/10/16/solarwatt-erhaelt-allgemeine-bauaufsichtliche-zulassung-fuer-60-zellen-modul/>

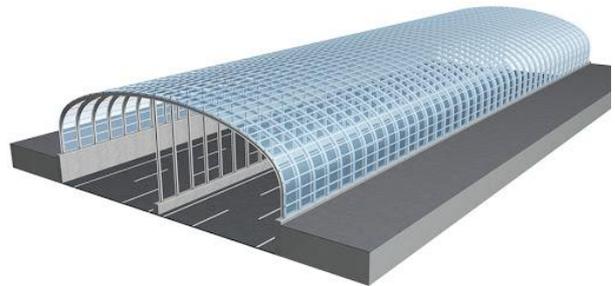


Abbildung 6: Ansichten der Schallschutzeinhausung in Korea mit aufgesetzten PV Modulen.⁵

⁵ Quelle: <http://koreabizwire.com/s-korean-soundproof-tunnel-to-double-as-solar-power-generator/105657>

KR Fahrradweg unter einem Solardach auf der Autobahn

In Südkorea verläuft ein Radweg mehr als 30 Kilometer inmitten einer Autobahn, welcher mit Solarpanelen bedeckt ist. Dieser befindet sich südlich der Hauptstadt Seoul zwischen den Städten Daejeon and Sejong auf einer Strecke von mehr als 30 Kilometern und ist größtenteils mit Solarpanelen bedeckt, die vor Sonne und Regen schützen und Strom produzieren. Standard-PV-Paneele sind auf relativ kleinen Stahlsegmenten montiert.



Abbildung 7: Quelle: <https://www.dailymotion.com/video/x210ns6>

CH Konzept zur Autobahnüberdachung im Kanton Zürich

Ein Konzept für die Überdachung von Autobahnen in der Schweiz wurde bereits 2011 ausgearbeitet, wurde bisher aber nicht umgesetzt. Derzeit liegen dafür Renderings und Projektskizzen vor. (Quelle: <https://www.sonnenseite.com/de/energie/autobahn-als-solar-kraftwerk/>)



Abbildung 8: © Servipier AG – Projektskizze Autobahn solaire

AT Lärmschutzeinhausung aus Holzkonstruktion A10-Eben

Eine aus Lärmschutzgründen eingehauste Anlage ist auch im österreichischen Netz an der A 10 bei Eben im Pongau zu finden. Hier wurde ein über einen Kilometer langer Autobahnabschnitt mit Holzleimbinder und Holzleichtkonstruktion überdacht (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10).



Abbildung 9: Draufsicht Einhausung A 10, zur Verfügung gestellt von ASFINAG.

Wie hier in Abbildung 10 ersichtlich ist wurden diese Stahlbinder auf Stahlbetonstützen aufgelagert und den damaligen Anforderungen entsprechend dimensioniert.

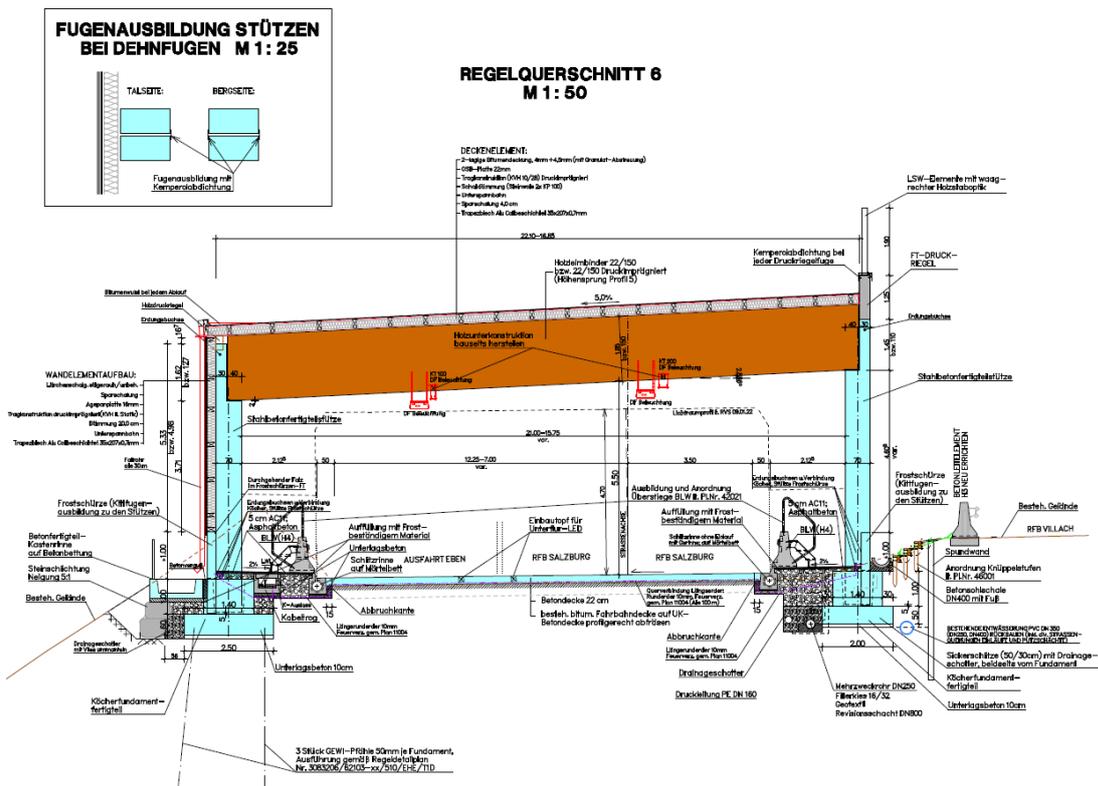


Abbildung 10: Beispiel Regelquerschnitt Einhausung A 10. © ASFINAG

Die Gründung erfolgte als Tiefgründung mit GEWI-Pfählen, auf denen ein Fundament aufgesetzt wird. Dennoch können hier grundlegende Konstruktionsprinzipien wie eine vor

den Stützen vorgelagerte Leiteinrichtung zur Ableitung von Fahrzeugen, das Entwässerungskonzept als auch Dachneigung für flach geneigte Überdachungen erkannt werden. Hier handelt es sich um eine volle Einhausung über mehr als einen Kilometer Straßenlänge, weshalb hier auch erhöhte Ansprüche an die Straßenentwässerung, Beleuchtung, Brandschutz und Lärmschutz gegeben sind.

2 ÜBERBLICK UND PFLICHTENHEFT GESAMTKONSTRUKTION

2.1 Grundprinzipien des Konzeptes

Überblick:

Das Konzept wird als eine Photovoltaik-Überdachung über eine zweistreifige Autobahn inklusive Pannestreifen entwickelt. Dieses wird dabei völlig losgelöst vom später im Projektcluster zu errichteten Demonstrator als eine Überdachung eines Regelausbahnabschnitts mit PV-Modulen als Solarstraße konzeptionell aufbereitet. Alle wesentlichen Anforderungen betreffend Verkehrsbetrieb, Verkehrssicherheit, Tragkonstruktion, Betrieb und Winterdienst bis hin zur Nutzung des Stroms und der möglichen Begleiterscheinungen wie Lärmschutz oder Schutz vor sommerlicher Überhitzung der Fahrbahn werden betrachtet und als Entscheidungsgrundlage mit einer Wirtschaftlichkeitsanalyse aufbereitet. Im 2. Projektteil PV-SÜD-D wird ein Demonstrator aufbauend auf diesen Erkenntnissen für eine Zufahrt eines Autobahnparkplatzes im Detail mit den örtlichen Anforderungen entworfen, geplant und errichtet, messtechnisch untersucht und über den Projektzeitraum gemonitort.

Form, Gestalt und Konstruktionstyp:

Die grundsätzliche Auslegung wie Form und Gestaltung der Überdachung ist hier in erster Linie an die optimierte Nutzung der Sonnenenergie anzupassen. Regelwerke wie Normen und Richtlinien der jeweiligen Länder haben einen sehr wesentlichen Einfluss auf die Auslegung, denn sie sollen vor allem den sicheren Verkehrsbetrieb und die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer regeln.

Die Materialwahl der Konstruktion ist grundsätzlich nach technischen oder wirtschaftlichen Anforderungskriterien zu treffen. Eine prinzipielle Entscheidung für die Ausführung der Tragkonstruktion als Stahlbaukonstruktion im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde bereits in der Antragsphase vom Konsortium vorgeschlagen. Diese bietet im Hinblick auf Spannweiten, Fundierung und Vorfertigung von PV-Modulen Vorteile. Einer der wichtigsten Vorteile sind hier vor allem die Montagemöglichkeiten über der Autobahn, wobei hier auf eine möglichst kurze Verkehrseinschränkung zu achten ist. Hier hat der Stahlbau derzeit noch eindeutige Vorteile, und es sollte mit kurzzeitigen Sperrungen von Fahrstreifen oder Nachtsperren das Auslangen gefunden werden können.

Auf bereits existierendes Wissen kann bei der Montage von Überkopfwegweisern und Schilderbrücken zurückgegriffen werden, welche in kurzer Zeit errichtet werden müssen.

Auch im Hinblick auf Dauerhaftigkeit, Ermüdung, oder Anprall sind hier bereits umfassende Erkenntnisse und Dimensionierungserfahrungen vorhanden. Der Aspekt des Brandwiderstandes wird hier später umfassend adressiert werden, und kann, falls erforderlich mit konventionellen Mitteln einfach bewerkstelligt werden.

Eine auf den ersten Blick nachhaltige Variante würde eine Holzbaulösung bieten, welche auch Montagevorteile böte. Erste Pilotprojekte diesbezüglich wurden unlängst in der Schweiz von der ASTRA als Grünbrücken/Wildüberfuhr (z.B. Koppigen, Neuenkirch) bereits umgesetzt. Deren Verhalten unter Verkehrsbedingungen, vor allem das hygroskopische Verhalten und deren indirekte Auswirkungen auf Langzeitverformungen werden derzeit beispielsweise von [8] umfassend gemonitort. Je nach Eignung und Ergebnis von Dauerhaftigkeitsaspekten könnte der Holzbau hier eventuell auch in künftige Überlegungen mittelfristig einbezogen werden.

Wesentliche Grundentscheidungen im Entwurf des Tragkonzept sind im Hinblick auf die Tragwerkssicherheit zu treffen und wurden im Einvernehmen aller Projektbeteiligten und Auftraggeber Vertreter gewählt:

- 1) Die Überdachungskonstruktion muss flexibel sein und einfach an den bestehenden Straßenverlauf anpassbar sein
- 2) Die Auslegung der Grundgeometrie soll optimiert für Stromerzeugung, Design und Anforderungen an Straßenbetrieb sein
- 3) Die Auslegung betreffend Geometrie, Länge und Querschnitt wird so gewählt, dass keine Regelwerke und Vorschriften für Tunnelbauwerke zwingend angewendet werden müssen
- 4) Die Tragkonstruktion ist so auszulegen, dass es zu keinem Systemversagen im außergewöhnlichen Lastfall Brand bzw. Anprall kommen kann.

Die Abmessungen werden so gewählt, dass das geforderte Lichtraumprofil inklusive Reserven für Anprallschutz eingehalten werden kann. Dabei bestimmen im Querschnitt die Anforderungen betreffend Straßenregelbreite, Lichtraumprofil und Anprallschutz die Spannweite sowie die Tragwerksunterkante.

Konzeptionelle Grundprinzipien der Energieerzeugung:

Wesentliche Grundentscheidungen im Entwurf für die PV - Anlage wurden im Hinblick auf Sicherheit, Ertragsoptimierung und spätere Skalierbarkeit der Lösung untersucht. Die zu errichtende Anlage soll folgenden Anforderungen genügen:

- Die PV-Lösung soll skalierbar auf Autobahnen mit 2 und 3 Fahrstreifen mit und ohne Seitenstreifen und vielfältigbar sein, also keine ortsspezifische Sonderlösung erfordern
- Die Energieerzeugung soll hinsichtlich der baulichen Gegebenheiten optimiert und maximiert werden; d.h. dass möglichst die gesamte überdachte Fläche photovoltaisch zu nutzen ist, exklusive Öffnungen zu Belichtung oder Belüftung soweit erforderlich
- Die Energieerzeugung soll durch die Art der Konstruktion und bauliche Lösung möglichst unabhängig von der Fahrtrichtung der Fahrbahn (N-S, O-W, etc.) sein.
- Die Anlagen sollen so errichtet werden, dass eine Selbstverschattung ausgeschlossen oder minimiert wird.

2.2 Anforderungen im Bereich Photovoltaik

Die konstruktiven Anforderungen an die PV wurden hinsichtlich folgender Aspekte untersucht:

- Die Konstruktion muss überkopftauglich sein, vorzugsweise eine Allgemeine Bauartzulassung haben oder eine zusätzliche Absturzsicherung oder einen Aufbau auf einem anderen verschalenden Dach (z.B. Blech) aufweisen
- Ein zugelassenes und kommerziell verfügbares Produkt ist einer Sonderanfertigung vorzuziehen. Dimensionen müssen mit vertretbarem Befestigungsaufwand sowohl an die Tragkonstruktion anpassbar sein, als auch eine vollständige Belegung des Demonstrators erlauben.
- Die Konstruktion muss in verschiedenen Ausrichtungen funktionieren: Ost-West, Nord-Süd bzw. Lagen dazwischen, mit möglichst hoher Resistenz des Energieertrages gegenüber Fernverschattung (Berge) und Nahverschattung (Masten, Kabel), maximale Belegung oder ähnliche Nominal- bzw. Ertragswerte sollen möglichst unabhängig von Orientierung erreichbar sein.
- Die Sicherheit und Haltbarkeit der zu verwendenden Produkte wurden so bewertet und gewählt, dass ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Vibrationen, Wind und Schneebelastung gewährleistet ist.

- Brandverhalten und Brandzulassung wurden so bewertet, dass in Frage kommende Produkte kompatibel mit den erstellten Brandschutzgutachten der Tragkonstruktion und der Hitzeentwicklung darin ein optimales Verhalten begünstigen (kein totales Versagen, brandhemmende Wirkung).
- Die Orientierung und Befestigung der Module sollte eine mögliche Selbstreinigung unterstützen, im Wartungsfall erreichbar und verformungssicher sein, sowie die Entwässerung unterstützen und Eisbildung soweit technisch planbar verhindern.
- Schlussendlich soll die Photovoltaikanlage mit dem erzeugten Strom vorzugsweise nahegelegene Verbraucher der Autobahnbetreiber versorgen. Dazu ist ein Anschluss an das vorhandene elektrische Netz notwendig. Daraus ergibt sich auch die Anforderung einer vorzugsweisen ortsnahen Aufstellung und Montage der Solarüberdachung zu Raststationen und Raststätten, Tankstellen, Mautstationen, Autobahnmeistereien oder ähnlichen Objekten.

Wind- und Schneebelastung:

Standardmäßig bauartzugelassene PV Module sind im Regelfall (IEC 61215 [2],[3] und IEC 61730 [4][5]) hinsichtlich Windes auf min. 2400 Pa Zug und Druck sowie Lastwechsel ausgelegt und bezüglich Schnees in Schneelastzone 3 auf min. 5400 Pa statische Belastung. Hinsichtlich der Kompatibilität mit der Gesamtkonstruktion wurde das als ausreichend angenommen.

Brandverhalten:

Als geregelt Baugut zugelassene PV Module erfüllen bauwerkseitige Mindest-Brandanforderungen wie brandhemmende Feuerwiderstandsklassen nach EI 90 (früher F 90) oder Klassifizierung oder Baustoffklassifizierung als Brandschutzklasse B1 als schwer entflammbar (frühere Bezeichnung brandhemmend). Die Gesamtbewertung wurde im Rahmen der Bewertung durch das Brandgutachten für verschiedene Szenarien betrachtet.

Entwässerung und Eisbildung:

Die sich durch die Straßenüberdachung ansammelnden Wassermassen müssen kontrolliert abgeführt werden können und dürfen nicht zur Beschädigung des Bauwerks oder zur Beeinträchtigung des Verkehrs führen. Insbesondere ist eine Eisbildung im Überkopfbereich baulich zu verhindern. Entsprechende Randbedingungen sind an die Tragkonstruktion und Haltevorrichtungen der PV-Module zu stellen.

Eine Schädigung der elektrischen Komponenten kann vorab ausgeschlossen werden, da keine vom normalen Anwendungsfall abweichende Belastung vorliegt.

Steinschlag

Die mögliche Beeinträchtigung der Überdachung durch Steinschlag im Verkehrsbetrieb ist ebenfalls zu betrachten. Hier kann davon ausgegangen werden, dass die bei PV-Modulen bereits implementierten Vorkehrungen gegen beispielsweise Hagelschlag übertragbar sind. Ein Herabfallen von durch Steinschlag beschädigten Elementen ist bei üblichen PV-Modulen nicht zu erwarten: Die als PV-Module eingesetzten Glaslamine weisen auch bei Bruch der Glasscheibe eine Resttragfähigkeit auf, so dass entstehende Splitter festgehalten werden. Durch Verwendung von vorgespannten Gläsern entstehen zudem keine großen Bruchstücke.

Aerodynamische Belastung

Da die Straßenüberdachung über dem durchfließenden Verkehr installiert wird, ist von einer dynamischen aerodynamischen Belastung durch Vorbeifahrt von insbesondere hohen Fahrzeugen, z.B. LKW, auszugehen. Für die sich ergebenden Belastungen bestehen keine detaillierten Erfahrungswerte, so dass dedizierte Untersuchungen angestrengt wurden. Hierbei wurden sowohl typische Belastungsprofile ermittelt, als auch ein Laboraufbau realisiert, mit dem der Einfluss einer entsprechenden dynamischen mechanischen Belastung aufgeprägt werden kann.

Weitere Details werden im nächsten Abschnitt im Zusammenhang mit den anzusetzenden Lasten aus den üblichen Bauvorschriften diskutiert.

Erste Versuche zur Ermüdung durch Dauerschwingbelastung wurden durchgeführt, siehe Kapitel 4.3.2.

2.3 Anforderungen im Bereich Tragkonstruktion

Geometrische Randbedingungen

Die geometrischen Randbedingungen betreffen im Straßenquerschnitt die erforderlichen einzuhaltenden Lichtraumverhältnisse sowie Festlegungen der Überdachungslänge.

LICHTRAUM

Als Referenz für die Straßenbreite zur Festlegung der Breite der Überdachung wird ein häufiger vorkommender Querschnitt einer Straßenkrone für den Überlandbereich herangezogen. Dieser besteht wie in Abbildung 11 dargestellt, pro Fahrtrichtung aus zwei Fahrstreifen, einem Pannestreifen (äußerer befestigter Seitenstreifen), dem inneren befestigten Seitenstreifen und dem Bankett. Zwischen den beiden Fahrbahnen ist ein Mittelstreifen angeordnet.

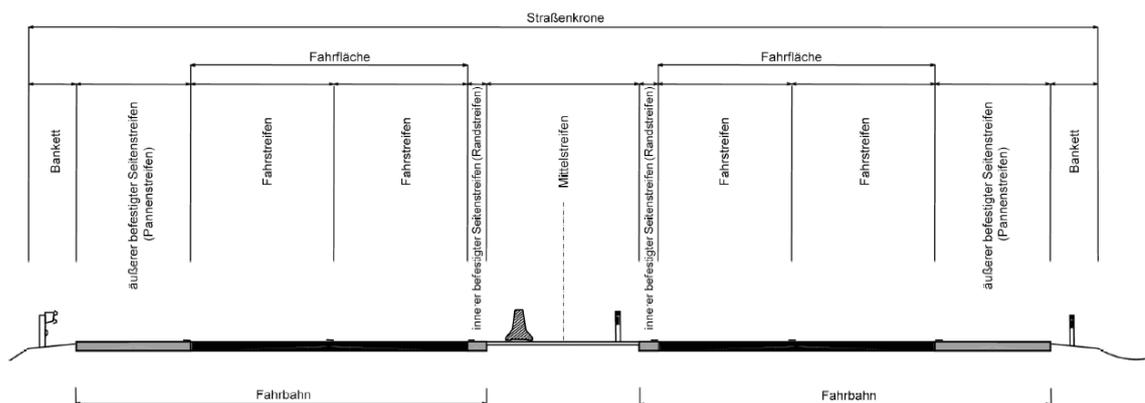


Abbildung 11: Beispiel für die Zusammensetzung von Querschnittselementen, Richtungsfahrbahnen mit Pannestreifen (nach RVS 03.03.31, [6])

Die Daten zur Berechnung der Breite der Straßenkrone sind folgend in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zur Berechnung der Breite der Straßenkrone angesetzte Breiten

Bereich im Querschnitt	Breite	Anmerkung
Breite Fahrstreifen:	3.75 m	auf Autobahnen zwischen 3.5m und 3.75m
Breite Pannestreifen:	3 m	mindestens 2,5 m im Regelfall 3 m (RVS 03.03.31)
innerer befestigter Seitenstreifen	0.5 m	immer bei Hauptverkehrsstraßen (RVS 03.03.31)
seitlicher Lichtraum	0.75 m	
Breite Mittelstreifen	3 m	Empfohlen bei Neubauten (RVS 03.03.31)
Breite Bankett	1.25 m	Regelbreite (RVS 03.03.31) (Regelabstand 0,5 m plus erforderliche Restbreite 0,75 m)

Werden die in Tabelle 1 aufgelisteten Breiten angesetzt, ergibt sich eine Fahrbahnbreite von 12,5 m bzw. für eine Richtungsfahrbahn und eine Breite der gesamten Straßenkrone von 30,5 m. Diese sind jedenfalls zu überspannen, Sicherheitsräume betreffend Anprallschutz sind noch hinzuzuzählen.

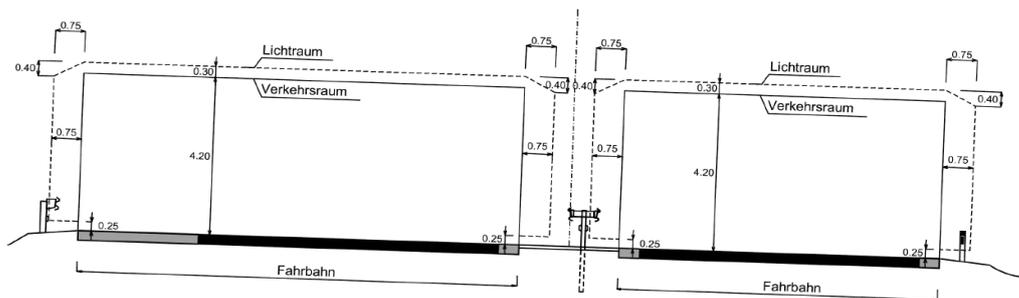


Abbildung 12: Verkehrs- und Lichtraum für den Fahrzeugverkehr (nach RVS 03.03.31)

Zur Festlegung der Bauwerkshöhe wurden ebenfalls die betreffenden Regelwerke herangezogen. Die RVS 03.03.31 definierte eine lichte Höhe von Straßenräumen von mindestens 4,5 m. Diese Regelung ist in Deutschland und Schweiz ähnlich. Um allerdings im Zuge der Berechnung mit Anpralllasten möglichst nicht die maximale horizontale Anpralllast im Überdachungsbereich (Querriegel) ansetzen zu müssen, empfiehlt es sich, dass das Bauwerk höher ist als andere Bauwerke am selben Straßenzug. Dementsprechend sollte die Höhe von Verkehrszeichenbrücken überschritten werden, welche sodann als Begrenzung dienen würden. Diese beträgt in Österreich nach RVS 05.02.11 5,5 m. In Deutschland beträgt die Höhe von Verkehrszeichenbrücken nach ZTV-ING Teil 9 5 m.

ÜBERDACHUNGSLÄNGE:

Ein wesentlicher Punkt der geplanten Autobahnüberdachung ist eine klare Unterscheidung zu einem Tunnelbauwerk. Hauptgründe sind vor allem Sicherheitsaspekte und konstruktiven Forderungen, und die Vermeidung unnötiger Kosten für Errichtung, Wartung, Überwachungseinrichtungen, aber auch erhöhter konstruktiver Anforderungen (z.B. Brandschutz). Auch soll auf eine elektromaschinelle Ausrüstung (Beleuchtung, Belüftung) verzichtet werden können.

Ein erstes klares Unterscheidungsmerkmal zum Tunnel ist die Länge der Überdachung. Die Regelungen haben hier in den 3 D-A-CH Länder unterschiedliche Festlegungen:

Schweiz

Nach Rückfrage und Abstimmung mit den ASTRA-Mitarbeiterinnen gibt es „nach der derzeitigen Gesetzgebung keine gesetzlichen Anforderungen (z.B. VKF) für diese Art von Bauwerken. In diesem Fall ist es der Betreiber/Eigentümer, der Anforderungen festlegen kann.

Wenn das Bauwerk jedoch eine Länge von mehr als 300 m hat, unterliegt sie der Norm SIA 197/2 Projektierung Tunnel – Straßentunnel, die die Brandanforderungen für diesen seltenen Fall festlegt“.

Deutschland und Österreich

Als limitierend wurde hier die Regelung für Tunnel der ASFINAG mit 80,0 m identifiziert, darunter sind grundsätzlich keine zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen wie auch Brandschutzmaßnahmen erforderlich.

Wesentlich für die Längserstreckung sind auch eine geforderte geometrische Flexibilität betreffend des Straßenverlauf sowohl in der Nivellette (Höhenverlauf der Straße) als auch im Straßenzug (Kurven, Übergangsbogen, Gerade).

FESTGELEGTE HAUPTABMESSUNGEN:

Die Vordimensionierung im Zuge des Konzeptes erfolgt mit einer **Systembreite von 17 m** da hier neben den zwei Fahrstreifen und dem Pannestreifen noch ein Verformungsweg der Schutzeinrichtung von ca. 2x2,5m angesetzt wird. Als **lichte Höhe** zur Tragwerksunterkante werden seitens des Konsortiums **5,50 m** vorgeschlagen, um einerseits auch Reserven für mögliche Belagswechseln, Montagemöglichkeiten oder falls allenfalls erforderlich Überwachungseinrichtungen, oder sonstige künftige anzubringende

Sensorik, Kameras oder W-LAN Router oder dergleichen vorzusehen, sowie um hier auch über den bestehenden Schilderbrücken zu liegen, welche dann als Höhenbegrenzung wirken würden. Die **Systemlänge** der PV-Überdachung **beträgt max. 80,0 m**, welche aber nicht in einem Stück, sondern in aufgegliederten, selbsttragenden Tragwerkselementen mit ca. 10 m Einzellänge aneinandergereiht werden. Damit werden keine tunnelspezifischen Bau- und Ausbau-Richtlinien zwingend wirksam, und auch ein Systemversagen kann verhindert werden, da jedes Tragwerkselement für sich tragend ausgebildet wird. Das Bauwerk ist damit auch flexibel an den bestehenden Straßenverlauf anpassbar, es ergeben sich zudem Vorteile in Fertigung, Montage durch einheitliche Systemmaße.

Lastansätze für Standsicherheit:

Im Folgenden werden Grundlagen für eine Dimensionierung für eine Autobahnüberdachung erforderliche Lastansätze diskutiert und für ein Konzept aufbereitet. Die für das Konzept schlussendlich getroffenen Lastannahmen sind im Kapitel 4 festgelegt.

Lastfall Schnee

Die Schneelast ist nach EN 1991-1-3 [7] je nach Standort anzusetzen, beispielhaft ist in Abbildung 13 exemplarisch eine digitale Schneelastkarte für Österreich dargestellt. Die Lasten variieren stark nach Standort und können gerade im alpinen Bereich (dunkle Zonen) mehrere hundert kg/m² einnehmen. Beispielhaft ist ein charakteristischer Wert von $s_k=1,48 \text{ kN/m}^2$ für den Zentralraum des Alpenvorlandes gekennzeichnet.

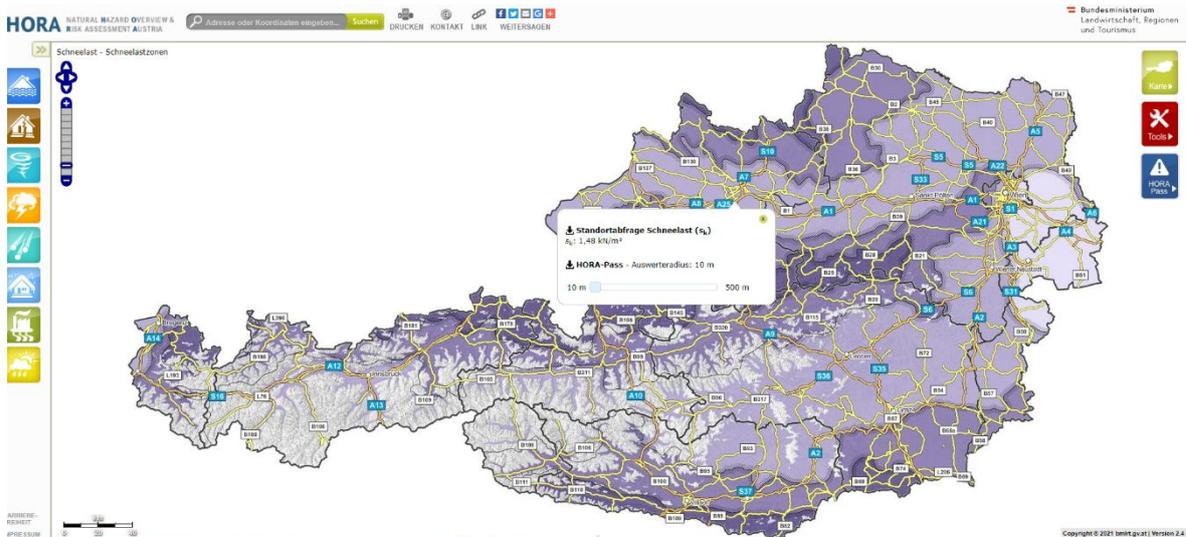


Abbildung 13: Beispiel Auszug für österreichischen Zentralraum- Alpenvorland aus dem Auszug aus der österreichischen Schneelastzonennorm [9].

In den Ländern Deutschland und Schweiz sind die ebenfalls die entsprechenden nationalen Lastansätze zu berücksichtigen. In Deutschland führt das DIBT- die Zonenzuordnung, aus deren dann lokale Schneelasten bestimmt werden zusammen. Beispielsweise ist darin für Standorte der Schneelastzonen 1 und 2 in der Norddeutschen Tiefebene zusätzlich zu prüfen, ob sie sich im Sinne von DIN EN 1991-1-3/NA, Abschnitt 4.3 definierten Regionen befinden. Für Standorte der Norddeutschen Tiefebene ist der Nachweis für den 2,3-fachen Wert der charakteristischen Schneelast als außergewöhnlicher Lastfall nach DIN 1055-100 bzw. DIN EN 1990 in Verbindung mit DIN EN 1990/NA zu führen [11], [12].

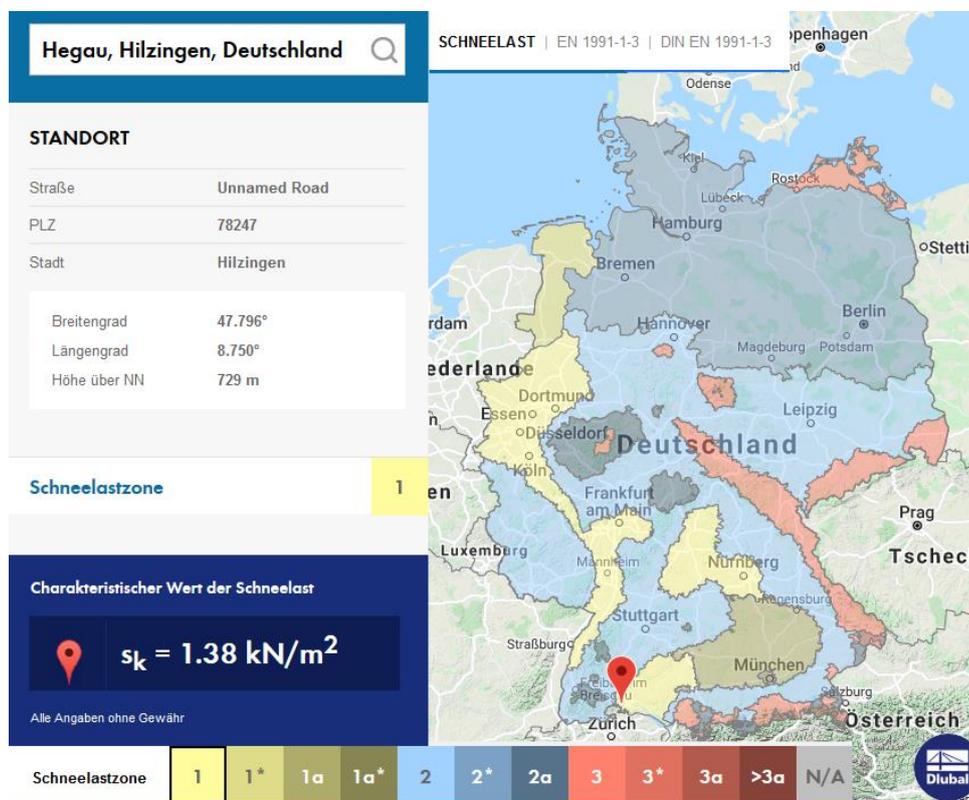


Abbildung 14: Beispielhafte Schneelastkarte nach EN 1991-1-3 für Deutschland [10]. Markiert ist der Standort Hegau.

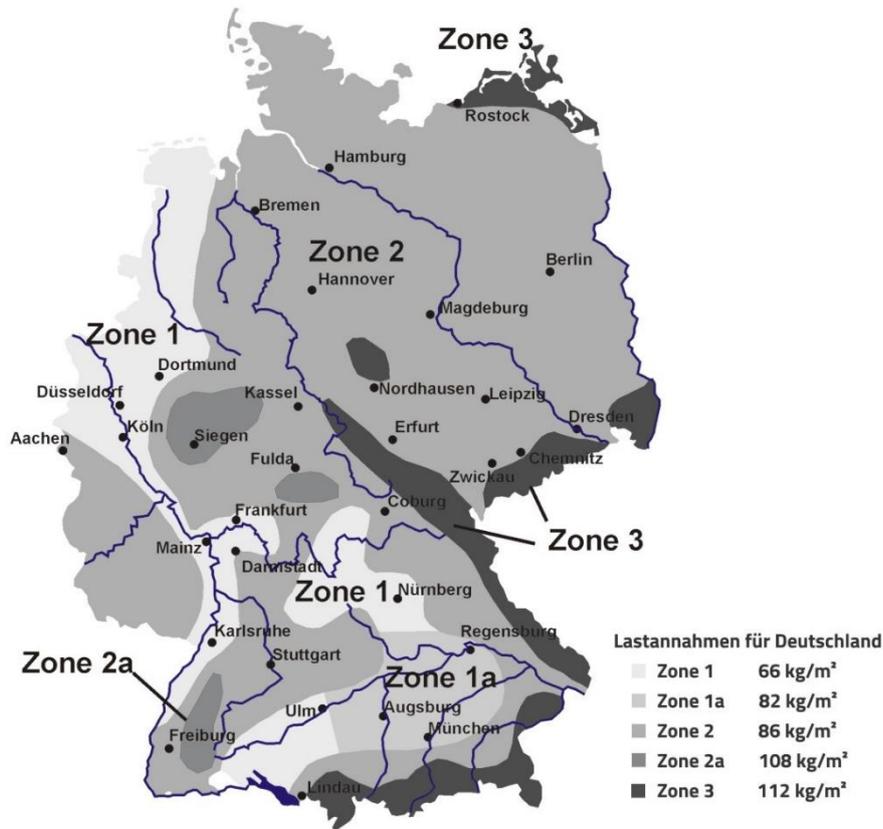


Abbildung 15: Schneelastkarte nach EN 1991-1-3 für Deutschland, mit Angabe der erwarteten Schneelast in den verschiedenen Zonen (Quelle: <https://www.envitron-systems.com/schneelastinformation/>).

Lastfall Wind

Ähnlich wie Schnee ist auch der Wind stark von den lokalen Standortbedingungen (Geländehöhe, Exposition, Bauwerksform...) abhängig. Beispielsweise wird nach EN 1991-1-4 [13] je nach Standort ein Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ definiert, worauf der Basisgeschwindigkeitsdruck q_b aufbaut.



Abbildung 16: Beispiel Auszug für Windlasten für nichtalpinen Bereich in Österreich aus [10].

Für die jeweiligen Dachformen und Gebäudehöhen sind zusätzlich die normgemäßen Beiwerte für Druck- und Sogwerte oder Reibung zu ermitteln und anzusetzen. Windlasten sind ähnlich wie Schneelasten standortspezifisch festzulegen.

Aerodynamische Lasten

Die aerodynamischen Lasteinwirkung entsteht bei LKW-Vorbeifahrten. Die aerodynamische Wirkung ist hier von Geschwindigkeit, Verspermaß aber auch von der Form der Überdachung (seitlich offen/ geschlossen) abhängig. Deren Einwirkung ist grundsätzlich bei Lärmschutzwänden oder Tunneln bekannt und Lastansätze werden in diversen Regelwerken geregelt.

Beispielsweise werden in der österreichischen Richtlinie „Schutzschichten für den erhöhten Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke“ bzw. RVS 09.01.23 [14] für den Innenausbau von Tunnel Druck- / Sogbelastung durch Fahrzeuge folgende Werte angesetzt:

„Die schwellende Druck- bzw. Sogbelastung, verursacht durch Fahrbewegungen im Fahrraum, ist wie folgt anzusetzen:

Druck: 1,5 kN/m²

Sog: 1,0 kN/m²“

Diese Daten beruhen auf Messungen in Tunnel, welche zum einen geschlossen sind, zum anderen auch Fälle mit erhöhten aerodynamischen Lasten wie Begegnungsfahrten abdecken sollen.

In Deutschland werden nach ZTV-ING Teil 5 / 2018/01 [15] für „Tunnel in geschlossener Bauweise mit einem lichten Querschnitt von 50 m² und mehr Innenverkleidungen für die Einwirkungen aus Druck und Sog mit 0,5 kN/m² bemessen. Bei Tunneln mit geringerem Querschnitt erhöht sich der Sog. Bei einem lichten Querschnitt von 43 m² und weniger beträgt er 0,8 kN/m². Zwischenwerte sind linear zu interpolieren“.

Eine weitere Grundlage in dieser Frage bildet auch ein Bemessungsdokument für vertikale Schilderbrücken der Autobahndirektion Südbayern [16] darin werden statische Ersatzlasten festgelegt:

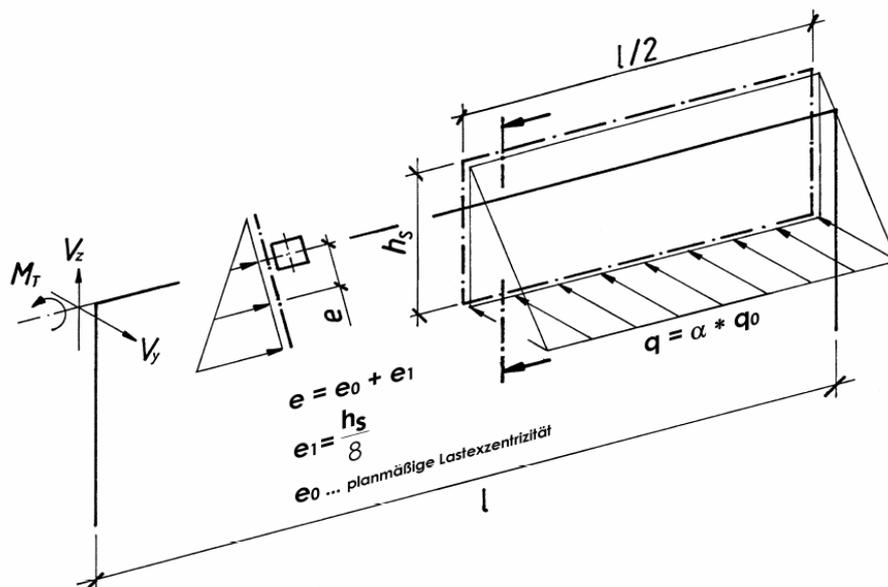


Abbildung 17: Auszug aus [16] Festlegung für statische Ersatzlasten für die aerodynamische Anregung von Schilderbrücken

„Als Einwirkung gelten:

q_0 Basisstaudruck

α Dynamischer Vergrößerungsfaktor

Neben der planmäßigen Exzentrizität e_0 ist, zur Erfassung der nicht gleichmäßig verteilten aerodynamischen Anregung, eine zusätzliche Exzentrizität $e_1 = h_s/8$ (h_s =Schildhöhe) anzunehmen.

Die am unteren Rand der Beschilderung anzunehmende Ordinate des Basisstaudrucks beträgt für eine Geschwindigkeit des LKW- und Busverkehrs von 100 km/h $q_0 = 0,20$ kN/m².

Als Mindesthöhe für die Beschilderung ist $h_{s,min} = 4,0$ m anzunehmen

Der dynamische Vergrößerungsfaktor α ist von der Resonanzfrequenz abhängig und beträgt für Konstruktionen mit einer ersten Eigenfrequenz für Horizontalschwingungen kleiner 2,0 Hz $\alpha=1,0$. Für Konstruktionen mit einer ersten Eigenfrequenz für Horizontalschwingungen größer 3,5 Hz beträgt der Vergrößerungsfaktor $\alpha=2,0$. Für Zwischenwerte der Eigenfrequenz ist linear zu interpolieren.“

Damit wäre für den ungünstigsten Fall einer guten Anregung $q = 0,2 \cdot 2,0 = 0,4 \text{ kN/m}^2$ anzunehmen. Anhaltspunkte für freie Strecken geben auch Richtlinien und Normen für Lärmschutzwänden an Eisenbahnstrecken. Beispielsweise werden für gleisnahe Lärmschutzwände in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeiten und Abstand der Gleisachse zur vertikalen Wand, Ersatzwechsellasten angegeben, welche Fahrzeugvorbeifahrten regeln (siehe Abbildung 18 nach EN 1991-2).

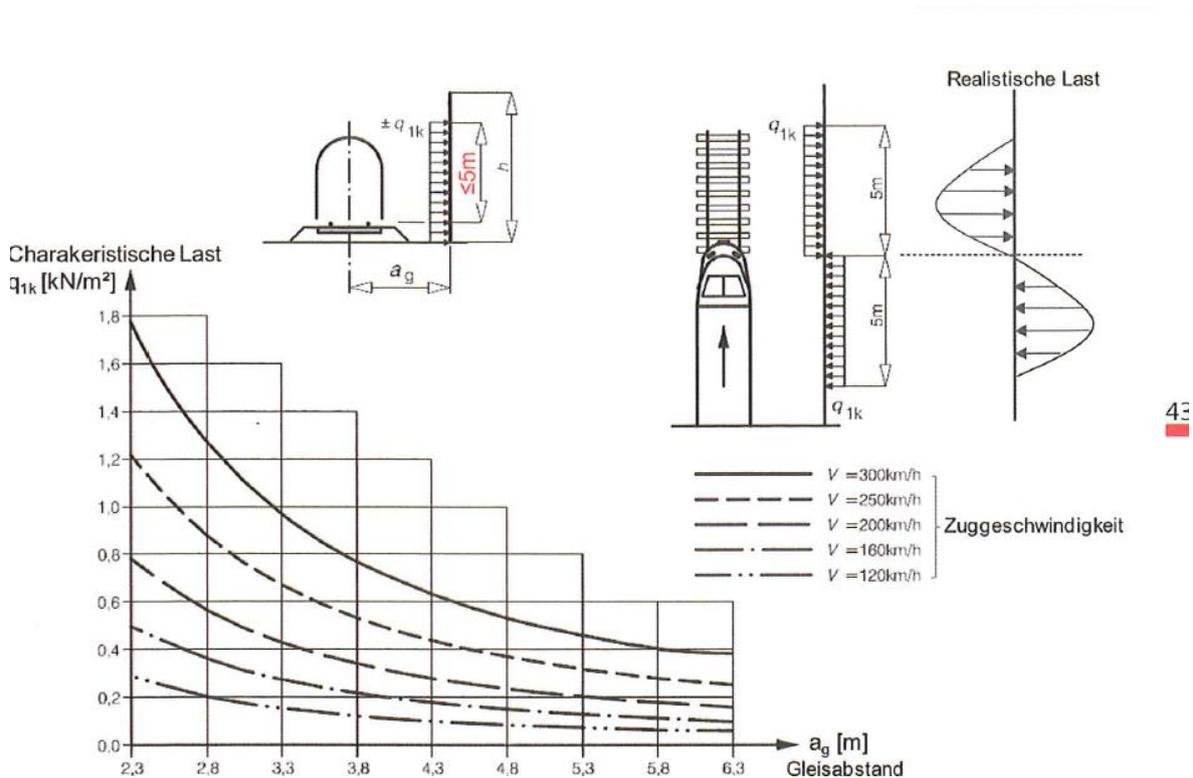


Abbildung 18: Aerodynamische Ersatzlasten für Druck/Sog Lasten entnommen für Zugvorbeifahrten nach EN 1991-2 [17].

Eine dynamische Interaktion (Lastvergrößerung aufgrund Resonanzeffekte) ist hier noch zusätzlich für die Bemessung zu berücksichtigen ein Modell für Lärmschutzwände wurde hier in Forschungsarbeiten unter Mitwirkung von AIT in der Vergangenheit für die österreichische Bundesbahn erstellt [33].

In allen Regelwerken werden statische Ersatzlasten definiert, welche in der Bemessung einbezogen werden. Dezidierte Regelungen für eine seitlich offenen Überdachung liegen nach eingehender Recherche nicht vor.

Entscheidend ist aber gerade hierfür nicht nur die Standsicherheit, sondern auch die Gebrauchstauglichkeit und in weiterer Folge die Funktionalität der PV-Anlage auch nach mehreren Millionen Lastzyklen. Dies gilt vor allem dann, wenn kein Trapezblech als

Unterkonstruktion verwendet werden soll. Gerade die mitunter zu Sprödbbruch neigenden Siliziumzellen bzw. Elektronik der Module könnte unter Dauerschwingeinwirkung frühzeitig versagen oder die Funktionalität einschränken und damit den Wirkungsgrad verlieren.

Es sind alternative Ansätze erforderlich, da die dafür notwendigen Lastansätze für eine solche Anforderung noch nicht hinreichend bekannt sind, und auch unklar ist ob die Funktionalität der Glas/PV/Glas- Module durch Schäden am Glas, Zellen, Zellverbindern oder am Verbund von Glas und Zell-Einbettmaterial (etwa Delamination) bei sehr hohen Lastwechselzahlen beeinträchtigt werden können. Sämtliche vorliegenden Dauerschwingversuche finden bei wesentlich anderen Lastwechselzahlen statt.

Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des Projekts ergänzende Untersuchungen zur Einwirkung und Vorgehensweise zu Ableitungen von Lastansätzen aus realen dynamischen Druckmessungen in einem Bestandstunnel im Netz der ASFINAG aufbereitet. Der untersuchte Bestandstunnel ist geschlossen und liefert höhere Amplituden als seitlich freie Konstruktionen.

Die Verifikation der Gebrauchstauglichkeit der PV-Module vor allem in Hinblick auf Funktionalität soll im Zuge von ausgewählten Dauerschwingversuchen im 1:1 Versuch als ein prinzipieller Funktionalitätstests schon in der Konzeptphase untersucht werden. Hierbei handelt es sich um keinen klassischen Dauerschwingversuch im Sinne einer Zulassung, sondern um prinzipielle Funktionalitätsuntersuchung zur Grundeignung von PV-Modulen für diese Anforderungen. Die Funktionalität von PV-Modulen wurde deshalb bei Lastwechseln von über 10 Mio. unter realitätsnahen Druck/Sogbelastungen untersucht und dann im Kapitel 4 detailliert aufbereitet.

Lastfall Anprall

Betreffend Anpralllasten haben die Länder einen grundsätzlich ähnlichen Zugang und normative Ausgangslage, wobei in der Schweiz sehr viel differenzierter betreffend Abstände und Schutzeinrichtungen unterscheidet. Wie auch schon [22] zusammenfasst gibt es hier in der Höhe der Ersatzlast große Unterschiede, ob diese als Brücke oder Schilderbrücke betrachtet werden, bzw. ob Schutzeinrichtungen vorliegen oder nicht.

DEUTSCHLAND und ÖSTERREICH

Nach EN 1991-1-7 [24] wären grundsätzlich bei Überbauungsbauwerke (z.B. Brücken) an der Tragkonstruktion ohne besondere Vorkehrungen in Deutschland folgende Anpralllasten für vertikale Tragwerksteile als statische Ersatzkräfte anzusetzen (Abbildung 19):

	Kategorie	statisch äquivalente Anprallkraft in MN	
		F_{dx} in Fahrtrichtung	F_{dy} rechtwinklig zur Fahrtrichtung
1	Straßen außerorts	1,5	0,75
2	Straßen innerorts bei $v > 50 \text{ km/h}^a$	1	0,5
	Straßen innerorts bei $v < 50 \text{ km/h}^b$		
3	– an ausspringenden Gebäudeecken	0,5 ^c	0,5
4	– in allen anderen Fällen	0,25 ^c	0,25 ^c

^a nur anzusetzen, wenn stützende Bauteile der unmittelbaren Gefahr des Anpralls von Straßenfahrzeugen ausgesetzt sind, d. h. im Allgemeinen im Abstand von weniger als 1 m von der Bordschwelle.

^b nur anzusetzen, wenn bei Ausfall der stützenden Bauteile die Standsicherheit von Gebäude/Überdachung/Decke gefährdet ist.

^c für Straßen- und Geh-/Radwegbrücken gelten mindestens die Werte $F_{dx} = 1,0 \text{ MN}$ und $F_{dy} = 0,5 \text{ MN}$.

Abbildung 19: Auszug aus DIN EN 1991-7 [26] für äquivalente Stoßkräfte für ungeschützte Bauwerke (z.B. Brückenpfeiler) in der Nähe von Straßen entnommen aus [19]

Für Überbauten sprich die horizontal über die Straße überspannende Tragwerksteile gelten demnach die Angaben in Abbildung 20.

Kategorie	Äquivalente statische Ersatzkraft F_{dx}^a kN
Autobahnen und Bundesstraßen	500
Landstraßen außerhalb von Ortschaften	375
Innerstädtische Straßen	250
Privatstraßen und Parkgaragen	75
^a $x =$ in Fahrtrichtung	

Abbildung 20 Auszug aus DIN EN 1991-7 [26] für Äquivalente Stoßkräfte für ungeschützte Bauwerke (z.B. Brückenpfeiler) in der Nähe von Straßen, entnommen aus [19]

Der nationale Anhang in Österreich für Brückenlasten, ÖNORM B 1991-2: 2018-08 [18] definiert im Punkt 8.7.2 „dass im Regelfall Brücken für die äquivalenten statischen Anprallkräfte auf Überbauten gemäß ÖNORM der EN 1991-1-7:2014 [24] und ÖNORM B 1991-1-7:2007 [25] (ähnlich wie in Deutschland [26]) zu bemessen sind“. Im Abschnitt 8.7.8 die nationale Festlegung zu ÖNORM EN 1991-2:2012, Abschnitt 4.7.3.4(1) wird angeführt: „Kräfte, die durch Anprall an ungeschützte, tragende Bauteile, die über oder neben der Fahrbahnebene liegen, entstehen, sind an ungünstigster Stelle jedoch maximal in einer Höhe von 1,25 m über der angrenzenden Fläche mit 1000 kN in Fahrtrichtung bzw. 500 kN

quer zur Fahrtrichtung anzunehmen. Die Kräfte sind als nicht gleichzeitig wirkend anzusetzen.“

In einer früheren Fassung, und nicht mehr gültigen Norm: DIN EN 1991-2 vom Mai 2004 war zusätzlich betreffend Fußgängerbrücken folgenden Anmerkung zu finden:

„Fußgängerbrücken sind grundsätzlich wesentlich empfindlicher gegen Anpralllasten als Straßenbrücken, Es ist unrealistisch, sie für dieselben Anpralllasten zu berechnen. Der wirksamste Weg, Anpralllasten zu berücksichtigen, besteht im allgemeinen darin Fußgängerbrücken gegen Anprall zu sichern durch:

Anordnung von Schutzeinrichtungen in angemessenem Abstand vor den Stützen,

Vorsehen größerer Durchfahrtshöhen als bei den benachbarten Straßen- oder Eisenbahnbrücken im gleichen Straßenzug, falls dazwischen keine Zufahrt besteht.“

Nach dieser Regel würden bereits bestehende Bauwerke limitierend wirken, wenn diese niedriger sind als die neu geplante Überdachung und der horizontale Anpralllastfall an der Dachfläche könnte damit entfallen. All diese Regelungen gelten für feste Konstruktionen und vor Anprall ungeschützte Bauwerke.

SCHWEIZ

In der Schweiz sind anzusetzenden statischen Ersatzkräfte für den Anprall, die im Rahmen einer Grundlagenermittlung festgelegt wurden, in der Norm SIA 261/2014 D - Einwirkungen auf Tragwerke – angegeben [20]. Die Ausgangswerte sind in Bezug auf Autobahnen geringer als in Deutschland und in etwa gleich wie in Österreich.

	Frontaler Anprall an Stützen $Q_{0,\alpha}$ [kN]	Seitlicher Anprall an Wände und Leitmauern $Q_{0,\gamma}$ [kN]
Autobahnen/Autostrassen	1'500 ¹⁾	600 ¹⁾
Strassen mit $v = 80$ km/h	1'000	400
¹⁾ Ausgangswerte Q_0 entsprechen den Bemessungswerten Q_d gemäss Norm SIA 261 [24]		

Abbildung 21 Auszug SIA 261 betreffend für äquivalente Stoßkräfte für Anprall [20]. Ausgangswerte für Bemessung von Anpralllasten an Brückenpfeilern bei Autobahnen und Autostraßen sowie Außerortsstraßen mit $v=80$ km/h.

Wie in [19] zusammengestellt ermöglicht eine Ergänzung zur SIA 261 – Anprall von Straßenfahrzeugen auf Bauwerksteile von Kunstbauten (2005) – eine weitaus differenziertere Bestimmung der statischen Ersatzkraft für den Anprall unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren wie z.B. Abstand des Tragwerks von der Straße,

Verkehrsaufkommen oder bestehende Schutzeinrichtungen. Die Ergänzung ist grundsätzlich für Neubauten gültig. Zusätzlich sind Kriterien zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke in Bezug auf die durch den Anprall von Schwerlastverkehr hervorgerufenen Einwirkungen angegeben.

ANPRALL SCHILDERBRÜCKEN

Einen guten Anhaltspunkt betreffend Anpralllasten für derartige Konstruktionen geben Schilderbrücken und Überkopfwegweiser. Diese sind vom Tragwerkstyp und Ausbildung einer PV-Überdachung aus Stahl sehr ähnlich.

In Deutschland regelt dazu die ZTV-ING-Teil 9/2012 [21] in der derzeit gültigen Fassung: „Zur Bemessung des Stiels ist immer eine Ersatzlast von 100 kN in einer Höhe von 1,25 m über OK Straße in Rahmenebene oder rechtwinklig dazu in jeweils ungünstigster Richtung zu berücksichtigen.“ Ein Anprall auf den Riegel ist hier nicht vorgesehen.

Ein kürzlich abgeschlossenes und von der BASt finanziertes Forschungsprojekt [22] hat nochmals detaillierter die Problematik und auch Auftretenswahrscheinlichkeit und Tiefenanalyse von Schadensereignisse bearbeitet. So wurden Daten von Anprallereignissen aus Baden-Württemberg und aus Bayern beschafft, welche zusammen mit 1870 km (Stand 2016) ca. 14% des deutschen Autobahnnetzes ausmachen und in etwa der Größe des Autobahnnetzes in Österreich entspricht.

Text entnommen aus [22]:

„Folgende Auftretenswahrscheinlichkeiten wurden berechnet:

Freie Strecke: $P(\text{Anprall} / \text{km}) = 8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

Autobahnknotenpunkte im Bereich von Zentren wie München oder Nürnberg:

$P(\text{Anprall} / \text{km}) = 1,7 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$

$P(\text{Anprall} / \text{km ohne Baustellenverkehr}) = 1,12 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$

$P(\text{Anprall mit Todesfolge} / \text{km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

$P(\text{Anprall mit Verlust Tragfähigkeit VZB} / \text{km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

Es zeigt sich, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. das Risiko für einen Fahrzeuganprall an eine Verkehrszeichenbrücke mit Todesfolge im Bereich der Zielzuverlässigkeiten und Versagenswahrscheinlichkeiten für Baukonstruktionen gemäß Eurocode 0 entsprechen.

.....Gemäß den bisherigen Regelungen in den ZTV-ING sind bei der Bemessung keine Anpralllasten auf den Riegel von Verkehrszeichenbrücken zu berücksichtigen. Die

Auswertung der Schadensfälle hat gezeigt, dass solche Anprallereignisse überwiegend bei Baustellenverkehr auftreten. Im normalen Straßenverkehr sind solche Ereignisse nur sehr selten aufgetreten, die dann auch meist zu einer Deformation des Verkehrsschildes geführt haben. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass Verkehrszeichenbrücken eine größere lichte Höhe wie Brückenüberbauten über Straßen aufweisen, so dass solche Ereignisse nur sehr selten auftreten und zu hohe Fahrzeuge in den meisten Fällen bei der Durchfahrt unter einer Brücke bereits Schäden erleiden. Aus diesem Grunde wird vorgeschlagen, diese Regelung beizubehalten und keine Anpralllasten an den Riegel von Verkehrszeichenbrücken zu berücksichtigen.“

Ergänzend wurden in [22] durch vertiefte FEM-Anprallanalysen wirkungsvolle Maßnahmen zur Erhöhung der Quertragfähigkeit durch konstruktive Zusatzsteifen vorgeschlagen, welche im Abstand von 20 bis 80 cm über den Fußpunkt angeordnet werden sollten. Entsprechende Überarbeitungstextvorschläge für die ZTV-ING wurden ebenfalls in [22] vorgeschlagen.

In Österreich gilt für Schilderbrücken die RVS 05.02.11 [23]. Dort ist der Anprall wie folgt geregelt:

„Die Absicherung mit FRS (Fahrzeugrückhaltesystemen) ist gemäß RVS 05.02.31 vorzunehmen. Zur Bemessung des Stiels ist immer eine Ersatzlast von 100 kN in einer Höhe von 1,25 m über Fahrbahnoberkante in Rahmenebene oder rechtwinklig dazu in jeweils ungünstigster Richtung anzusetzen. Beträgt der Abstand von Vorderkante der FRS bis zur Vorderkante des Stiels >1,7 m (FRS mit max. Wirkungsbereich W5), braucht kein Betonsockel angeordnet werden. Wo aufgrund der örtlichen Verhältnisse der Wirkungsbereich von W5 nicht freigehalten werden kann, ist ein Betonsockel nachfolgenden Kriterien anzuordnen:

- Abstand von der Vorderkante des FRS bis zur Vorderkante des Betonsockels mindestens 1,0 m*
- Höhe mindestens 1,20 m über Fahrbahnoberkante*
- Breite mindestens 0,8 m und Länge mindestens 1,0 m*
- Überstand über die Fußplatte der Stiele nach allen Seiten mindestens 15 cm*
- Die Stirnseiten der Betonsockel sind halbkreisförmig auszurunden*

Gesondert zu betrachten sind Tragkonstruktionen, die auf einem verschieblichen FRS aus Beton im Mittelstreifen verankert sind.“

Für eine Autobahnüberdachung mit PV-Modulen wird seitens des Konsortiums vorgeschlagen, die Anpralllasten analog zu den Schilderbrücken nach der derzeit gültigen ZTV-ING und RVS 05.02.11 für die vertikalen Bauteile anzusetzen. Betreffend des horizontalen Anprall am Riegel werden jetzt im Konzept keine Lasten angesetzt, zum einen begründet durch die Studien in Deutschland [22], zum anderen wird eine lichte Höhe von 5,50 m konzipiert, welche in der Regel höher oder gleich hoch wie davorliegende Schilderbrücken oder eventuell Bestandsbrückenunterkanten sind. Etwaige Aufstellungen von eigenen Höhenkontrollen vor längeren Modulabschnitten sind ebenfalls eine gute zusätzliche Sicherheitseinrichtung, um hier Anpralllasten am Riegel vorzubeugen. Deren Bedarf und Aufstellung ist im Einzelfall zu prüfen.

Lastfall Brand

Der Lastfall Brand ist gerade in Bezug auf eine Fahrbahnüberdachung in Ständerkonstruktion mit Eindeckung aus PV-Modulen für die gewählte Materialkombination Stahl/ Glasmodule ein wichtiger Aspekt, denn unter diesen Solarstraßen bewegt sich der reguläre Verkehr, unabhängig von der geplanten Einhausung.

Aus diesem Grund wurde das Thema Brand in Form einer Konzeptstudie explizit vom beauftragten Drittleister und Tunnelbrandexperten Balda Engineering & Consulting eingehend untersucht, wozu der Bericht im Anhang beigelegt ist. Folgend werden die wichtigsten Aspekte betreffend Normenregelung und Anforderungen zusammengefasst sowie mit einer statistischen Auswertung von Brandwahrscheinlichkeiten auf Basis von übermittelten Daten betreffend Brandereignisse der ASFINAG ergänzt. Eine Untersuchung betreffend die möglichen Auswirkungen auf die vorgeschlagene Konstruktion ist dann im Kapitel 4 in der Konzeptbeschreibung der Tragkonstruktion zu finden.

PROBLEMSTELLUNG

In Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen ist es statistisch erwartbar, dass auch im Bereich dieser Überdachung ein Brandereignis eintritt und die Brandquelle unter der Konstruktion zum Stehen kommt. Dies kann durch einen Unfall, häufiger jedoch ohne Beteiligung weiterer Fahrzeuge geschehen.

Die so entstehenden Brandlasten bilden eine hohe Bandbreite ab. Von kleinen Brandlasten wie Zweirädern oder PKW mit Motorbränden bis hin zu Bränden von Gefahrguttransporten als außergewöhnliche Ereignisse.

BRANDLAST FÜR DIE TRAGKONSTRUKTION

Die Brandlast ist durch den Brand freigesetzte Energie in Form von Wärme. In der Bauphysik wird dies zumeist durch den spezifischen Heizwert bezogen auf die Gebäudefläche ermittelt oder erfolgt mit Hilfe von Temperatur-Zeit-Kurven. Auf Verkehrsanlagen ist dies nicht einfach möglich, da es sich bei einem Brandereignis um eine unbekannte Brandquelle sowie um ein lokales Ereignis handelt. Deshalb wird ausschließlich die maximale Brandlast herangezogen.

Aufgrund der Tatsache, dass für Freilandstrecken so gut wie keine konstruktiven Anforderungen aufgrund von Fahrzeugbränden bestehen, liegen diesbezüglich keine relevanten Angaben vor. Für Straßentunnel hingegen gibt es durchwegs gute Richtlinien basierend auf detaillierten Forschungsergebnissen, welche als Konsequenz aus großen Tunnelbränden wie Tauerntunnel (1999) und Mont-Blanc-Tunnel (1999) entstanden sind. Daher wird in weiterer Folge auf Normen und Richtlinien für Straßentunnel Bezug genommen, da die Verkehrsstärke und auch die Zusammensetzung jener des Freilands entspricht. Tunnelspezifische Einflussfaktoren (wie z. B. Sauerstoffmangel) finden sich in der vorgegebenen Brandlast nicht wieder, diese werden üblicherweise erst in der späteren Modellierung berücksichtigt.

Um eine Kategorisierung der Brandlast zu erlangen kann die Einteilung gemäß World Road Association (PIARC) herangezogen werden.

Vehicle Type	Peak HRR (MW)
Passenger car	5 – 10
Light duty vehicle	15
Coach, bus	20
Lorry, heavy-goods vehicle up to 25 tonnes*	30 – 50
Heavy-goods vehicles typically 25-50 tonnes*	70 – 150
Petrol tanker	200 – 300

Abbildung 22: Brandlast in Abhängigkeit der Fahrzeugkategorie nach PIARC [27].

Die in der Abbildung 22 angeführte Brandlast entspricht der maximalen Freisetzungsrate. Diese ist für den Bemessungsfall in weiten Teilen ausreichend.

Im realen Brandfall muss üblicherweise die Entwicklung des Brandes in unterschiedlichen zeitabhängigen Bereichen eingeteilt werden. Auf die Initialphase folgt ein Anstieg der

Brandlast über eine Rampe bis hin zur maximalen Brandlast. Nach dem voll entwickelten Brand folgt eine kontinuierliche Reduktion der Brandlast bis zum Brandende. Der idealisierte Verlauf eines Brandes kann der Abbildung 23 entnommen werden.

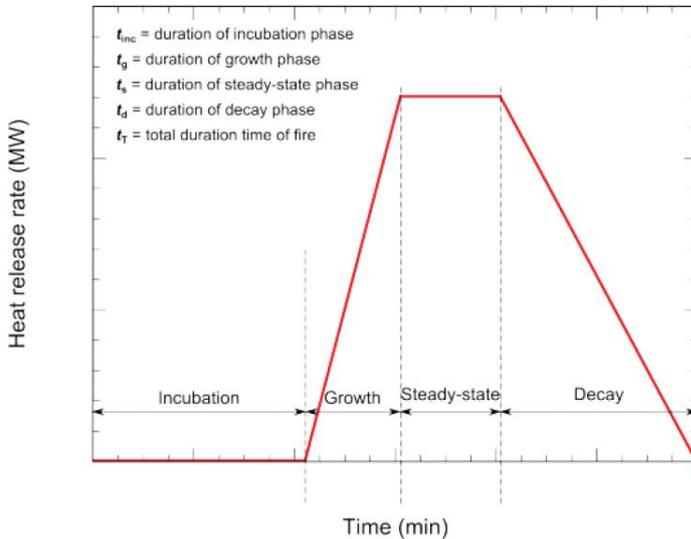


Abbildung 23: Idealisierte Wärmefreisetzungskurve nach PIARC [27].

NORMATIVE VORGABEN D-A-CH

Im Europa, insbesondere im D-A-CH-Bereich sind die Vorgaben zu maximalen Brandlasten eindeutig in den betreffenden Normen und Richtlinien zur Bemessung von Tunnelbränden definiert. Zudem geben die Richtlinien Vorgaben zu Quellraten des Rauchgases. Die Übersicht kann der Tabelle 2 entnommen werden. Die detaillierte Beschreibung ist im Anhang zu finden.

Tabelle 2: Übersicht Bemessungsbrandlasten für Tunnelanlagen D-A-CH

Richtlinie	Brandlast	Entscheidungskriterium	Quellraten Rauchgas definiert
RVS Österreich	5 / 30 / 50 MW	Verkehrszusammensetzung	Ja
RABT / EABT Deutschland	30 / 50 / (100 MW)	Km-Fahrleistung Schwerverkehr	Ja
ASTRA Schweiz	30 MW	-	Ja

Die idealisierte Wärmefreisetzungskurve ist ausschließlich in der RVS für Tunnel [28] definiert, wo diese als Basis für 3D-Simulationen in Verbindung mit einem Evakuierungsmodell angewandt wird.

Bei der Auswahl der anzuwendenden Brandlast ist das akzeptierte Risiko zu beachten. Die RVS 09.01.45 gibt für Tragwerke vor, dass ungünstige Brandfälle erfasst werden müssen,

aber nicht alle möglichen Brandfälle abgedeckt werden müssen. Die in der RVS 09.01.45 vorgegebenen Temperatur-Zeitkurven (TZ-Kurven) basieren durchwegs auf tunnelspezifischen Randbedingungen. Die Anwendung dieser TZ-Kurven (HC oder HC_{incr}) (Abbildung 24) auf die vorliegende Konstruktion würde zu einer Überbemessung der Konstruktion führen, jedoch alle normativen Brandfälle abdecken.

Aufbauend darauf wurde mittels analytischer Ansätze eine erste Abschätzung durchgeführt. Diese sind detailliert im Anhang ersichtlich. Weiters wurden detailliertere CFD-Analysen für eine erste Abschätzung der Bauteiltemperaturen erstellt- diese sind im Kapitel 4 unter Sonderlastfälle detailliert beschrieben.

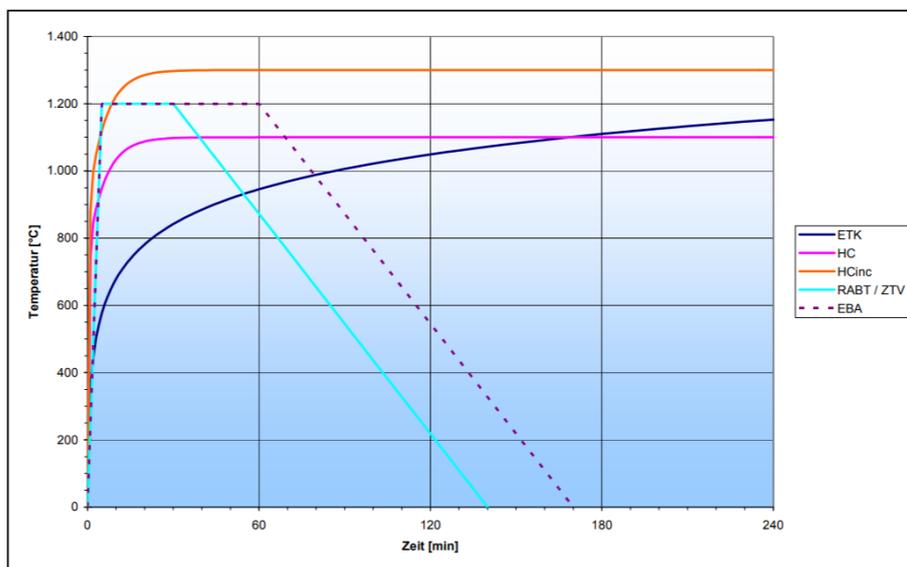


Abbildung 24: Brandkurven in direkter Gegenüberstellung nach [29]

Generell sind diese Brandlasten für Tunnel ab einer gewissen Tunnellänge zwingend vorgeschrieben. Das dafür definierte Schutzniveau und damit Brandbemessungsanforderungen ist beispielsweise nach RVS 09.01.45 für unterschiedlich Tunnel definiert. Das Schutzziel zielt dort in der Regel auf den Schutz von Dritten ab. In der RVS 09.01.45 ist weiters zu dessen Anwendungsbereich vermerkt „Bei Tunnel bis 200 m Länge und für Galerien unabhängig von der Länge sind gesonderte Festlegungen in Abstimmung mit dem Auftraggeber zu treffen“

EXKURS Schweiz

Nach Rückfrage und Abstimmung mit den ASTRA-Mitarbeitern gibt es nach der derzeitigen Gesetzgebung keine gesetzlichen Anforderungen für diese Art von Bauwerken. In diesem Fall ist es der Betreiber/Eigentümer, der Anforderungen festlegen kann.

„Wenn das Bauwerk jedoch eine Breite von mehr als 300 m hat, unterliegt sie der Norm SIA 197/2 Projektierung Tunnel – Straßentunnel, die die Brandanforderungen für diesen seltenen Fall für eine Grünbrücke festlegt.“

4.1.5 Überwachung und Branddetektion

Gemäss SIA 197/2 sind bei Tunneln mit einer Länge unter 300 m keine Überwachungs- und Leiteinrichtungen sowie keine Erfassungs- und Kommunikationsanlagen erforderlich.

Eine Branddetektionsanlage gemäss ASTRA Richtlinie 13 004 ist auch nicht erforderlich.

4.1.6 Löschwasser

Gemäss SIA 197/2 sind bei Tunneln mit einer Länge unter 300 m keine Löscheinrichtungen erforderlich.

Demzufolge und nach Rücksprache mit den Auftraggeber Vertreter*innen und Experten*innen der 3 Länder gibt es für die geplanten Systemlängen von bis zu 80 m keine Vorschriften in Regelwerken betreffend einer Brandschutzbemessung, oder Sicherheitsvorkehrungen.

Grundfragen einer Überdachung betreffend Brandszenario sind:

- Wie wahrscheinlich ist ein Brandszenario bzw. ist Brand aufgrund der Auftretenswahrscheinlichkeit ein akzeptiertes Risiko?
- Falls ein Brand eintritt, wie ist der Verlauf und wie werden die Tragsicherheit des Bauwerks bzw. PV-Module bei einem Brand unterhalb beeinflusst?
- Kann der Rauch und die Gase auch bei seitlicher Lärmschutzwandbegrenzung ausreichend entweichen?

Die Brandschutzanforderungen sind demnach in Abstimmung konkret festzulegen. Als Entscheidungsgrundlage wurden deshalb vom Konsortium im Kapitel 4 folgende Aspekte aufbereitet:

- Statistische Auswertung von Brandauftrittswahrscheinlichkeiten
- CFD-Simulationen von 2 Brandlastfällen je eines 5 und 30 MW Brandereignisses, deren Ansätze und Ergebnisse detailliert im Kapitel 4 angeführt sind.
- Technische und wirtschaftliche Auswirkung für einen konstruktiven Brandschutz

Generelle Bemessungsansätze für die Tragkonstruktion:

BS1 Nachweis der Standsicherheit- Grenzzugstand der Tragfähigkeit GZT:

Aufgrund der Harmonisierung der europäischen Normen werden vom Konsortium für die Vordimensionierung des PV-SÜD - Konzeptes die Grundausslegung Standsicherheit nach EN 1990 herangezogen und die Bauteile für die jeweilige zugehörige Eurocode Bemessungsnorm herangezogen. Details zur Bemessung für den möglichen Demonstrator Standort sind im Kapitel 4 ersichtlich.

Unterschieden wird dabei nach EN 1990 in ständige und vorübergehende Bemessungssituation (*Grundkombination ULS*) und Außergewöhnliche Bemessungssituation unter einer Leiteinwirkung (z.B. Anprall).

BS2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit Nachweis der Verformungsbegrenzung:

Grundsätzlich sind Anforderungen an die Verformungsbegrenzung im Sinne der Gebrauchstauglichkeit mit den Auftraggebern bzw. Regelwerken abzustimmen. Ein für Stahlbau üblicher Wert sind eine Durchbiegungsbegrenzung unter Gebrauchslast von $L/300$ (L bezogene Spannweiten). Für Schilderbrücken definiert hier beispielsweise die RVS 05.02.11 folgende Begrenzungen:

Stiele am Kopf (in Quer und Längsrichtung) $h_s/150$

Riegel vertikal $L_R/200$

Riegel horizontal $L_R/200$ (ohne Berücksichtigung der gleichzeitigen Stielverformung)

Kragarm vertikal $L_K/200$

Kragarm am Ende horizontal $L/100$, wobei $L = h_s + L_R$ (mit Berücksichtigung der gleichzeitigen Stielverformung aus Torsion)

Mit: L_R Riegellänge, L_K Kragarmlänge, h_s Stiellänge

Als wesentlicher Bemessungsnachweis gilt hier aber der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit/Begrenzung der Verformung der Tragkonstruktion, um Glasbruch zu vermeiden. Seitens des Konsortiums wird das Regelwerk Bundesverband- Flachglas [30] als Anhaltspunkt verwendet. Dieses definierte als Verformungsbegrenzung für umfassend gelagerte Gläser (ähnlich Glas/Glas Module) die Länge der gelagerten Glaskante L (siehe

Abbildung 25) in Bezug auf die zulässige Verformung nach DIN 18008 Tabelle 3 zu begrenzen.

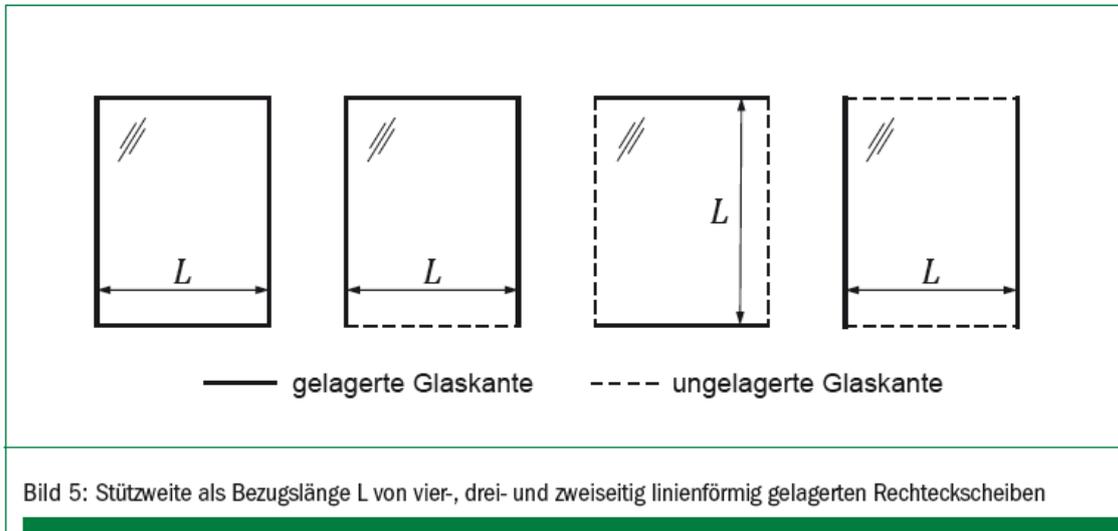


Abbildung 25. Definition der Bezugslänge nach [30].

Die Länge der Glaskante und Lagerung richtet sich nach den tatsächlich zu verwendet PV-modulen, Lagerungsmöglichkeiten und Unterkonstruktion.

Tabelle 3: Verformungsbegrenzung nach DIN 18008 entnommen aus [30].

Linienförmige Lagerung	Gelagerte Glaskante (vergleiche Abs. 5.3.1)	In Glasmitte	Ungelagerte Glaskante	
			Einfachglas	Isolierglas
Zwei- und dreiseitig*	L/200	L/100**	L/100**	L/200***
Vierseitig			–	–

* Bei dreiseitig linienförmiger Lagerung ist zu berücksichtigen, dass in Abhängigkeit vom Kantenverhältnis die maximale Durchbiegung entweder in Glasmitte oder an der ungelagerten Glaskante vorliegt

** Sofern keine optisch-ästhetischen oder andere Vorgaben dagegen sprechen, ist bei Glasgrößen
– bis max. 2 m² auch L/65 zulässig
– bei vertikalem Glas ggf. eine noch größere Durchbiegung zulässig, sofern der verbleibende Glaseinstand an allen Glaskanten mindestens 5 mm beträgt, auch wenn die gesamte Sehnenverkürzung auf nur ein Auflager angesetzt wird¹⁹

*** Empfehlung der Isolierglashersteller²⁰

Tabelle 1: Durchbiegungsgrenzwert w_{zul} bezogen auf die Bezugslänge

Es wird in der Konzeptphase generell von einer **Durchbiegungsbegrenzung von L/200** der Tragkonstruktion unabhängig von der Länge der Glaskante (welche im Vergleich zu den tragenden Bauteilen deutlich kürzer ist) ausgegangen. Damit wäre auch die Durchbiegungsbegrenzung der Schilderbrücken beinhaltet. Der Ansatz wird im Zuge der Detailplanung nochmals detaillierter untersucht, und das Optimierungspotenzial noch weiter erhoben. Auch eine mögliche dynamische Anregung und Lasterhöhung bei LKW-Vorbeifahrten (Auslegung der Steifigkeit) muss dann weiter im Detail analysiert werden.

Grenzzustand der Dauerhaftigkeit- Ermüdung:

Der Grenzzustand der Dauerhaftigkeit trifft hier in erster Linie den Lastfall Ermüdung. Die Stahlkonstruktion wird ebenfalls dafür nach EN 1993 auszulegen sein. Relevant sind die zu erwartenden einwirkenden Verkehrslasten und Betriebslastkollektive. Ansätze dafür wurden abgeleitet und sind im Kapitel Aerodynamik bzw. auch durch reale Messungen von möglichen Betriebslasten später im Kapitel 4.3.2.1 dargestellt.

2.4 Bestimmung der Bauwerksform in Längs und Querrichtung

Gesetzte Entwicklungsziele

Für die Planung und Errichtung wurden die grundlegenden Anforderungen wie oben beschrieben benutzt, um hinsichtlich der detaillierten Bauplanung und Dimensionierung technische Planungsdetails abzuleiten. Die spezifischen Anforderungen, die in die Bauwerksform wesentlich eingehen, sind:

- Erhebung der Anforderungen und technischen Randbedingungen für PV-Module, Tragkonstruktion und Messtechnik
- Entwicklung eines modularen Standardabschnittes
- In Längsrichtung modular verlängerbar
- Erfahrungen aus vergleichbaren Konstruktionen nutzen
- Stahlkonstruktion
- Grundprinzip: Keine vollständige Einhausung (kein Tunnel!)
- Mögliche Kompatibilität mit späterer Lärmschutzeinrichtung
- Optimierung der Formgebung im Hinblick auf die erwünschten Effekte

- Optimierung des Ertrages hinsichtlich Robustheit gegenüber Standort und Orientierung
- Kompatibilität mit notwendigen Einrichtungen für Sicherheit

Bewertung unterschiedlicher Geometrieformen

In einem Designprozess wurden mögliche Formen mit üblichen und bereits oft erfolgreich umgesetzten technischen Bauformen beurteilt. Es wurde insbesondere darauf geachtet, welche Bauformen möglichst vielen der gesetzten technischen Anforderungen genügen. In der folgenden Abbildung sind 4 Varianten für mögliche Bauformen gezeigt. Alle wurden bewertet und auch hinsichtlich ihrer Flexibilität für verschiedene Fahrbahnbreiten und PV-Modul-Montagearten bewertet. Die Bewertung wurde für die notwendigen Aspekte quantitativ durch die Partner vorgenommen, siehe folgende Tabellen.

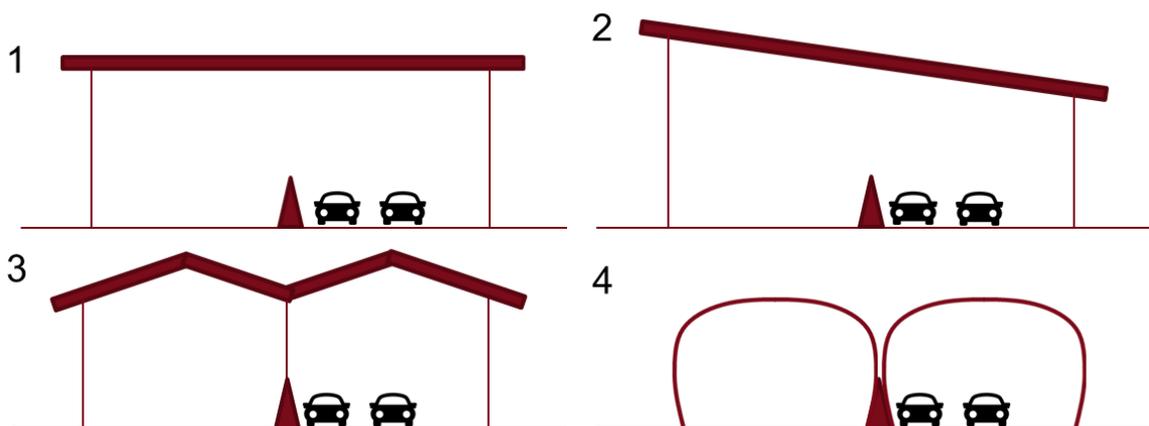


Abbildung 26: Die vier in der Diskussion zur Gestaltung der Überdachung in Querrichtung angedachten Varianten: ein völlig ebenes Flachdach (1), ein in unbestimmtem Winkel geneigtes Pultdach (2), ein in unbestimmtem Winkel geneigtes Satteldach (3) und eine Überdachung mit bogenförmigem Querschnitt (4)

Tabelle 4: Bewertungstabelle der Dachform im Querschnitt. Die Bewertung erfolgte mit Berechnung eines gewichteten Mittels unter Vergabe von Punkten von 1 bis 10 (1 sehr negativ, 10 sehr positiv).

Nr.	Art		Gewicht	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4
1	Konstruktion	Verformungs- und Schwingungsanfälligkeit	1	8	8	8	8
2		Erscheinungsbild	1	5	5	5	10
3		Robustheit	1	8	8	9	8
4		Baukosten	3	8	8	8	10
5		Verbindung mit Seitenelementen	1	10	8	9	0
6		Flexible Modulanordnung möglich	1	10	8	8	0
7		Entwässerung	1	8	10	8	10
8		Verschattung durch Schnee	1	0	8	4	8
9		Windanfälligkeit	1	5	5	6	10
10		Energieausbeute Straße Nord Süd	3	8	5	8	5
11		Energieausbeute Straße Ost west	3	8	9	7	5
		Gewichtete Punktesumme		126	126	126	114
		Gewichtetes Mittel		7.4	7.4	7.4	6.7

Die Bewertung ergab, dass sich Pultdächer wie auch Satteldächer eignen. Je nach Ost-West bzw. Nord-Süd-Verlauf der Verkehrsachse eignet sich ein Pult- bzw. Satteldach besser aufgrund der Energieausbeute. In der Herstellung liegen beide Varianten in einem ähnlichen Bereich. Flachdächer haben einen Nachteil in der Entwässerung, allerdings könnte auf diesen, unabhängig von der Himmelsrichtung der Verkehrsachse, immer eine energieeffiziente Aufständigung von Photovoltaikmodulen realisiert werden. Konstruktionen mit Bogenform eignen sich aufgrund der Energieausbeute und auch der Herstellungskosten nicht.

Bezüglich der Energieausbeute ist eine Ausrichtung Ost-West für einen maximalen Ertrag günstig, wenn auch eine Aufständigung von ca. 30 ° gegen den Horizont möglich ist. Für die Maximierung des Ertrages je Fläche und hinsichtlich der Kosten je Fläche ist eine Vollbelegung mit Photovoltaik anzustreben. Demnach kommt nur eine ganz geringe Neigung der Module oder gar keine Neigung in Frage. Für den Fall, dass die Module dann eher Richtung Zenit als zum Horizont ausgerichtet sind, verschwindet der Ertragsunterschied zwischen Ost-West und Nord-Süd orientierten Varianten.

Für die Vordimensionierung im Zuge des Konzeptes werden sowohl die Pultdach- (für Ost-West-Verbindungen) als auch die Satteldachvariante (für Nord-Süd-Verbindungen) weiterverfolgt.

Bestimmung der Bauform in Längsrichtung

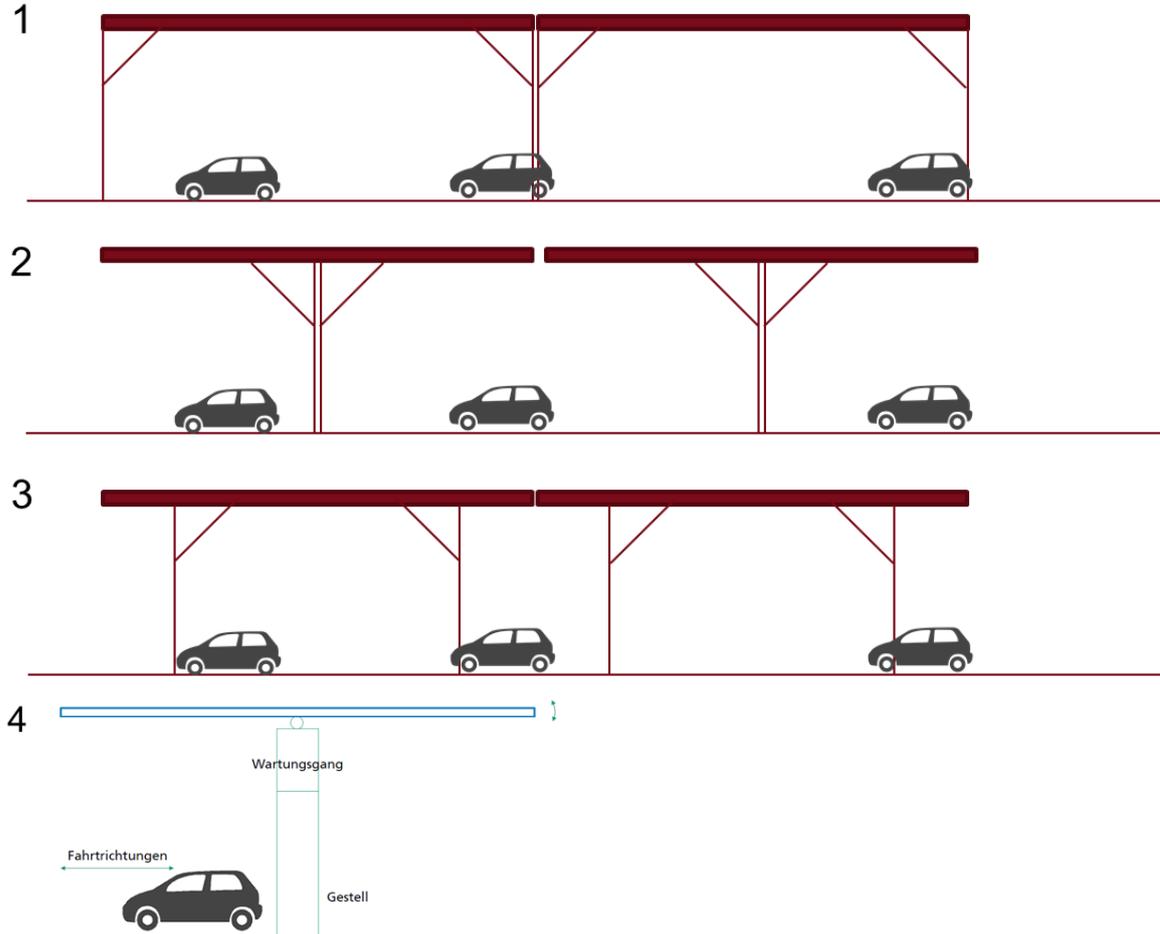


Abbildung 27: Die vier in der Diskussion zur Gestaltung der Überdachung in Längsrichtung angedachten Varianten: Überdachung mit Stützen in den Ecken (1), Überdachung mit Stützen in der Mitte (2), Überdachung mit Auskragung mit Stützen im Randbereich (3) und eine in Längsrichtung schwenkbare Überdachung (4)

Tabelle 5: Bewertungstabelle der Dachform im Querschnitt. Die Bewertung erfolgte mit Berechnung eines gewichteten Mittels unter Vergabe von Punkten von 1 bis 10 (1 sehr negativ, 10 sehr positiv).

Nr.	Art		Gewicht	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4
1	Konstruktion	Schwingungsanfälligkeit	1	10	5	10	5
2		Ermüdung	1	8	6	8	6
3		Robustheit/Systemversagen	1	8	4	10	4
4		Baukosten	2	5	5	5	8
5		Verbindung mit Seitenelementen	1	8	4	8	2
		Gewichtete Punktesumme		44	29	46	33
		Gewichtetes Mittel		7.3	4.8	7.7	5.5

Die Bewertung verschiedener Tragstrukturformen in Längsrichtung ergab, dass sich eine Bauform mit vier Stützen und auskragendem Dach am besten eignet. Dies liegt vor allem an der geringen Schwingungsanfälligkeit und der größeren Robustheit des Systems im Vergleich zu einer Konstruktion mit nur 2 Stützen. Es ist davon auszugehen, dass eine Konstruktion mit vier Stützen beim Versagen einer Stütze nicht unmittelbar einstürzt. Ein gewisser Abstand zwischen den Stützen hat zwar im Hinblick auf die Anzahl der Fundamente einen Nachteil, allerdings besteht hier zum einen der Vorteil des geringeren Materialverbrauchs des Stahlbaus aufgrund der verringerten Stützweiten, außerdem sind die einzelnen Module der Überdachung untereinander besser entkoppelt, was wiederum eine höhere Robustheit zur Folge hat.

Die Variante mit schwenkbarem Dach scheidet vor allem aufgrund der geringen Robustheit aus. Hier ist zu bedenken, dass aufgrund von möglichst minimalen Sperrzeiten von Autobahnen ein Minimum an Wartungsarbeiten anzustreben ist. Dies kann bei beweglichen Bauformen sicherlich nicht erreicht werden. Weiters kann eine falsche Dachstellung aufgrund eines Schadens der Schwenkeinrichtung bei extremen Wetterbedingungen zu Gefahren führen.

Die PV-Module selbst sollen folgenden Bedingungen genügen:

- Die Dachhaut bilden / integriert sein und Mehrwert schaffen
- Restlicht durchlassen (Verminderung von Beleuchtungsanforderungen)
- Anforderungen an Langlebigkeit, Belastbarkeit und Sicherheit erfüllen
- Eine Bauzulassung aufweisen
- Jedes „Konstruktionselement“ als System soll eigenständig sein (inkl. Wechselrichter)

Die wesentlichen Faktoren zur Technologiewahl waren: Resttragfähigkeit bei potentielltem Frontglasbruch, Lebensdauer und Verminderung möglicher Degradation (zur Erreichung geringerer Wartungsrisiken sowie zur Erhöhung der Rentabilität) und Durchlässigkeit von Licht, um Hell/Dunkel-Wechsel bei Einfahrt und Ausfahrt zu minimieren. Die Modultechnologieart, die am besten die Anforderungen erfüllt ist eine, in der die PV-Zellen zwischen zwei Glasplatten in der „neutralen Biegelinie“ eingebettet sind, sog. Glas/Glas-Module.

2.5 Sonderanforderungen

Folgende weitere Anforderungen wurden im Rahmen der Konzepterstellung formuliert:

- Die Lärmimmissionen aus dem Straßenverkehr sollten wenn möglich reduziert oder zumindest an relevanten Immissionspunkten nicht erhöht werden. Da das Konzept keine Einhausung aus Lärmschutzgründen, sondern nur eine Überdachung vorsieht, sind sowohl Abschirmeffekte wie auch Schalldruckpegelerhöhungen durch Reflexionen an der Überdachung grundsätzlich möglich. Bei Vorhandensein oder gleichzeitiger Errichtung von Lärmschutzwänden am selben Abschnitt ist zumindest im Nahbereich eine komplexes Schallfeld, das von der konkreten Ausgestaltung der Lärmschutzwand abhängt, zu erwarten.
- Es sollen durch die Überdachung keine Einschränkungen des Betriebs (z.B. Winterdienst) hervorgerufen werden, die über die üblichen Auswirkungen von Überkopfkonstruktionen verwandter Art (z.B. Schilderbrücken, Mautgantry) hinausgehen.
- Die Verkehrssicherheit soll nicht beeinträchtigt werden. Hier sind besonders der Anprallschutz der Tragkonstruktion, der Brandschutz, die geeignete Entwässerung auch im Winter und die optischen Einwirkungen auf die Verkehrsteilnehmer zu erwähnen.

3 KONZEPT FÜR DIE PHOTOVOLTAIK

Photovoltaische Energiekonversion ist heute bei geeigneten Randbedingungen die kostengünstigste Form der Energieerzeugung. Hier sind in den letzten Jahren und Jahrzehnten viele technologische Innovationen umgesetzt und Skaleneffekte in der industriellen Fertigung erfolgreich implementiert worden. Es ist daher ratsam, auf den industriellen Standards aufzubauen und die notwendigen Zusatzbedingungen für Straßenüberdachungen davon ausgehend zu berücksichtigen, um möglichst kosteneffiziente Konzepte herzuleiten.

Übliche PV-Module können anhand ihrer Eigenschaften nach folgenden Punkten unterteilt werden:

- Zellarten:
 - Kristalline Zellen (Mono/Poly Silizium, HJT etc.)
 - Dünnschichtmodul (CIGS, CdTe oder OPV)
- Verkapselungsmaterial
 - PVB-Modul (Polyvinylbutyral)
 - Teflon-Modul
 - EVA-Modul (Ethylen-Vinylacetat Copolymer)
 - Polyolefine
- Trägermaterialien
 - Folien-Modul
 - Glas-Folien-Modul (oder Glas-Tedlar-Modul)
 - Metall-Folien-Modul
 - Acrylglas-Modul
 - Doppelglas-Modul
- Lichtaktive Seiten
 - Einseitig (monofazial)
 - Beidseitig (bifazial)
- Randausbildung
 - Gerahmtes Modul
 - Rahmenloses Modul
- Bauspezifische Zusatzfunktion
 - Einscheibensicherheitsglas-Modul
 - Verbundsicherheitsglas-Modul

- Isolierglas-Modul
- Isolierglas-Modul für Überkopfverglasung
- Stufenisolierglas-Modul
- Mehrscheibenverbundglas-Modul

Weitere Details finden sich in der einschlägigen Literatur. Als Übersicht sind in den folgenden Abbildungen Beispiele für die genannten wesentlichen PV-Technologien aufgeführt.



Abbildung 28: Kristalline Silizium Module (mono- oder polykristallin). Diese sind die am häufigsten eingesetzte Technologie für Aufdach- und Freiflächenanlagen und bieten die kosteneffizienteste Möglichkeit zur Energiegewinnung. Neben Standard-Modulaufbauten aus Glaslaminaten gibt es auch Sonderformate für flexible oder transportable Anwendungen, sowie spezielle Anpassungen für Gebäudeintegration. Weitere Details in Abschnitt 3.1.

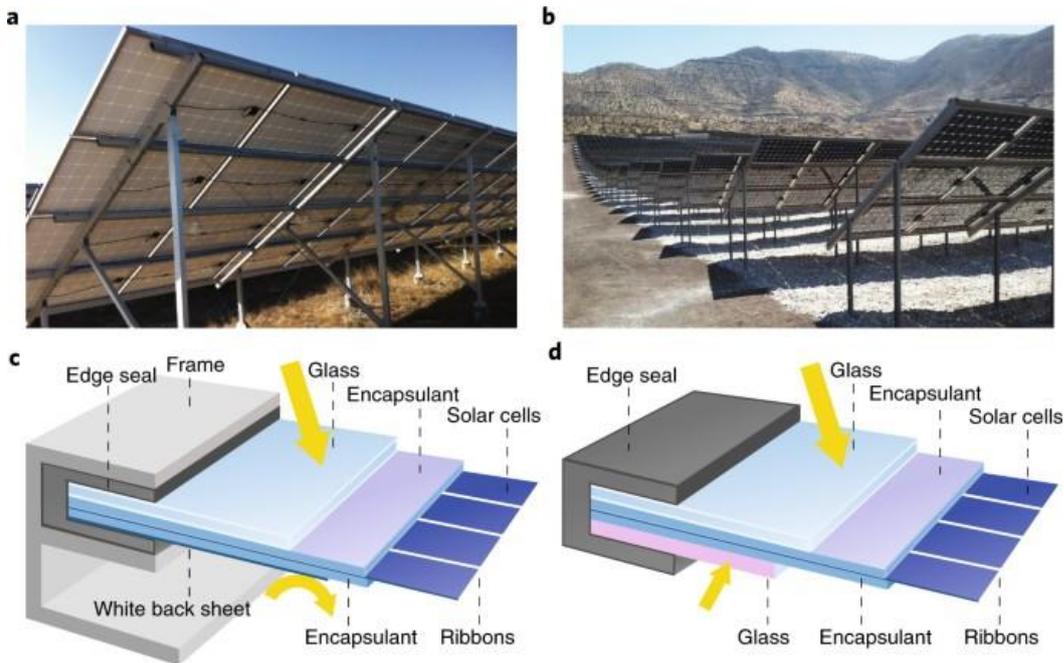


Abbildung 29: Bifaziale (zweiseitig aktive) Module. Bei älteren Solarzellen ist nur eine Seite der photoaktiv (monofazial). Bei aktuellen Konzepten können häufig beide Seiten Licht einsammeln (bifazial). Entsprechend wird hier die Rückseite nicht mehr mit einem lichtundurchlässigen weißen "Backsheet" verschlossen (wie rechts gezeigt), sondern durch eine zweite Glasschicht oder ein transparentes Polymer geschützt. Hierbei wird auf der Rückseite vor allem reflektiertes Licht (z.B. vom Untergrund) eingesammelt, was je nach Beschaffenheit signifikante Mehrerträge bieten kann.



Abbildung 30: Dünnschicht-PV (z.B. CIGS, CdTe oder OPV). Neben der Lichtabsorption durch Silizium gibt es auch andere (Halbleiter)materialien, die für Solarzellen eingesetzt werden können. Die hierbei eingesetzten Absorberschichten sind in der Regel wesentlich dünner als Silizium-Solarzellen und werden daher auch als "Dünnschicht-PV" bezeichnet. Dadurch sind sie in der Regel ebenfalls flexibel. Durch die zumeist höheren Kosten bezogen auf den Wirkungsgrad werden sie vor allem in spezialisierten Anwendungen eingesetzt.

Für die großflächige Etablierung von Straßenüberdachungen als PV-Kraftwerke kommt vom heutigen Stand der Technik nur Silizium-PV in Frage, sowohl aufgrund des deutlich

überlegenen Preis-Leistungsverhältnisses und da bei der Überdachung keine der Vorteile anderer Technologien ins Gewicht fallen. Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher auf kommerzielle Silizium PV-Module und mögliche Anpassungen, wie im Projekt untersucht.

3.1 Allgemeine Informationen zu Silizium PV-Modulen

Die Standardtechnologie für solare Energieerzeugung ist die Nutzung von Silizium-Solarzellen, die hohe Wirkungsgrade erreichen und in Massenfertigung verfügbar sind. Eine einzelne Solarzelle liefert dabei immer Gleichstrom, wobei der Energieertrag von der Intensität des einfallenden Lichts und somit von Tageszeiten und der Ausrichtung zur Sonne abhängig ist. Als Orientierung dient die Nennleistung, die unter standardisierten Testbedingungen ermittelt wird und einen Vergleich verschiedener Konzepte ermöglicht. Diese wird als "Watt-peak" oder " W_p " Wert angegeben.

Silizium Solarzellen werden in PV-Modulen zusammengefasst, wobei in der Regel 60 bis 72 einzelne Zellen durch Reihen- und Querverschaltung miteinander verbunden sind. Diese Module haben Abmaße von ca. 1,0 m x 1,6 m. Zum Aufbau eines Kraftwerks lassen sich die Module untereinander weiter verschalten, wobei standardisierte Anschlussbuchsen in die Module integriert sind. Das gesamte Kraftwerk kann anschließend zum Eigenverbrauch genutzt oder an das Stromnetz angekoppelt werden.

Ein PV-Kraftwerk ist damit grundsätzlich fast beliebig skalierbar. Allerdings gibt es einige Kostenaspekte im Hinblick auf die zusätzliche Peripherie, wie Gleichstrom-Wechselstrom Wandler für die Netzanbindung.

Im Allgemeinen sind die Anforderungen an Aufdachanlagen sehr gut auf die statischen Belastungen bei der Straßenüberdachung übertragbar, wie z.B. Belastung durch Schnee. Alle PV-Module werden nach dem IEC Standard 61215 getestet, wobei unter anderem ein statischer Belastungstest von mindestens 2400 Pa zu bestehen ist. Handelsübliche "Glas-Folien" Module mit einer Glasstärke von 3,2 mm bestehen diese Belastung ohne Probleme. Eine insbesondere für bifaziale Systeme zum Einsatz kommende Alternative sind die "Glas-Glas" Module, die nochmals stabiler sind. Der allgemeine Aufbau dieser Module wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Darüber hinaus bestehen bei der Straßenüberdachung noch dynamische Lasten durch den Verkehr und hohe Sicherheitsanforderungen durch die Überkopfmontage. Es finden sich in

der Literatur zahlreiche Untersuchungen zu dynamischen Lasten durch Windeinwirkungen bei schräg aufgestellten Modulen (z.B. [31]). Die Resonanzfrequenz typischer Module liegt zwischen 15 und 30 Hz und wird vom Formfaktor (Länge und Breite), sowie von den eingesetzten Materialien und Schichtdicken beeinflusst. Steifere Module haben eher höhere Resonanzfrequenzen. Die auftretenden Auslenkungen sind deutlich niedriger als übliche statische Belastungen während der Modulzertifizierung. Um den Einfluss dynamischer Belastungen durch fließenden Verkehr unter PV-Modulen zu evaluieren, wurden dedizierte Untersuchungen angestellt, die in Abschnitt 4.3.2 berichtet sind.

Beispiele für den Einsatz von PV-Modulen im Überkopfbereich wurden bereits eingangs erwähnt. Im Allgemeinen gelten hier die gleichen Anforderungen wie für Gläser, was eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder eine spezifische Prüfung für den Einzelfall erfordert. Weitere Informationen sind in Abschnitt 3.4 zusammengetragen.

3.2 Allgemeiner PV-Modulaufbau

Für die Installation in Aufdach- oder Freiflächenanlagen werden im Allgemeinen ähnliche PV-Module eingesetzt. Sonderanfertigungen sind im Bereich der Gebäude- oder Fassadenintegrierten PV üblich, allerdings mit in der Regel deutlich höheren Kosten und niedrigeren Erträgen, da die architektonischen Eigenschaften und Farbgebungen eine größere Rolle spielen.

3.2.1 Glas-Folie-Module

Standardmodule sind als Glaslamine aufgebaut. Dabei wird vorgespanntes hochtransparentes "Solarglas" verwendet, das im Fall einer Beschädigung in kleine Splitter zerspringt. Auf die Rückseite des Glases wird mit Hilfe einer Klebefolie die Matrix aus Solarzellen und elektrischer Verschaltung auflaminiert. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen wird im gleichen Laminationsvorgang hinter der Matrix eine Schutzfolie ("Backsheet") angebracht. Dieser Aufbau wird auch als "Glas-Folie" bezeichnet.

3.2.2 Glas-Glas-Module

Als ebenfalls breit verfügbare Variante ist der "Glas-Glas" Aufbau zu sehen. Hier wird anstelle der Schutzfolie ein zweites Glas laminiert. Diese Module haben in der Regel eine höhere mechanische Stabilität und sind auch von der Rückseite transparent. Damit kann Licht durch die Abstände zwischen den einzelnen Zellen hindurchfallen. Bei Einsatz von sogenannten "bifazialen" Zellen ist auch die Rückseite der Zellen photoaktiv, sodass im

Betrieb zusätzliche Energie durch das Licht von der Rückseite gewonnen werden kann. Prinzipiell lässt sich auch die Schutzfolie im “Glas-Folie” Aufbau transparent gestalten, wodurch ein geringeres Eigengewicht, aber auch eine geringere mechanische Stabilität erzielt wird.

Im Allgemeinen gilt der “Glas-Glas” Aufbau in Deutschland nicht als Verbundsicherheitsglas (VSG), da die verwendeten Klebefolien (EVA) nicht dem definierten Standard (PVB) entsprechen. Dennoch werden Splitter bei Beschädigung durch die Klebefolie festgehalten.

3.2.3 Gerahmte Module

Die laminierten Module können mit einem Rahmen aus Aluminiumprofilen eingefasst und daran je nach Aufständerungsart an einzelnen Punkten oder linienförmig gelagert. Dies stellt eine Abweichung zum konstruktiven Glasbau dar und erhöht die mechanische Stabilität der PV-Module.

3.3 Modulvariationen

Für die Evaluierung geeigneter Modultechnologien wurde auf numerische Simulationen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) zurückgegriffen. Für grundlegende Informationen wird auf die einschlägige Literatur zu diesem Thema verwiesen.

3.3.1 FEM Modell

Das genutzte Modell basiert auf dem Ansatz von A. Beinert et al. [32] und simuliert entsprechend der Symmetrie des rechteckigen Modulaufbaus ein Viertel des Moduls inklusive Rahmen falls gewünscht. Alle verbauten Elemente werden anhand ihrer materialspezifischen Parameter implementiert, d.h. insbesondere teilvorgespannte Gläser (TVG), Einkapselungsmaterialien (Klebefolie, z.B. EVA), Solarzellen (hierbei besteht im Rahmen dieser Simulationen kein Unterschied zwischen monofazialen und bifazialen Zellen) und Schutzfolien. Die Modelle sind linear elastisch aufgebaut, was einen Kompromiss zwischen Rechenleistung und Genauigkeit abbildet. Die Ergebnisse sind damit vor allem relativ zueinander zu betrachten, da bekannte systematische Abweichungen zu experimentellen Daten bestehen. Im Allgemeinen überschätzen diese Simulationen die auftretenden Verformungen bei Belastung, d.h. die errechneten Werte sind höher, als die im Experiment festgestellten Werte. Als Software wird Comsol Multiphysics verwendet.

3.3.2 Untersuchte Modulvariationen

Im Rahmen der Evaluierung wurden verschiedene Modulaufbauten verglichen: Zum einen die bekannten „Glas-Folie“ und „Glas-Glas“ Aufbauten, unter Variation der eingesetzten Glasdicken, außerdem der Effekt einer zusätzlichen Platte aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) zur Erhöhung der Stabilität. Hierzu wurden parallel experimentelle Untersuchungen angestellt, um geeignete Herstellungsverfahren zu evaluieren. Als vierte Variante wurde die Anbringung eines zusätzlichen Lochblechs getestet, welches am Rahmen montiert ist und als zusätzliche Absturzsicherung der Modulkomponenten agiert. Die beiden letztgenannten Konzepte sind beispielhaft in der Abbildung 31 gezeigt.

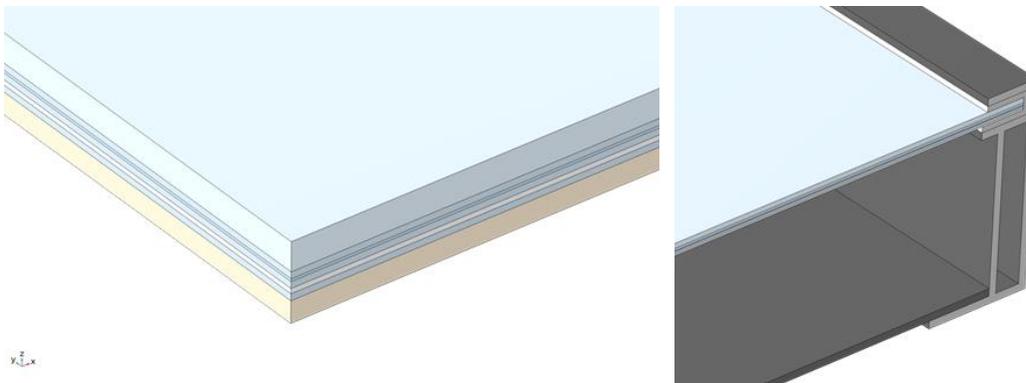


Abbildung 31: Schematischer Aufbau der erweiterten PV-Modulvarianten. Links: „Glas-Folie“ Aufbau mit GFK Platte. Von oben nach unten sind Glas, Klebefolie, Zellen, Klebefolie, Schutzfolie, Klebefolie und GFK Schicht zu sehen. Rechts: Einbau eines zusätzlichen Lochblechs, montiert am üblichen Aluminiumrahmen.

Als beispielhafte Rechnung wird die Verformung der Module unter statischer mechanischer Belastung betrachtet. Dabei werden alle Schichten der oben genannten Modulaufbauten in der Simulation berücksichtigt, inkl. Rahmen und Luftspalten.

3.3.3 Durchbiegung verschiedener Modulaufbauten

Zur qualitativen Bewertung der Ergebnisse, bietet sich der Vergleich mit den errechneten Werten für die breit eingesetzten Glas-Folie und Glas-Glas Konfigurationen an. Daraus lässt sich der relative Vorteil verschiedener Varianten gut ableiten.

Für die Standardvarianten wird dabei im Folgenden immer dieselbe Glasstärke im Modulaufbau verglichen, das heißt bei den „Glas-Folie“ Modulen eine einzelne Glasscheibe, bei den „Glas-Glas“ Modulen jeweils zwei Glasscheiben (also in Summe die doppelte Glasdicke, siehe Abbildung 32). Diese werden in der Simulation alle gleich

belastet, und deren Verformung verglichen. Die Verformung ist ein indirekter Parameter zur Beurteilung der Funktionalität der eingebetteten Solarzellen.

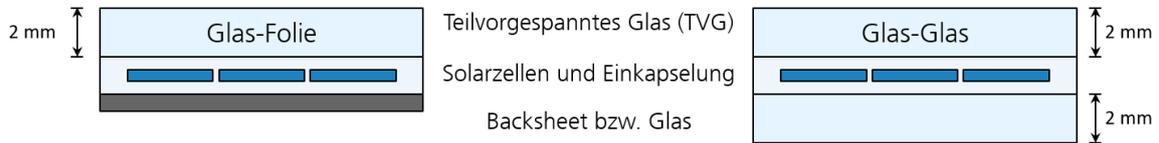


Abbildung 32: Schematischer Querschnitt der „Glas-Folie“ und „Glas-Glas“ Modulaufbauten, die per numerischer Simulation verglichen wurden. In den Ergebnissen wird stets nur eine Glasdicke angegeben - bei Glas-Glas Modulen gilt diese jeweils für Vorder- und Rückseite. In der Simulation sind die Schichten weiter unterteilt, wie in Abbildung 31 angedeutet.

Neben dem vertikalen Schichtaufbau des Moduls, spielt auch die gerahmte Größe eine Rolle. Um das zu illustrieren, wurden in der Simulation auch verschiedene handelsübliche Ausführungen verglichen.

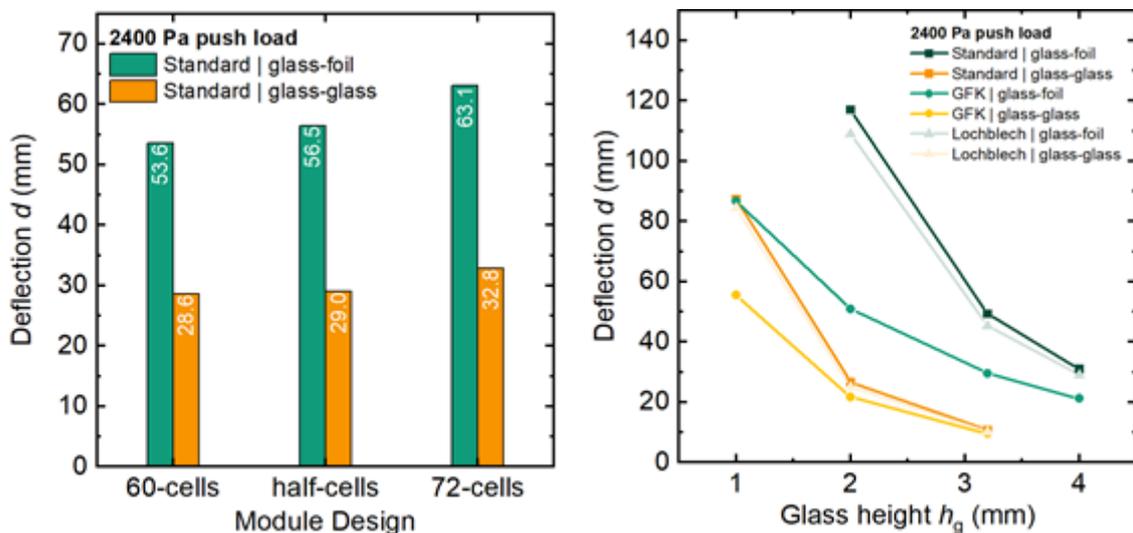


Abbildung 33: Ergebnisse numerischer Simulation von verschiedenen PV-Modulen. Links: „Glas-Folie“ und „Glas-Glas“ Module im direkten Vergleich bei verschiedenen Modullayouts. Rechts: Standardaufbauten und zusätzliche Variationen im Vergleich bei verschiedenen Glasstärken. Es ist zu beachten, dass bei „Glas-Glas“ Modulen, beide Scheiben symmetrisch aus der auf der x-Achse angegebenen Glasdicke bestehen. Somit ergibt sich für die Gesamtschichtdicke der doppelte Wert im Vergleich zu den „Glas-Folie“ Modulen.

Abbildung 33 zeigt beispielhafte Ergebnisse der numerischen Simulation. Die hier gezeigte „Deflection“ ist die maximale lokale Durchbiegung und tritt in der Regel in der Mitte des

Moduls auf. Wie in der Abbildung 33 (links) zu sehen, bieten die "Glas-Glas" Module bei gleicher Glasstärke einen deutlich höheren mechanischen Widerstand und verformen sich nur halb so viel wie "Glas-Folien" Module. Wenn die Module durch Einbau von mehr Zellen (60 vs. 72 Zellen) eine größere Gesamtfläche haben, steigt zwar die maximale Durchbiegung leicht an, allerdings zeigen auch hier "Glas-Glas" Module weiterhin deutliche Vorteile.

Wie man der Abbildung 33 (rechts) entnehmen kann, liegt das an der höheren Verbundwirkung der verbundenen Materialien. Wenn zusätzlich zum "Glas-Folien" Aufbau (dunkelgrün), eine GFK Platte eingebunden wird (hellgrün), dann sinkt die Durchbiegung stark. Außerdem sinkt die Durchbiegung, wenn dickere Gläser verwendet werden (untere Achse). Es lässt sich am Kurvenverlauf gut erkennen, dass die Durchbiegung hier schnell (nicht-linear) auf einen Minimalwert abfällt.

Der Modulaufbau mit zwei Gläsern ("Glas-Glas", dunkelorange) ist schon bei einer Glasstärke von 2 mm als ausreichend stabil anzusehen und weist nur noch eine geringe Durchbiegung auf. Hier ist der Effekt einer zusätzlichen GFK Platte (hellorange) insgesamt weniger stark, so dass ab einer Glasstärke von 2 mm aus mechanischer Sicht auch darauf verzichtet werden kann, um Kosten zu sparen. Wie weiter unten diskutiert, existieren kommerzielle Lösungen solcher PV-Module (2 x 2 mm Gläser mit in der Mitte einlaminieren Zellen), die durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung als VSG (Verbundsicherheitsglas) betrachtet werden können.

Das Hinzufügen von Lochblechen als zusätzliche Absturzicherung hingegen hat keinen relevanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Module bzw. deren Durchbiegung (schwach-grün bzw. -orange Daten). Für die Leistungsgeneration ist aber durch die zusätzliche Lichtabschirmung der Vorteil bifazialer Solarzellen reduziert. Daher sollte nach Möglichkeit auf die Einbindung solcher Platten verzichtet werden, wenn die Gefahr durch Herunterfallen von Teilen ausgeschlossen werden kann.

3.4 Module für Überkopfmontage

Die hohe Stabilität von "Glas-Glas" Modulen wird in Einzelfällen bereits für die Überkopfmontage genutzt. Da die Module aber im Allgemeinen nicht als VSG gelten, ist für jede Maßnahme eine separate Eignungsprüfung zu beantragen.

3.4.1 Kommerzielle Angebote

Eine Ausnahme bieten die “Vision Construct” Module der Firma “SolarWatt”, die eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) vorweisen können. Diese Module sind gerahmte “Glas-Glas” PV-Module (jeweils 2 mm Glasstärke) und können entsprechend der AbZ als VSG eingesetzt werden.

Die Leistungsklasse dieser Module ist 305 W_p bis 320 W_p bei einer Modulfläche von ca. 1,68 m x 0,99 m und ist damit gut vergleichbar mit aktuellen Modulleistungen für Freiflächen- und Aufdachanlagen. Die mechanische Belastung, welche für die Zertifizierung dieses Modultyps erprobt wurde beträgt 2400 Pa Soglast und bis zu 5400 Pa Auflast. Es gibt bereits Bauprojekte, bei denen diese Module erfolgreich eingesetzt wurden, beispielsweise als Parkplatzüberdachung wie eingangs berichtet.

Vor dem Hintergrund dieser umfangreichen Eignungsnachweise erscheinen zum jetzigen Planungsstand keine alternativen Modulausführungen notwendig. Die von Solarwatt hergestellten Module passen bereits sehr gut zu den aus den Simulationen geschlossenen Schlussfolgerungen. Auch die zusätzliche Anbringung von Lochblechen zu Absturzsicherung erscheint nicht notwendig.

3.4.2 Abschließende Bewertung für den Demonstratorbau

Mit der serienmäßigen Fertigung geeigneter Module durch den Hersteller SolarWatt ist eine gute Skalierbarkeit für das PV-Überdachungskonzept gewährleistet, was aus Sicht des Projektkonsortiums ein relevanter Vorteil ist. Daher wird die Auswahl dieser Produkte für den Bau des Demonstrators empfohlen.

Alternativ gibt es bei spezialisierten Herstellern weitere Produkte für die Überkopfmontage, allerdings in der Regel zu höheren Preisen und mit höheren Glasdicken. Sonderanfertigungen könnten auch in Kleinserienfertigung durch das Fraunhofer ISE gefertigt werden.

Um die dynamische Belastung von PV-Modulen durch fließenden Verkehr zu testen, wurden serienmäßig gefertigte Module der vorgesehenen Anforderungsklasse durch das Projektkonsortium untersucht, wie weiter unten im Bericht beschrieben.

3.5 Modulatorientierung und -neigung

3.5.1 Orientierung

Die optimale Ausrichtung der Photovoltaikanlage ist wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit. Um den bestmöglichen Ertrag zu erzielen, sollte die Ausrichtung der PV-Anlage im Idealfall exakt nach Süden zeigen. Die Praxis zeigt allerdings, dass auch größere Abweichungen von der idealen Ausrichtung unkritisch sind und den Ertrag nur geringfügig schmälern. Auch Abweichungen vom idealen Neigungswinkel sind in weiten Grenzen möglich.

Bei Ost-West-orientierten PV-Anlagen (z.B. über einer in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Straße) ergibt sich eine längere Zeitdauer, über die hinweg die Anlage ihren Strom liefert. Zwar bleiben dadurch die Spitzenerträge über die Mittagsstunden, wenn die Sonne im Süden steht, aus. Doch beginnt die Anlage früher mit der Stromproduktion und liefert bis in die Nachmittagsstunden Erträge. Insgesamt ergibt sich durch die Ost-West-Ausrichtung ein geringerer Ertrag pro Modul, aufgrund des höheren und über den Tag gleichmäßig verteilten Ertrags kann der Anlagenbetreiber jedoch einen größeren Anteil seines Stromverbrauchs mit der Photovoltaikanlage decken.

Bei Flachdächern ergibt sich sogar ein weiterer Vorteil: Der Ertrag pro Modul ist bei Anlagen mit Ost-West-Ausrichtung zwar niedriger, doch da mehr Module auf die gleiche Fläche passen, übersteigt der Ertrag einer Ost-West-Anlage den eines südausgerichteten Generators (bis zu 40% mehr Energieausbeute bei gleicher Fläche eines Flachdaches).

3.5.2 Neigung

Neben dem vorhandenen Angebot an Sonnenstrahlung, durch das die mögliche Strommenge ja begrenzt wird, ist die Neigung ein weiterer Faktor, durch den der Ertrag der Photovoltaikanlage beeinflusst wird.

Bei einer optimalen Photovoltaik Ausrichtung sind die Solarmodule nach Süden ausgerichtet. Nur bei dieser Ausrichtung können die von den Herstellern genannten maximalen Erträge überhaupt erzielt werden. Die reine Südausrichtung ist aber nur in den seltensten Fällen realisierbar.

Der optimale Neigungswinkel ist im Gegensatz zur Dachausrichtung nicht überall gleich. Hier spielen unterschiedliche Faktoren eine Rolle. Den höchsten Ertrag erzielen

Photovoltaik Module, wenn die Sonne im rechten Winkel auf die Solarmodule trifft. Weil der Ertrag einer Photovoltaikanlage im Sommer am höchsten ist und die Sonne mittags am stärksten scheint, ist die Ausrichtung der Module optimal, wenn die Sonne im Sommer am Mittag senkrecht auf die Module scheint.

Da der Sonnenstand aber im Tages- und im Jahresverlauf nie konstant bleibt, ist diese optimale Einstrahlung bei fest montierten Solarmodulen nicht permanent gegeben. Durch einachsige bzw. zweiachsige Nachführung können die Erträge verbessert werden. Aufgrund des hohen Anteils an diffuser Strahlung liegt der Ertragserhöhung bei maximal 30%.

Es geht also darum, den optimalen Winkel zu finden, der in der Jahressumme die höchsten Erträge bringt. Für unsere Breiten liegt dieser zwischen 30 und 35 Grad. Aber auch Abweichungen von dieser optimalen Neigung um $\pm 20^\circ$ sind als günstig anzusehen, da eine Reduzierung der Einstrahlung gegenüber dem Optimum bei maximal 5% liegt.

Die meisten Schrägdächer sind daher von ihrer Neigung her für Photovoltaikanlagen geeignet. Die Einbußen an Solarstrom, die durch flachere oder steilere Winkel entstehen, sind – bei optimaler Südausrichtung – nicht extrem groß. Je stärker allerdings von der reinen Südlage abgewichen wird, umso größer sind auch die Effekte eines suboptimalen Neigungswinkels. Die möglichen Ertragsverluste lassen sich gut auf entsprechenden Grafiken ablesen.

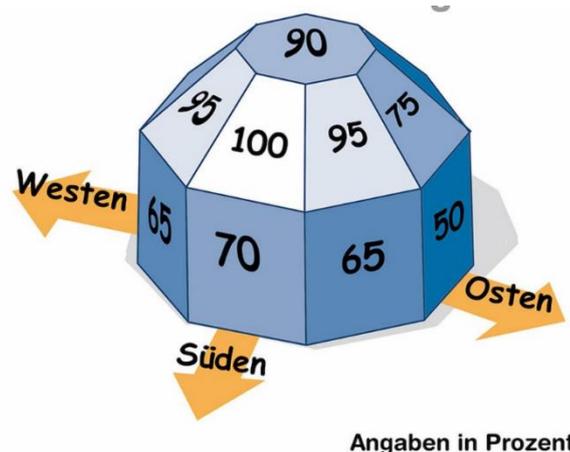


Abbildung 34: Ausrichtung und Neigung der PV Module haben Einfluss auf den Energieertrag (Quelle: solaranlage-ratgeber.de)

Die ideale Ausrichtung zeigt nach Süden, liegt also bei 0° Azimutwinkel (manchmal auch, z.B. in der Architektur als 180° bezeichnet). Die zu erwartenden Einbußen bei leichten

Abweichungen sind nicht sehr groß. Sogar bei einer Ausrichtung nach Südwest oder Südost, also einer Abweichung von 45 Grad, liegen die Ertragseinbußen – in Abhängigkeit des Neigungswinkels – bei nur 5%. Selbst bei reiner West- oder Ostausrichtung sind noch ordentliche Erträge zu erzielen. Die Ertragsminderung gegenüber Süden liegt hier bei 20%, was z.B. durch eine Flächenvergrößerung ausgeglichen werden kann. Hier kommt hinzu, dass beide Flächen (nach Osten und nach Westen) für die Photovoltaikanlage genutzt werden können, was zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Stromerzeugung über den Tag und somit zu einem höheren Eigenverbrauchsanteil des selbst erzeugten Solarstroms führt, denn statt eines Ertragsmaximums zu Mittag gibt es am Vor- und Nachmittag zwei kleinere Maxima.

Zusammengefasst hängt die Wirkung von Photovoltaikmodulen von der Neigung der Fläche, der Himmelsrichtung und der Jahreszeit ab.

Netzgekoppelte PV-Systeme werden in der Regel so ausgelegt, dass sie in der Jahressumme die höchste Einstrahlungsmenge nutzen und somit über das Jahr betrachtet den höchsten Solarstromertrag erzielen.

- Ziel bei PV-Anlagen mit Volleinspeisung ist die Maximierung der Solarstromproduktion pro Jahr, denn die produzierte Strommenge ist einer der Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit bestimmen.
- Bei PV-Systemen zur Eigenverbrauchsdeckung ist die zeitliche Korrelation der Energieerzeugung mit dem Energieverbrauch am Netzanschlusspunkt entscheidend.

3.5.3 Standort

Energieerträge sind abhängig von der Solareinstrahlung und damit vom geographischen Standort. Die Graphik in Abbildung 35 zeigt die jährliche Einstrahlung auf die nach Süden orientierte und optimal geneigte PV Modulfläche für Mitteleuropa mit besonderen Fokus auf die D-A-CH Länder, für welche das Konzept untersucht wird.

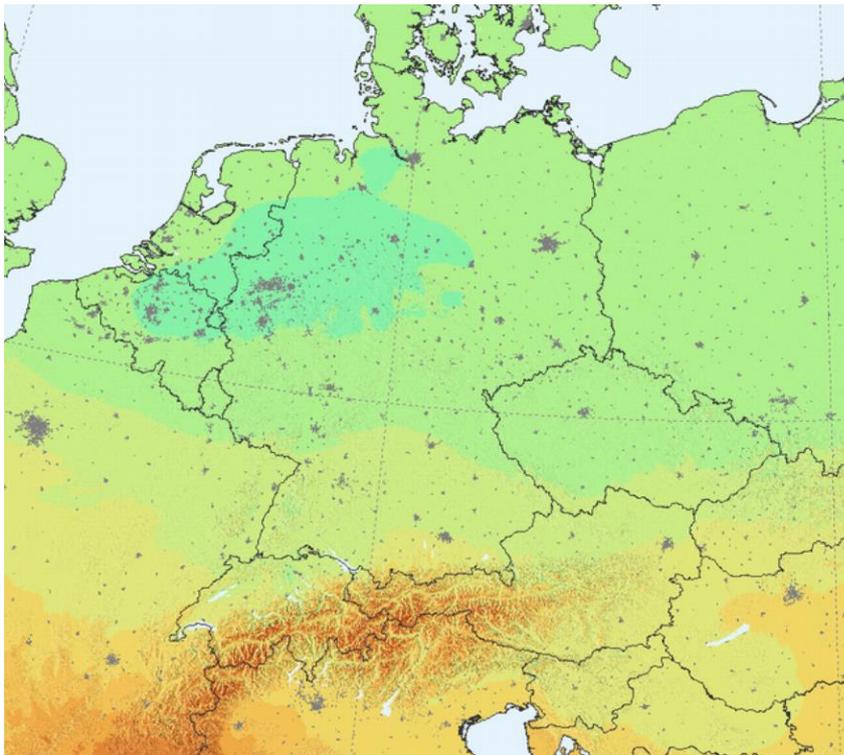


Abbildung 35: Jährliche Einstrahlung auf die nach Süden orientierte und optimal geneigte PV Modulfläche.

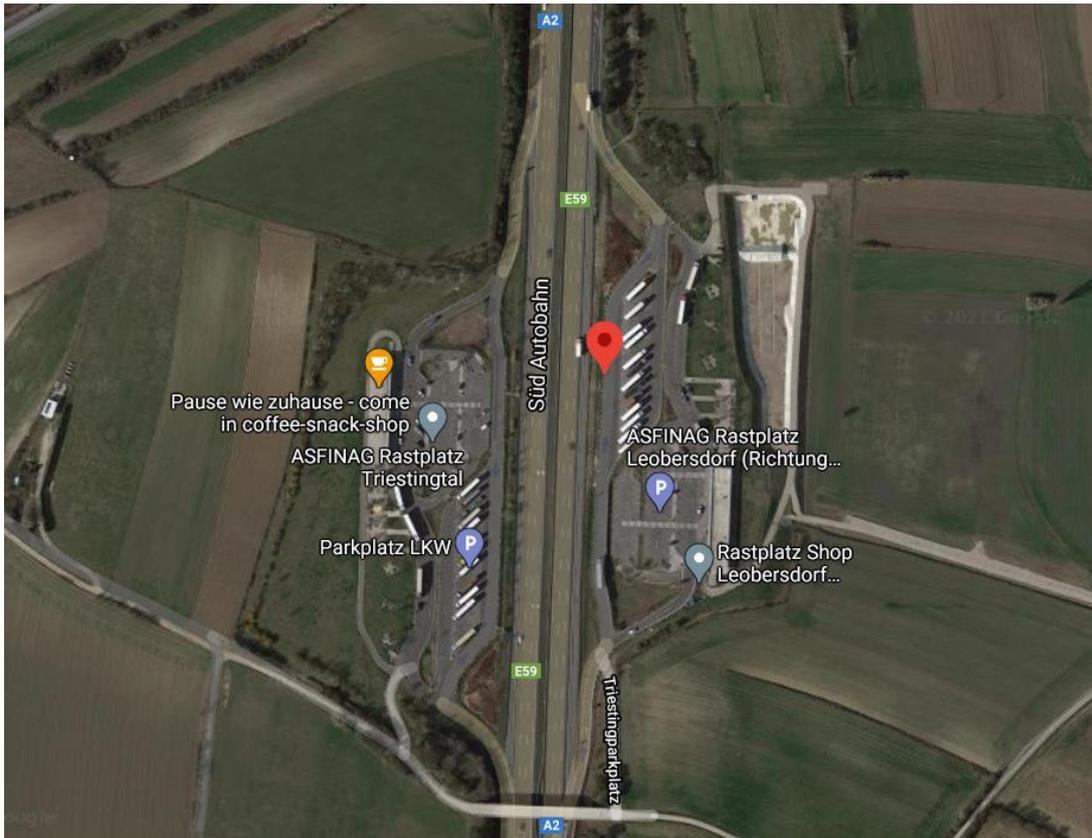
Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pvgis_Europe-solar_opt_publication.png

Folgende Standorte wurden für die weiteren Untersuchungen - insbesondere für die Energieertragsberechnungen in Abschnitt 6.1 Energieerträge aus der Photovoltaik – herangezogen:

a) ASFINAG Rastplatz Leobersdorf A2

Koordinaten: 47.910139, 16.208328

Vorteile: Anschluss an Stromnetz vorhanden, unmittelbar angrenzend befindet sich der ASFINAG Rastplatz Leobersdorf als potenzieller Stromabnehmer. Augenscheinlich geeignete Verkehrsflächen für Aufbau vorhanden. Straßenverlauf in Nord-Süd Achse.



b) A1 Raststation St. Pölten SÜD

Koordinaten: 48.177632, 15.555647

Vorteile: Anschluss an Stromnetz vorhanden, direkt am Standort befindet sich der ASFINAG Rastplatz St. Pölten als potenzieller Stromabnehmer, inklusive Tankstelle mit Elektroladestation. Augenscheinlich geeignete Verkehrsflächen für Aufbau vorhanden. Straßenverlauf in Ost-West Achse.



c) A2 Klagenfurt am Wörthersee

Koordinaten: 46.648452, 14.253953

Vorteile: Anschluss an Stromnetz vorhanden, elektrische Verbraucher im Tunnel als potenzieller Stromabnehmer, südlicher Standort mit wahrscheinlich guten Energieertragswerten.



d) PWC-Anlage „Brandbühl“ an der B 33 (Radolfzell am Bodensee, LK Konstanz)

Koordinaten: 47.770195, 8.965138

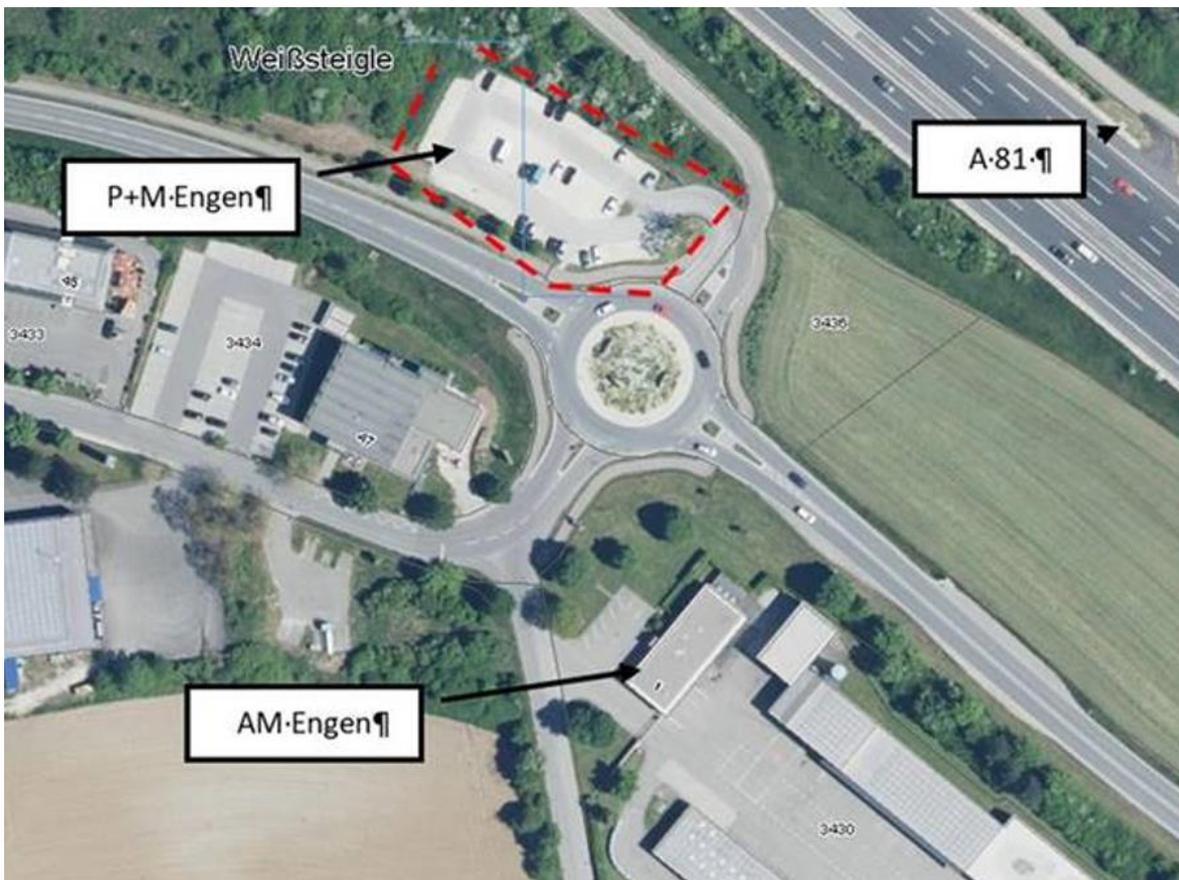
Vorteile: Lage im „Drei-Länder-Eck D-A-CH“, B 33 in diesem Bereich autobahnähnlich ausgebaut, augenscheinlich geeignete Verkehrsflächen für Aufbau vorhanden, Anschluss an Stromnetz vorhanden, PWC / Beleuchtung als potenzieller Stromabnehmer, Anlage relativ neu, keine Konflikte zwischen Aufbau / Unterhaltung Demonstrator und (ruhemdem) Verkehr zu erwarten.



e) P+M Anlage Engen an der A 81 (Engen, LK Konstanz),

Koordinaten: 47.856474, 8.794141

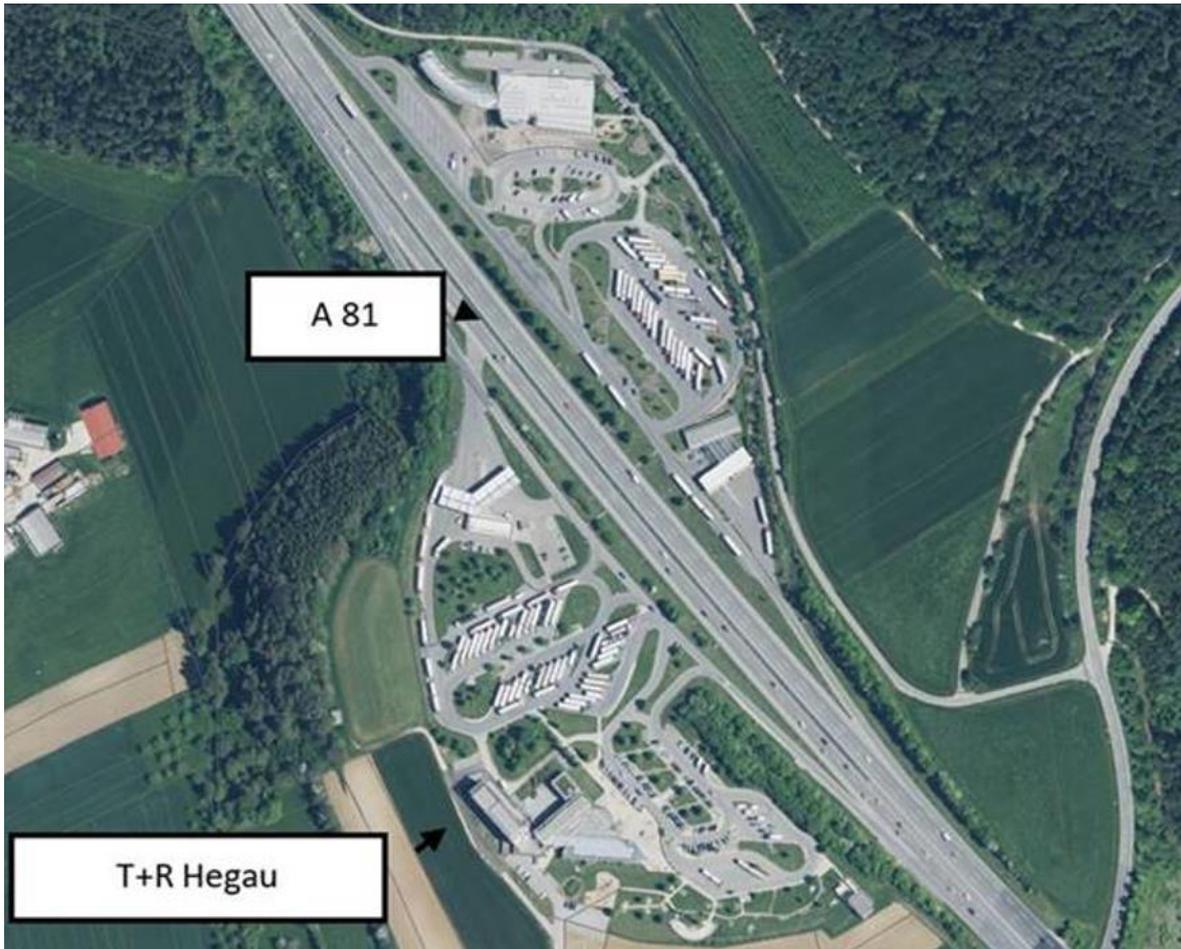
Vorteile: Lage im „Drei-Länder-Eck D-A-CH“, Anschluss an Stromnetz vorhanden bzw. ohne großen Aufwand möglich, unmittelbar angrenzend befindet sich die AM Engen als potenzieller Stromabnehmer.



f) T+R Anlage Hegau an der A 81 (Engen, LK Konstanz),

Koordinaten: 47.862292, 8.785754

Vorteile: Lage im „Drei-Länder-Eck D-A-CH“, Anschluss an Stromnetz + augenscheinlich geeignete Verkehrsflächen für Aufbau vorhanden



g) Hamburg Seevetal, Rastplatz Sunderblick A1

Koordinaten: 53.377801, 9.951588

Dieser Standort wurde gewählt um einen Vergleich zur Energieertragssituation in nördlicher geographischer Lage darzustellen.



Die Berechnungs- und Simulationsresultate für die genannten Standorte sind in Abschnitt 6.1 im Detail dargestellt. Diese berücksichtigen auch Variantenrechnungen hinsichtlich Ost/West oder nach Süden orientierter Photovoltaikmodule.

3.6 Montagetechnik und Entwässerung

Die eingesetzten PV-Module müssen baulich möglichst geschickt an die Stahlunterkonstruktion angebracht werden, um die zuvor erwähnten Anforderungen zu erfüllen.

3.6.1 Lösungen für Montage und Entwässerungen

Im Zuge des Projektes wurden verschiedene Varianten der Anbindungsmöglichkeit an die Stahlunterkonstruktion untersucht. Frühzeitig wurde hier entschieden auf PV-Module mit einem Aluminiumrahmen zu setzen. Neben den diskutierten Vorteilen bei mechanischer Belastung im Betrieb ergeben sich weitere praktische Vorteile für den Aufbau der Straßenüberdachung. So sind die Module während des Montagevorgangs vor äußeren

Einwirkungen geschützt sind, beispielsweise Glasbruch bei falscher Bedienung. Ein weiterer Vorteil dieser Modulvariante ist der vereinfachte Transport zum Aufstellort, da sie auch hier einen besseren Schutz aufweisen gegenüber ungerahmten Module.

Der Anschluss an die Stahlunterkonstruktion wurde in verschiedenen Ausführungen mittels 3D CAD-Zeichnungen demonstriert. In Abbildung 36 sind drei solcher Querschnitte der 3D-Zeichnungen zu sehen. Diese illustrieren die Anbindung der PV-Module an den Hilfsrahmen (mittig) und schließlich an die Unterkonstruktion (nicht gezeigt). Anhand dieser konnten mögliche Varianten nach verschiedenen Auswahlkriterien betrachtet und bewertet werden.



Abbildung 36: Konzeptentwicklung zur Anbindung der PV-Module an die Stahlunterkonstruktion. Die blauen Flächen entsprechen photoaktiven Flächen der PV-Module. An den Rändern ist das Profil üblicher Aluminium Rahmen zu erkennen. Die mittig angeordneten Elemente bilden die Tragkonstruktion ab.

Ein besonderer Fokus lag hier auf der Entwässerung der überdachten Oberfläche und dem Verhindern von Eiszapfenbildung. In den ersten beiden Zeichnungen wird das Wasser durch die Hilfsrahmen gesammelt und darin abgeführt. Diese beiden Varianten unterscheiden sich durch die Abdichtung des Hilfsrahmen, wobei noch zusätzliche Gummidichtungen eingelegt werden können. Beim dritten Ansatz kommt eine versiegelnde Auflage zwischen den Modulstößen zum Einsatz, so dass das Wasser über die gesamte Fläche abfließt. Die Konzepte wurden zunächst durch das Projektkonsortium diskutiert und anhand der genannten Kriterien bewertet.

3.6.2 Kommerzielle Anbieter

Im Anschluss wurden die Systemskizzen und die abgeleiteten Anforderungen mit auf dem Markt verfügbaren Systemen abgeglichen. Hierbei sticht insbesondere das Angebot der Firma ClickCon heraus. Diese bietet mit Ihrem ClickPlain System eine erprobte und anwendungsorientierte Lösung. Diese ist nicht unähnlich zu den entwickelten Ansätzen, beinhaltet aber eine zusätzliche patentierte Einspannvorrichtung und ist bereits mehrfach

erprobt. Eine eigenständige Neuentwicklung zur Anbindung der PV-Module ist zum jetzigen Planungsstand daher nicht erforderlich.

Die Anbindung erfolgt über das Anbringen von Sparren über den Pfetten. Diese Sparren verfügen über eine spezielle Formgebung welche es ermöglicht über ein Click-System mit Hilfe von Spiegeln einzelne Modulfelder zu generieren. Diese Pfetten – Spiegel Konstruktion ermöglicht eine einfache Montage der Module und fungiert gleichzeitig als Führung für den Wasserabtransport. Die PV-Module werden über ein Click-System in den Modulfeldern befestigt und mit einer zusätzlichen Sturmsicherung ausgestattet. Die Indachlösung ist laut Hersteller regendicht, was in vielen Anwendungen bereits gezeigt wurde. Der Wasserabtransport vom Dach erfolgt konzentriert in Fallrohren. In Abbildung 37 sind verschiedene Stadien einer Dachrichtung mit diesem System zu sehen.

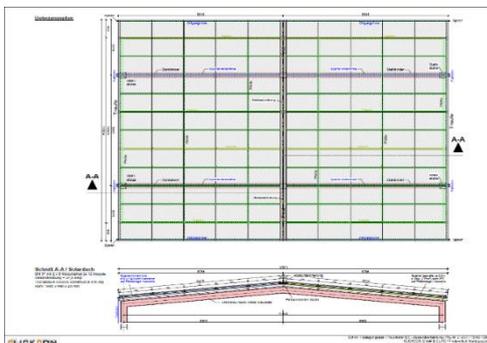


Abbildung 37: Verschiedene Stadien der PV-Modulanbringung. Die Skizze zeigt eine mögliche Belegung des geplanten Demonstrators mit PV-Modulen und dem ClickCon System. Die anderen Beispiele zeigen den Aufbau von freistehenden Überdachungen mit Glas-Glas Modulen.

Ein weiterer Vorteil für das ClickCon System ist bereits vorhandene Erfahrung mit den präferierten SolarWatt Modulen. Dadurch wird insgesamt das Risiko von Verzögerungen im Aufbau des Demonstrators und in der Skalierung des Konzepts reduziert. Zudem bestehen

bereits Lösungen, die für die Abdichtung zwischen aneinandergereihten Überdachungen eingesetzt werden können.

3.6.3 Wasserabfuhr

Bezüglich der Abfuhr der durch die Überdachung aufgenommenen Wassermengen sind generell standortspezifische Vorkehrungen zu treffen, wie die Abstimmung mit Experten außerhalb des Konsortiums ergab. Hierzu sollte entsprechende Unterstützung durch Hydrologen hinzugezogen werden.

Allgemeine Überlegungen betreffen die Flutung der Fahrbahn, die unbedingt verhindert werden muss, z.B. durch entsprechende Neigung des Dachs oder Entwässerung über Dachrinnen. Bei den aktuell geplanten Dachflächen sind allerdings hohe Wassermengen zu erwarten, so dass eine gezielte Abführung notwendig sein sollte. Aufgrund der hohen Wassermengen sollte wenn möglich ein Anschluss an die Kanalisation vorgesehen werden. Das Fassungsvermögen der Dachrinnen und Gitterschächte ist zu beachten bzw. großzügig auszulegen. Zudem ist auf Gewässerschutzanlagen zu achten. Besondere Herausforderungen sind im Kurvenbereich zu erwarten.

3.6.4 Empfehlung für den Demonstratorbau

Für den zu errichtenden Demonstrator wird von Seiten des Konsortiums der Einsatz des ClickCon Systems für die mechanische Anbringung in der erprobten Kombination mit den PV-Modulen von SolarWatt empfohlen. Erste Diskussionen zur technischen Umsetzung mit der angedachten Unterkonstruktion verliefen bereits sehr vielversprechend. Zur ordnungsgemäßen Umsetzung der Entwässerung wird zudem die standortspezifische Bewertung durch einen Hydrologen notwendig werden.

3.7 Anschlusstechnik

Das Photovoltaiksystem soll als netzgekoppelte Photovoltaikanlage ausgeführt werden.

Unter netzgekoppelten PV-Anlagen versteht man Systeme, die in das öffentliche elektrische Stromnetz einspeisen. Diese Anlagen werden parallel zum Verbundnetz betrieben, ein Wechselrichter bildet dafür die intelligente Schnittstelle zum PV-Generator.

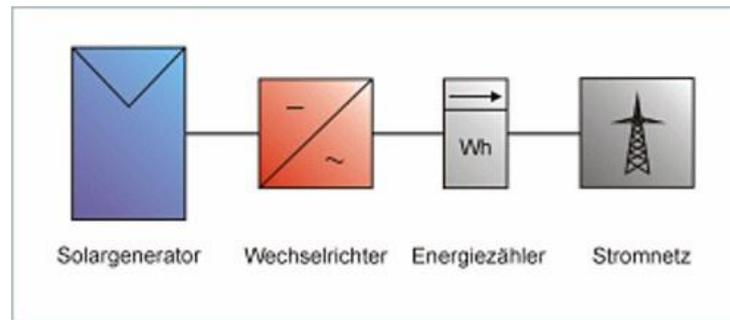


Abbildung 38: Schema einer netzgekoppelten Anlage

Netzgekoppelte Anlagen bestehen üblicherweise aus den folgenden Komponenten:

- PV-Generator (PV Module)
- Gleichstromverkabelung
- ggf. Generatoranschlusskasten
- Wechselrichter
- Wechselstromverkabelung
- Zählerschrank mit Stromkreisverteilung, Bezugs- und Einspeisezähler und Netzanschluss

Der PV Generator besteht aus mehreren Modulen und Module wiederum aus mehreren einzelnen Solarzellen. Eine Solarzelle ist demnach die kleinste Einheit eines PV-Moduls.

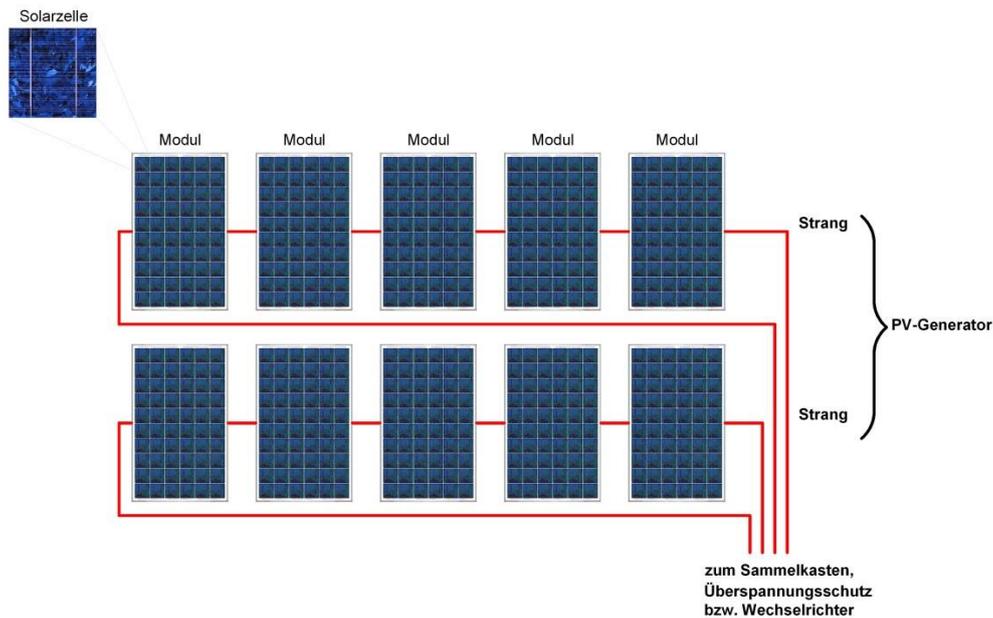


Abbildung 39: Schematische Darstellung des Photovoltaik-Generators

Der einwandfreie und dauerhafte Betrieb ist abhängig von folgenden Anforderungen:

- Langlebigkeit und Beständigkeit
- Schutz der Zellen vor Umwelteinflüssen, zum Beispiel UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Wärme
- Mechanische bzw. elektrische Stabilität
- Sicherheit
- Selbstreinigungseffekt
- Integrationsfähigkeit

Neben der Erzeugung elektrischer Energie sollen PV-Module auch gestalterisch und technisch in die Gebäudehülle bzw. in Baukomponenten integriert werden und gleichzeitig für andere Aufgaben der Baustruktur nutzbar gemacht werden.

Wechselrichter und Anlagenkonzepte:

PV Module liefern je nach Temperatur, Einstrahlung und Verschattung unterschiedlich viel Leistung, was zu sogenannten Mismatching-Verlusten führen kann. Um diese so gering wie möglich zu halten, werden String- bzw. Strang-Wechselrichter eingesetzt, die den Solarstrom eines "Stranges" von in Reihe geschalteten PV-Modulen umwandeln.

Bei kleineren PV-Anlagen werden die Solarmodule parallel an den Wechselrichter angeschlossen. Kleinere Leistungsverluste können hier in Kauf genommen werden und lassen sich ohne größeren finanziellen Aufwand nicht verhindern. Bei größeren, in Reihe geschalteten PV-Anlagen wären die sogenannten Mismatching-Verluste (Leistungsverluste bei Reihenschaltung von Photovoltaik-Modulen) zu groß, um sie einfach zu ignorieren. Daher werden sogenannte String-Wechselrichter eingesetzt.

Der Begriff String steht hier für "Reihe", es wird also eine Reihenschaltung der einzelnen Module am String-Wechselrichter vorgenommen. Dabei unterscheidet man "starke" und "schwache" Module(-reihen) und fasst die jeweils zusammengehörigen zu einem Strang zusammen. Entweder man schließt dann

- jeden String an einen String-Wechselrichter an oder
- mehrere Strings an einen Multi-String Wechselrichter mit unabhängig arbeitenden MPP Trackern.

MPP (Maximum Power Point) kennzeichnet das Leistungsmaximum auf der Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U-Kennlinie) eines PV-Moduls. Wechselrichter mit MPP-Tracker versuchen immer, diesen Punkt in jedem Betriebszustand einzustellen. Bei einer Strang-Verschaltung hat dies den Vorteil, dass der MPP-Tracker den jeweiligen, lokalen Strangbedingungen entsprechend arbeitet.

Anlagen bis einige Kilowatt (kW) Leistung werden häufig mit Stringwechselrichtern ausgeführt.

Sollten die Teilgeneratoren unterschiedlich orientiert oder einer Verschattung ausgesetzt sein, ergibt sich durch den Betrieb mit unabhängigen MPP Trackern eine bessere leistungsbezogene Anpassung an die Einstrahlungsbedingungen. Pro Teilgenerator oder pro Strang wird ein Wechselrichter eingesetzt. Hierbei ist darauf zu achten, dass nur Module mit ähnlichen Umgebungsbedingungen (Orientierung, Verschattung) in einem Strang zusammen geschaltet werden. Bei Strängen mit Verschattung kann es durch die längeren Stränge zu Leistungseinbußen kommen (Modul mit der geringsten Einstrahlung bestimmt den Strom).

Durch die Verwendung von Strangwechselrichtern können einerseits die Installationskosten gesenkt werden und andererseits wird eine Installation erleichtert. Strangwechselrichter lassen sich mit ihrer verknüpften Systemtechnik besser an die modulare Bauweise bzw. die speziellen Bedingungen und Gegebenheiten einzelner Teilflächen eines Generatorfeldes

anpassen. Diese Art von Wechselrichtern wird normalerweise in der Nähe des PV-Generators montiert und angeschlossen und ist in Leistungsbereichen von 500 Watt bis 100 Kilowatt lieferbar.

Für den Anschluss der PV-Anlage an das Niederspannungsnetz und die Einspeisung der erzeugten Energie zur Versorgung lokaler Verbraucher sind die lokalen technischen Anforderungen zur Netzeinbindung zu beachten. Abbildung 40 zeigt das prinzipielle Schema einer PV-Anlage im Netzparallelbetrieb und Überschusseinspeisung (Möglichkeit der Eigenverbrauchsdeckung) für PV-Anlage mit einer Leistung von $< 30\text{kW}$.

Bei PV-Anlagen mit Überschusseinspeisung wird die momentan erzeugte elektrische Energie bei Eigenbedarf seitens der Verbraucheranlage direkt von der PV-Anlage bezogen. Wenn der Eigenbedarf bei der Verbraucheranlage die Erzeugung unterschreitet, wird die überschüssige Energie in das „Netz“ eingespeist und vom Energiehändler vergütet. Wenn die PV-Anlage weniger Energie produziert (als von der Verbraucheranlage benötigt wird) wird der restliche Energiebedarf aus dem „Netz“ bezogen.

Die Messung der vom Netz bezogenen und der ins Verteilernetz gelieferten elektrischen Energie wird mittels eines speziellen Zählers durchgeführt, der beide Energierichtungen erfassen kann.

Für PV-Anlagen größer als 30 kVA Gesamtnennscheinleistung ist ein zentraler Netzentkupplungsschutz erforderlich, wie in Abbildung 41 dargestellt.

Σ WR-Scheinleistung $\leq 30\text{kVA}$, (kein Inselbetrieb)

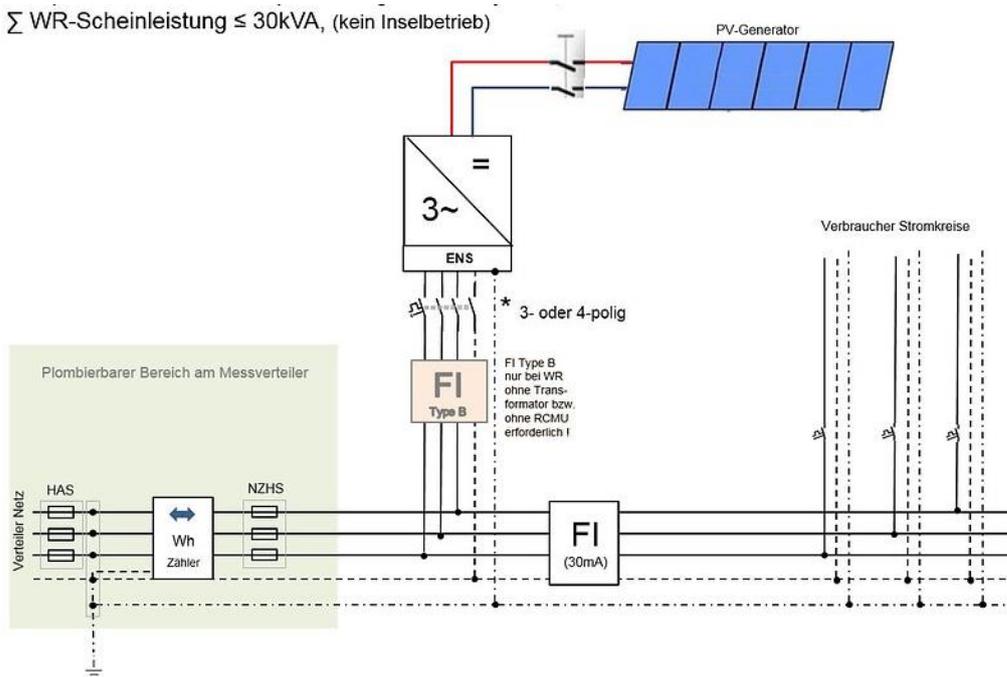


Abbildung 40: Überschuss-Einspeiseanlage im TN System $<30\text{kW}$ in Österreich. ⁶

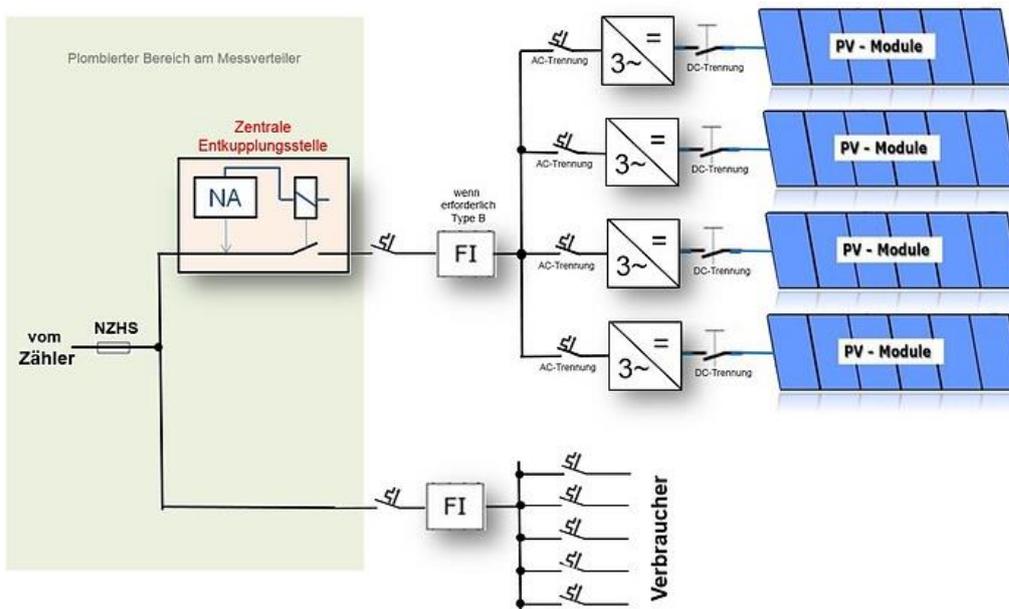


Abbildung 41: Netzparallele PV Überschuss-Anlage mit zentralem Netzentkopplungsschutz.
Prinzipdarstellung einer Anlage mit Überschusslieferung (kein Inselbetrieb) ⁷

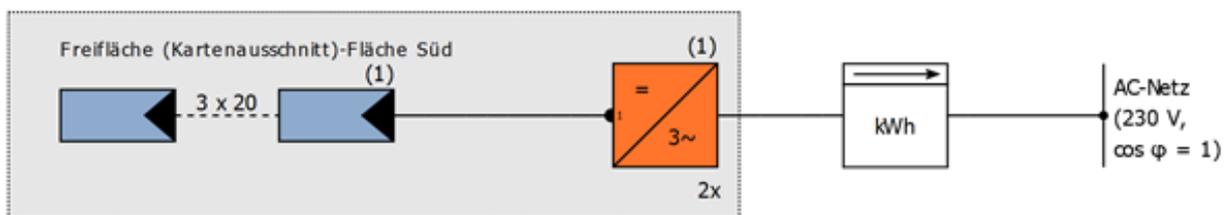
⁶ Quelle: <http://www.ooe-ausfuehrungsbestimmungen.at/de/PVschema/>

⁷ Quelle: <http://www.ooe-ausfuehrungsbestimmungen.at/de/PVschema/>

Aus der projektierten PV-SÜD Moduleinheit (Abschnitt 2.4, Abschnitt 3.6) ergibt sich die folgende Konfiguration für die PV Anlage:

PV-Generatorleistung	37,8 kWp
PV-Generatorfläche	199,6 m ²
Anzahl PV-Module	120
Anzahl Wechselrichter	2

Das entsprechende Einlinien-Schaltbild ist in Abbildung 42 dargestellt. Das Verbindungsschema der PV Module zu Strängen wird in einem detaillierten Strangplan (Abbildung 43) zusammengefasst:



Legende

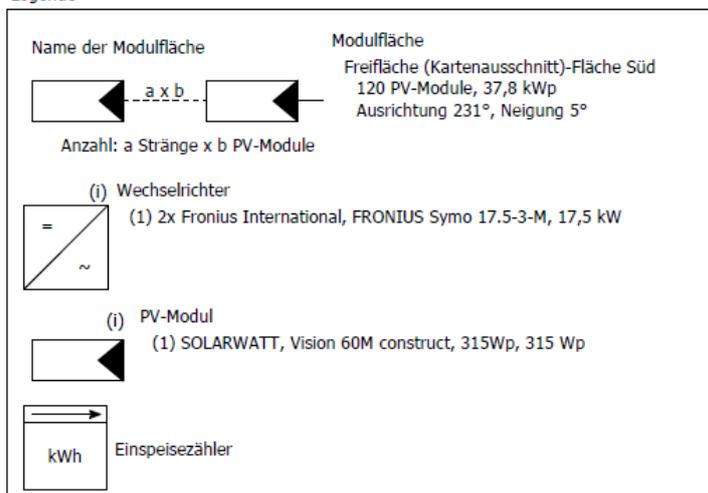


Abbildung 42: Einlinien Schaltplan PV Anlage

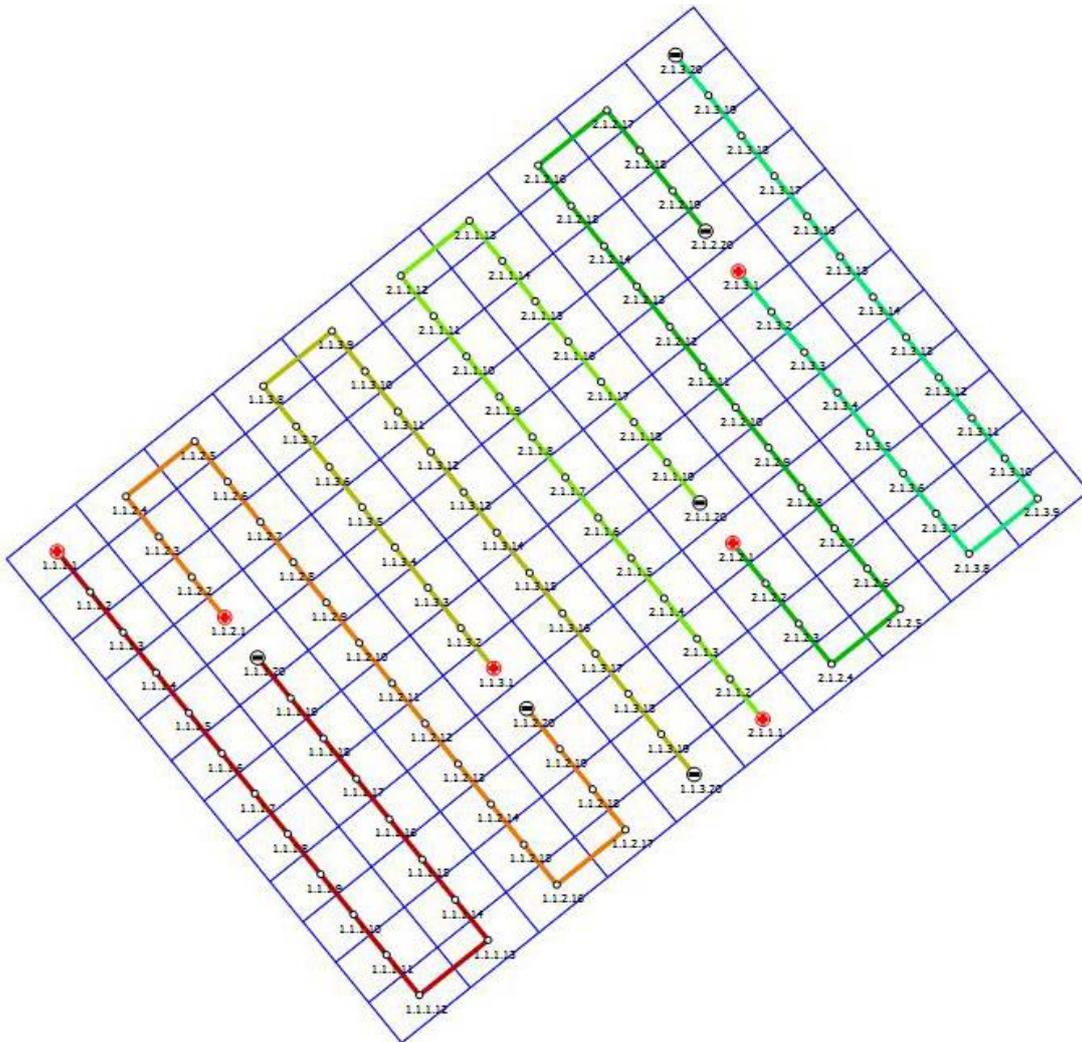


Abbildung 43: Darstellung der Strangverschaltung der PV Module

3.8 Brand

In der Sicherheitsqualifikation von PV-Modulen nach der IEC 61730:2016 Serie [4],[5] sind mit den Modulen Safety Tests MST 21 bis MST 26 eine Reihe von Tests enthalten, die das Brandrisiko durch die Photovoltaikmodule selbst minimieren, das von elektrischen Bränden durch Überstrom, Bauteilversagen, oder von brennbaren Komponenten ausgehen könnte. Nur MST 23 (Fire Test) bezieht sich auf das Brandwiderstandsverhalten bei externer Brandursache. Da entsprechende Feuertests nicht international harmonisiert, sondern regional unterschiedlich definiert sind, wird in der IEC 61730-2:2016 (Prüfverfahren, [5]) auf einen nur informativen Anhang (Annex B) verwiesen. In Europa sind Tests analog zur CEN/TS 1187:2012 Serie [37] „Prüfung zur Beanspruchung von Bedachungen durch Feuer von außen“ möglich, wobei in Teil 1 bis 4 vier unterschiedliche Kombinationen von Brandsätzen, Wind und Strahlungswärme angewendet werden, und die Bewertung / Klassifikation nach EN 13501-5 [38] erfolgt. Sowohl den Tests mit Brandsätzen, die auf der Oberfläche abgebrannt werden, als auch den anderen Brandtests liegt stets die Annahme zugrunde, dass zu bewerten ist, wie ein Brand in der Umgebung durch das Bauteilbrandverhalten des Testobjekts propagiert wird, und ob der Brand, z.B. nach dem Durchbrennen, auf ein darunterliegendes Gebäude übergreifen kann. Hier ist stets die Annahme, dass die Brandeinwirkung von oben, außen oder von der Seite erfolgt. Eine Brandentwicklung *unter* der Bedachung (bzw. unter Photovoltaikmodulen) wird nicht untersucht, weil das darunterliegende Gebäude ja dann bereits selbst in Brand steht.

Der Fall einer Photovoltaik-Fahrbahnüberdachung mit einer Brandlast darunter wird durch diese Vorschriften nicht abgedeckt. Eine Aussage zum Brandverhalten von Modulen in diesem Fall kann also nicht aus bestehenden Testergebnissen / Zertifikaten für Module mit baulicher Zulassung abgeleitet werden. Entsprechende Tests sind, nach Aussage der IBS Linz (siehe <https://www.ibs-austria.at/services-leistungen/>) möglich, indem eine Nachbildung eines Teils der Überdachung (Tragkonstruktion, Montagesystem, Photovoltaikmodule) in einem Tunnelofen mit einer Brandlast entsprechend der Vorgaben (siehe dazu Kapitel 2.3, Abbildung 24) getestet werden kann.

4 KONZEPT FÜR DIE TRAGKONSTRUKTION

4.1 Allgemeine und festgelegte Geometrie und Materialien

ALLGEMEINES

Das Konzept sieht einen modularen Aufbau vor, welcher aus selbsttragenden und gegründeten Tragwerkselementen von jeweils 10,0 m Länge besteht, und dann baukastenartig aneinander zu einer Systemlänge von bis zu $L = 80,00$ m angeordnet werden kann. Damit ist gewährleistet, dass jedes Tragwerkselement für sich selbst alle Lasten aufnehmen kann und auch im Extremfall ein Systemversagen der gesamten Überdachung vermieden werden kann. Durch die modulare Ausführung kann die Überdachung flexibel auf die Straßengeometrie (Querneigung, Kurven, Übergangsbogen und Nivellette) angepasst werden. Auch mögliche Zwangskräfte aus Differenzverformung (Setzungen bzw. Temperaturverformungen...) sollten damit sehr geringgehalten und kein weiteres Problem darstellen. Die Fuge zwischen den Tragwerkselementen ist seitens der Eindeckung/PV-Module durch Verblechung gesondert zu lösen.

Umfassende Analysen zum Design und Ausbildung wurden durchgeführt und im Wesentlichen wurden 2 Grunddesigns in Querrichtung gefunden: Satteldachform und Pultdachform (Dachneigung 5°). Diese werden je nach Orientierung der Autobahn in Bezug zum Sonnenhöchststand angeordnet. Zur Abschätzung von Dimensionen der Tragkonstruktionen und in weitere Folge Massenermittlung für die Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde ein Tragwerkselement für den möglichen künftigen Standort (T+R Hegau, Deutschland) dimensioniert.

GEOMETRIE, MATERIALIEN

Das Konzept der Tragkonstruktion wird als Ständerkonstruktion in Stahl ausgebildet. Ein Tragwerkselement besteht aus zwei über die Straße überspannenden Rahmen (Stützen/Riegeln), welche auf Stahlbetonfundamente mit Anfahrsocket gelenkig aufgelagert sind. In Längsrichtung (parallel zur Straßenachse) ist die Tragwerkselementlänge 10,0 m, wobei der Stützenabstand 6,0 m beträgt und die Pfetten seitlich auskragen (siehe Abbildung 45 und Abbildung 46). Längsseitig ist zwischen den beiden Stützen ein Querverband angeordnet. Als Materialien wird in der Konzeptphase Baustahl in der Klasse S235JR angenommen, welcher grundsätzlich mit einem konventionellen Korrosionsschutz versehen ist. Stahlkonstruktionen sind gemäß EN ISO 1461 feuerverzinkt auszuführen. Bei

erhöhten Schutzanforderungen kann die Stahlkonstruktion mit einem Duplexsystem gemäß RVS 15.05.11 in Österreich und in Deutschland nach ZTV-ING Teil 4 ausgeführt werden. Betreffend Brandschutz wäre optional noch ein Brandschutzanstrich für eine Widerstandsklasse R 30 anzudenken (Details siehe dazu folgendes Kapitel 4.3.1). Wird die Tragkonstruktionen mittels Schrauben-Stöße bzw. Eckverbindungen geteilt, werden diese ZTV-ING Teil 9 – Abschnitt 1 bzw. EN1090-2 ausgeführt. Die Fundamente sind aus Stahlbeton, in der Regel flach gegründet. Die Skizzen des Entwurfes findet man in Abbildung 44 bis Abbildung 47.

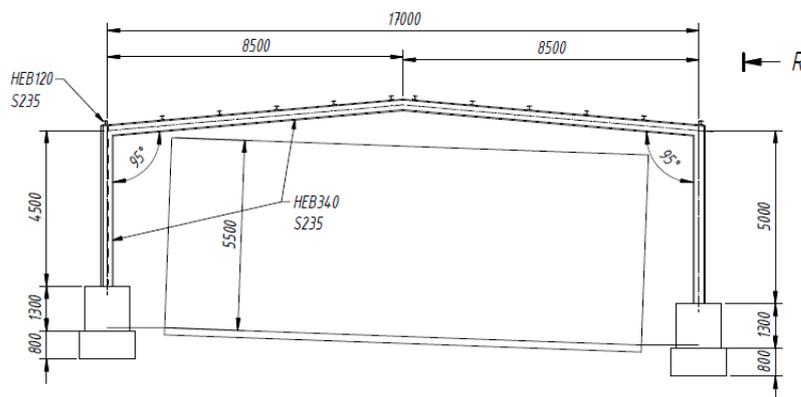


Abbildung 44: Entwurfsquerschnitt Satteldach

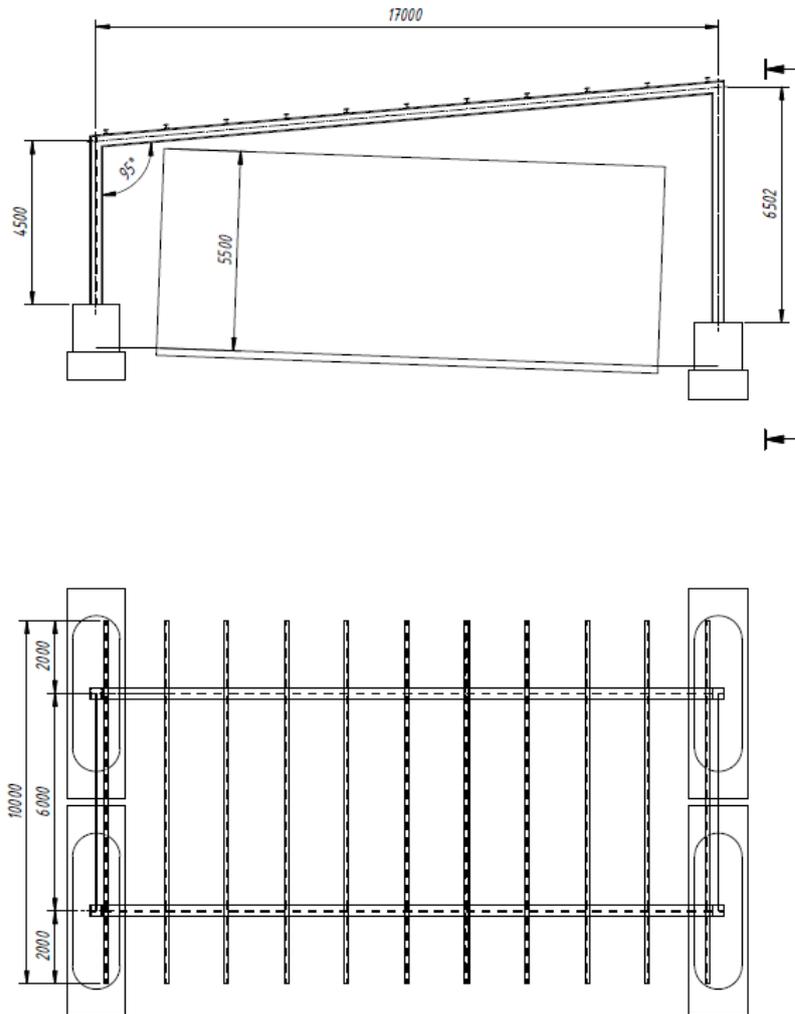


Abbildung 45: Entwurfsquerschnitt Pultdach (oben) Variante eines Tragwerkselements (unten).

Wie in Abbildung 45 bzw. Abbildung 44 ersichtlich ist hier ein ausreichender Abstand zum Lichtraumprofil (Breite 12,50 m: 2 Fahrstreifen + Pannen- bzw. Seitenstreifen) eingehalten.

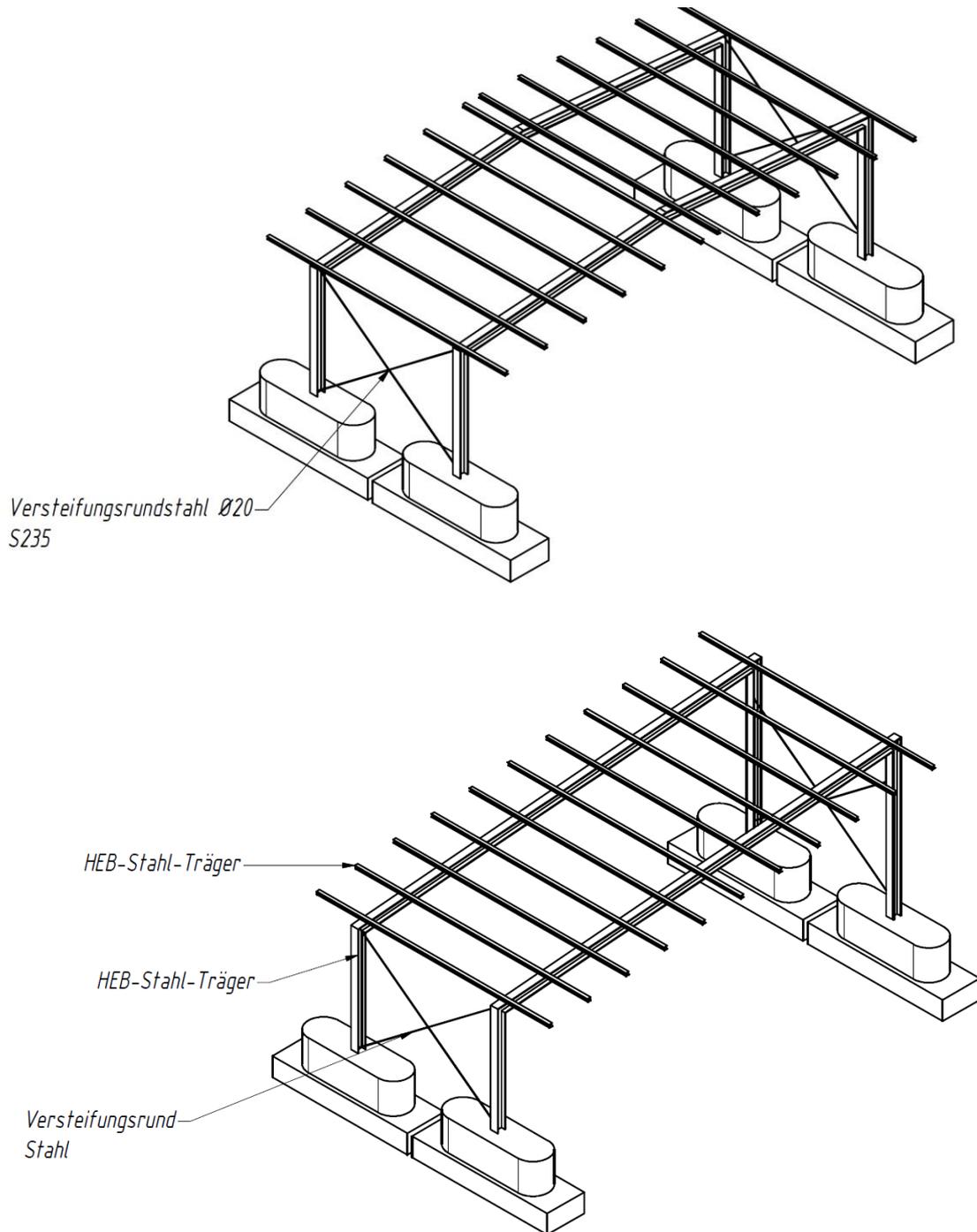


Abbildung 46: 3-D Darstellung der beiden unterschiedlichen Tragwerkselemente und seitlichen Versteifung und Flachfundierung.

Die einzelnen Tragwerkselemente werden bis zu einer Länge von 80 m aneinandergereiht (siehe Abbildung 47).

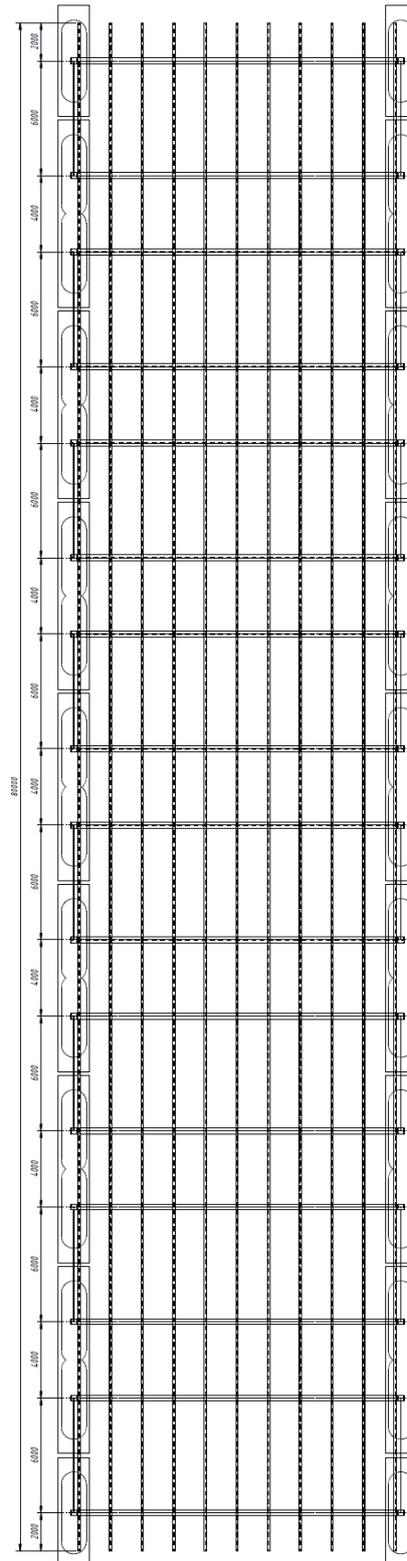


Abbildung 47: Schematische Aneinanderreihung bei gerader Straßenführung

4.2 Statisch konstruktive Grundausslegung

Folgenden Lastannahmen wurden zur Dimensionierung des Konzeptentwurfs angenommen:

- Eigengewicht:
 - PV- Module + Unterkonstruktion 50 kg/m² (6 mm Glasstärke + Zuschlag für Module etc. und Unterkonstruktion, Annahme sichere Seite) → 0,5 kN/m²
- Schneelast: ist nach EC 1991-3 standortspezifisch festzulegen: gewählt Standort Demonstrator-Hegau → 0,94 kN/m²
- Windlast: ist nach EC 1991-4 standortspezifisch festzulegen:
gewählt: Standort Demonstrator-(LK-Konstanz) q_b → 0,77 kN/m²
Beiwerte für freistehender Dachform (in Vorbemessung Satteldach 5°)
Reibungskraft Wind parallel: 20,82 kN
- Druck-Sog-Verkehrseinwirkung in Anlehnung an Regelung für Zugverbeifahrt (EN 1991-1-2,
- Abbildung 18): $V = 120$ km/h: $q_2 = 0,25$ kN/m²
- Anpralllast: wie bereits erläutert wäre grundsätzlich nach EC 1991-1-7 zu anzusetzen, wie im Kapitel 2 Grundlagen Pflichtenheft dargestellt wird die konzipierte Tragkonstruktion mit Lastansätzen der ZTV-ING bemessen. Die Vordimensionierung im Zuge des Konzeptentwurfs erfolgt mit → 100 kN in einer Höhe von 1,25 m über OK Fahrbahn.
- Temperatur +/- 50 K
- Materialien: Stahl S235JR.

Eine statisch konstruktive Vordimensionierung nach Eurocode EN 1990 (Standicherheit) als Grenzzustand der Tragsicherheit und Grundkombination und außergewöhnlicher Lastfall Anprall sowie Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit Verformungsbegrenzung ($L/200$) wurde durchgeführt. Der Lastfall Brand wird im Folgenden Kapitel Sonderlasten 4.3.1 im Detail untersucht. Detaillierte Lastaufstellung und Berechnungsdetails sind im Anhang beigelegt. Folgend werden die wichtigsten Ergebnisse und Eingabedaten aufgelistet. Die Vordimensionierung wurde für die Satteldachvariante durchgeführt. Das

Pulldach ist sehr ähnlich. Daraus ergeben sich für Rahmen HEB 340 Profile und für die Pfetten HEB 120.

3D Übersicht Querschnitte - Gesamtgewicht 12to

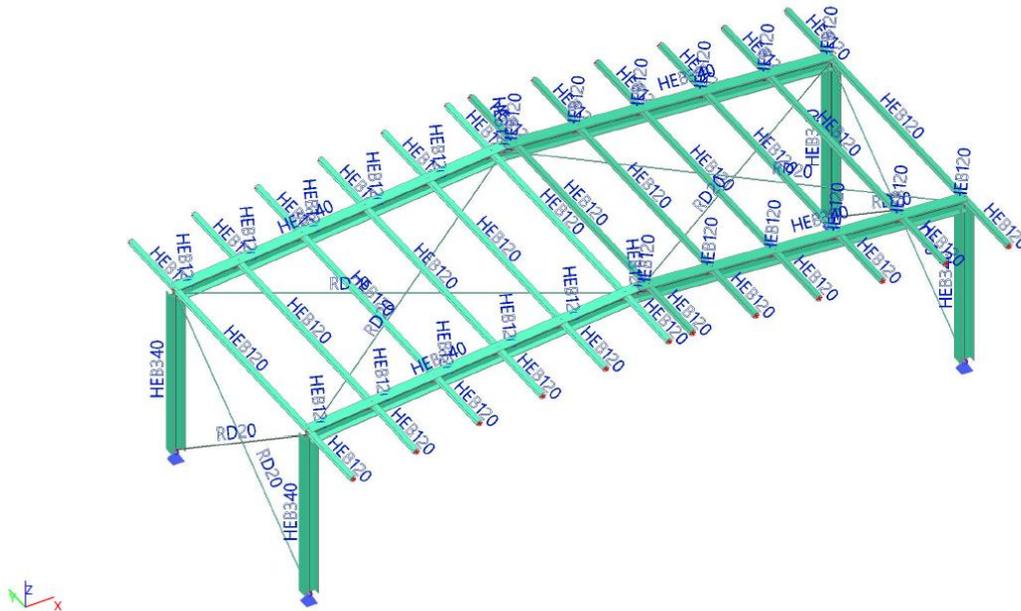


Abbildung 48: Statische Modell und Hauptdimensionen und System eines 10 m Tragwerkselements.

3D Verformung - U_{total} im GZG-char.

Werte: U_{total}
Lineare Analyse
Kombination: GZG - char.
(automatisch)
Auswahl: Alle
Position: Mittelwerte in Knoten -
teilbezogen. System: LKS-Netzelement

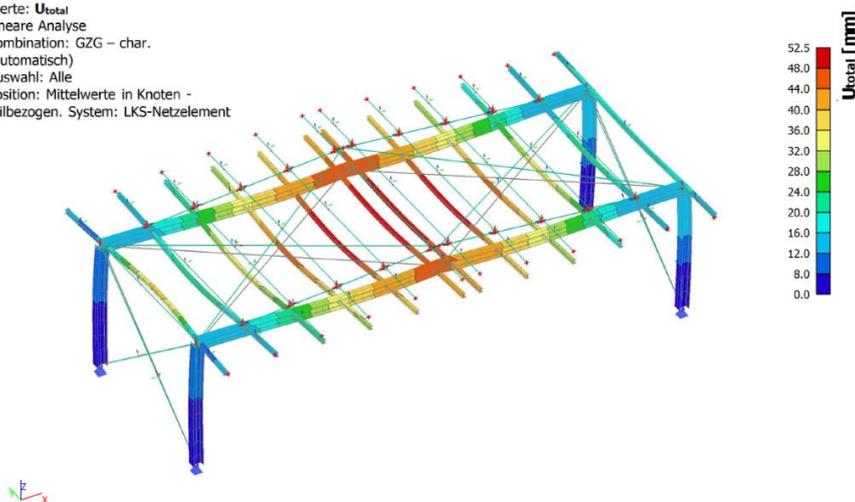


Abbildung 49: Systemverformung Riegel/Pfetten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

EC-EN 1993 Stahlnachweis im GZT

Werte: **UC_{Overall}**
Lineare Analyse
Kombination: GZT – Gruppe B
(automatisch)
Koordinatensystem: Hauptsystem
Extremwerte 1D: Bauteil
Auswahl: Alle

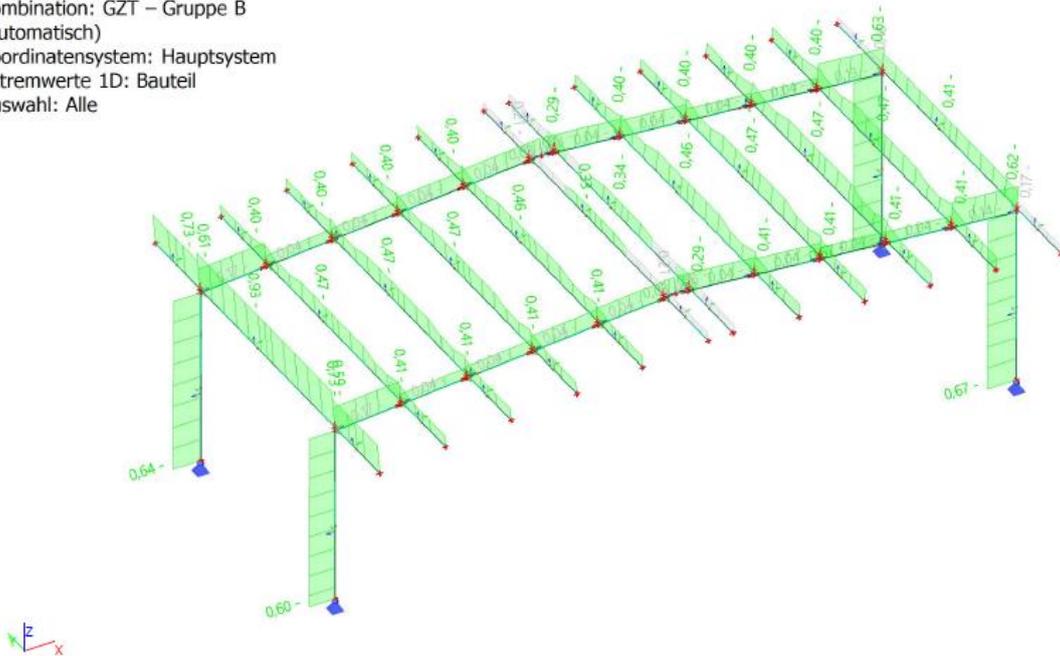


Abbildung 50: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Stahlquerschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit - ULS.

EC-EN 1993 Stahlnachweis im GZT-Anprall

Werte: **UC_{Overall}**
Lineare Analyse
Kombination: GZT-Anprall
Koordinatensystem: Hauptsystem
Extremwerte 1D: Bauteil
Auswahl: Alle

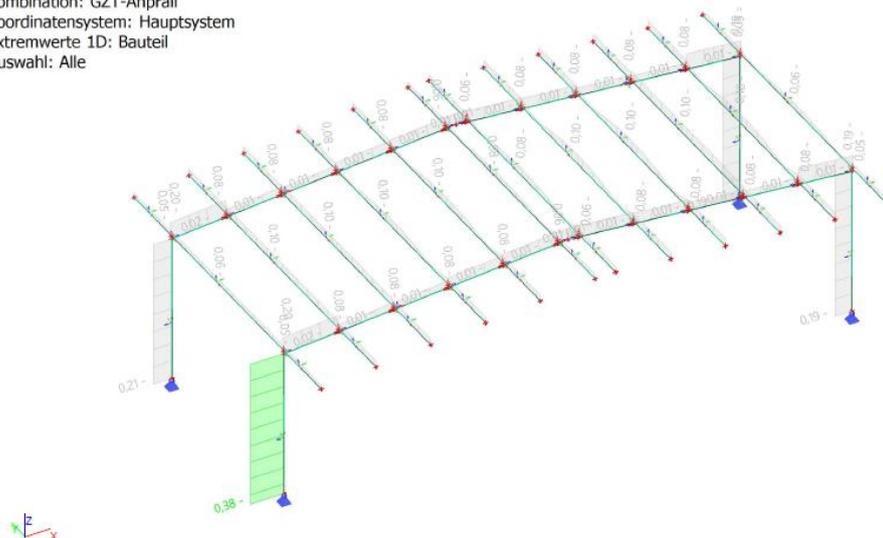


Abbildung 51: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Stahlquerschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit - Außergewöhnlicher Lastfall Anprall.

Wie in Abbildung 50 und Abbildung 51 erkennbar, ist in erster Linie das Verformungskriterium von $L/200$ relevant, wobei auch hier das Limit (z.B. Verformung = 85 mm bei 17 m Spannweite) noch nicht voll ausgenutzt wurde, und noch ein gewisses Optimierungspotenzial gegeben ist. Dieses wird in der Folgebemessungen bei Detailanalysen durchgeführt werden. Die Verbindungen wurden nicht weiter untersucht.

4.3 Sonderlasten einer Autobahn-PV- Überdachung

4.3.1 Detaillierte Untersuchung zu Anforderungen betreffend Brandschutz

In den Grundlagen zu Brandschutzanforderungen wurden eingangs im Kapitel 2.3 Fragen zum Brandrisiko und möglichen Brandszenarien und deren Auswirkungen auf die Tragkonstruktion gestellt, welche im folgenden Abschnitt nochmals detaillierter beantwortet werden.

4.3.1.1 Häufigkeit von Brandereignissen auf Autobahnen

Zur Beantwortung der Häufigkeit der Brandereignisse wurden übermittelte Daten der ASFINAG statistisch ausgewertet und mit dem BMK- Bericht über Brände und Unfälle in Tunnelanlagen abgeglichen. Auf österreichischen Autobahnen wurden laut Angaben der ASFINAG im Zeitraum von 2011 bis 2019 1133 Brände registriert. Davon ereigneten sich 1062 Brände im Freiland und 71 in Tunnels. Demnach verteilten sich die Ereignisse auf 799 PKW-, 303 LKW- und 31 Bus-Brände. Das österreichische Autobahn- und Schnellstraßennetz hat eine Gesamtlänge von 2185 km. Davon entfallen 1719 km auf Autobahnen und 466 km auf Schnellstraßen, somit folgt eine gesamte Richtungsfahrbahnlänge von 4370 km. Damit wurde die Brandwahrscheinlichkeit bzw- die Wiederkehrperiode (= Zeitraum in dem ein gewisses Ereigniss eintritt oder überschritten wird) bezogen auf einen Kilometer abgeleitet (Tabelle 6).

Tabelle 6: Brandwahrscheinlichkeit bzw. Wiederkehrperiode im österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz für verschiedene Fahrzeugklassen

Fahrzeug- klasse	Anzahl an Bränden	Netz (A+S)		pro km Richtungsfahrbahn		
		Brandwahr- scheinlichkeit pro Tag	1 Brand pro x Tage	Brandwahr- scheinlichkeit pro Tag	Brandwahr- scheinlichkeit pro Jahr	1 Brand pro x Jahre
PKW	799	0.24	4.1	5.6E-05	2.0E-02	49.2
LKW	303	0.09	10.8	2.1E-05	7.7E-03	129.8
BUS	31	0.01	106.0	2.2E-06	7.9E-04	1269.1
Gesamt	1133	0.34	2.9	7.9E-05	2.9E-02	34.7

Nach Rücksprache treten diese Brände zufällig verteilt im Netz auf. Diese Daten beinhalten nur Aussagen betreffend Ereigniseintritt es gibt keine Angaben betreffend der Folgen oder Brandlast.

Verglichen mit den von [22] ausgewerteten Anprallereignissen wird deutlich, dass Brandereignisse im Vergleich zu Anprall klar häufiger auftreten:

Anprall jährliche Auftrittereignisse bezogen auf 1 km Richtungsfahrbahn:

freie Strecke $P(\text{pro km}) = 8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$ Knoten: $P(\text{pro km}) = 1,7 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$

mit Todesfolge $P(\text{pro km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

Brand jährliche Auftrittereignisse bezogen auf 1 km Richtungsfahrbahn.

PKW: $P(\text{pro km}) = 2,0 \times 10^{-2} / \text{Jahr}$

LKW: $P(\text{pro km}) = 7,7 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$

LKW+Bus: $P(\text{pro km}) = 8,5 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$

In der hier aufgeführten Statistik sind Brände aller Brandlasten enthalten, welche gemeldet wurden (einfache Kabelbrände bis hin zu großen Ereignissen). Um in die Statistik aufgenommen zu werden, musste vereinfacht definiert beim Brand zumindest eine „Flamme sichtbar“ sein. Sie müssen auch nicht zwingend in die Ereignisdatenbank der Tunnelwarte aufgenommen worden sein. Im Zuge dieser Auswertung war die tatsächliche Brandlast sowie Unfallfolge nicht bekannt. Zur Orientierung können allerdings die Werte nach PIARC (Abbildung 22) herangezogen werden.

Umgelegt auf die Länge eines Systemabschnittes einer Überdachung ergeben sich wesentlich reduzierte Wahrscheinlichkeiten (Tabelle 7).

Tabelle 7: Brandwahrscheinlichkeit bzw. Wiederkehrperiode unter 80 m Überdachungsabschnitten für verschiedene Fahrzeugklassen

Fahrzeug- klasse	Anzahl an Bränden	pro 80m Überdachungsabschnitt der RFB			pro 80m Überdachungs- abschnitt der RFB in 25 Jahren Nutzungsdauer	
		Brandwahr- scheinlichkeit pro Tag	Brandwahr- scheinlichkeit pro Jahr	1 Brand pro x Jahre	Brandwahr- scheinlichkeit in der LZ	1 Brand pro x Bauwerke in der LZ
PKW	799	4.5E-06	1.6E-03	615.5	4.1E-02	24.6
LKW	303	1.7E-06	6.2E-04	1623.0	1.5E-02	64.9
BUS	31	1.7E-07	6.3E-05	15863.7	1.6E-03	634.5
Gesamt	1133	6.3E-06	2.3E-03	434.0	5.8E-02	17.4

Brand jährliche Auftretensereignisse bezogen auf ein Überdachungsbauwerk

PKW $P(\text{pro } 80 \text{ m z.B. Bauwerk}) = 1,6 \times 10^{-3} \text{ Jahr}$

LKW: $P(\text{pro } 80 \text{ m z.B. Bauwerk}) = 6,2 \times 10^{-4} \text{ Jahr}$

LKW+Bus: $P(\text{pro } 80 \text{ m. z.B. Bauwerk}) = 6,8 \times 10^{-4} \text{ Jahr}$

Um hier weitergehende Zuverlässigkeitsanalysen auch im Hinblick auf Szenarien nach EN 1990 genauer zu definieren wären Daten zu Unfallfolgen wichtig auszuwerten. Anhaltspunkte für das „zu akzeptierte Risiko“ kann die sogenannte Groningen Kurve [34][35] in Abbildung 52 geben. Der Zusammenhang zwischen der akzeptierten Wahrscheinlichkeit für mehr als n Todesopfer pro Jahr in Abhängigkeit von der akzeptierten Anzahl von Todesopfern ist wird beispielsweise in [34] beschrieben.

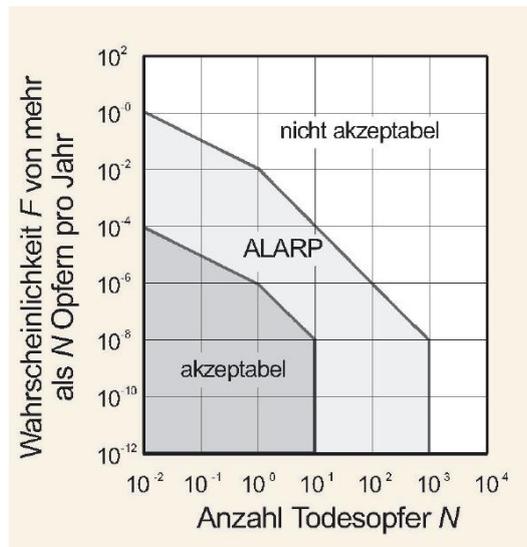


Abbildung 52: Beispiel einer Nachweiskurve (Gronigen Kurve 1978). [34]

Die Groningen-Kurve zeigt: Je höher die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden oder ein Versagen eines Bauteils mit Todesfolge ist, desto geringer ist die Anzahl der Todesopfer, die im Allgemeinen als „akzeptabel“ angesehen wird. Grundsätzlich muss an dieser Stelle betont werden, dass aus ethischer Sicht keine Todesopfer durch Bauwerksversagen akzeptabel sind, allerdings gibt es keine absolute Sicherheit, sodass nur das Risiko und die Wahrscheinlichkeit reduziert werden können. Wird ein Risiko von weniger als 10^{-6} erreicht, überwiegt in der Regel das individuelle Sterberisiko. Ein Risiko unterhalb dieses Werts kann in Normen oder Gesetzen unberücksichtigt bleiben und als akzeptables Lebensrisiko betrachtet werden [34] [35].

4.3.1.2 Brandverlaufs Szenarien - CFD Brand Simulation

Zur besseren Beurteilung möglicher Brandszenarien wurde eine CFD-Brandsimulation für eine Autobahnüberdachung durchgeführt. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden vom Drittleister und Tunnelbrandexperten Balda Engineering & Consulting erarbeitet. Details dazu sind ergänzend noch im Anhang ersichtlich.

Ziel war eine Abschätzung zur Bestimmung der Bauteiltemperaturen sowie die Bewertung der Rauchausbreitung sowie die aufgenommene Schadstoffmenge der Personen (FED⁸) im Zuge eines Brandereignisses. Dazu wurden dreidimensionale Simulationen

⁸ FED: Die aufgenommene Schadstoffmenge der Personen wird durch FED (fractional effective dose) nach Purser [36] quantifiziert. Dieser Wert beschreibt kumulativ die aufgenommene Schadstoffmenge einer Person, auch Intoxikation genannt. Die erforderlichen Schadstoffdaten stammen aus der 3D-FDS Simulation. Analog zu den Schadstoffen wird auch die Wärmebelastung der Personen durch Konvektion und Strahlung, ebenfalls aus gleicher Quelle, ermittelt und über die Zeit akkumuliert. Sobald ein FED-Wert, thermisch oder toxisch, von 1 überschritten ist, wird diese Person als fluchtunfähig gewertet.

durchgeführt. Die komplexen Strömungssimulationen basieren auf Navier-Stokes-Gleichungen. Das sind gekoppelte inhomogene Differentialgleichungen auf den Prinzipien der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung. Bei dem verwendeten CFD-Modell handelt es sich um den Fire Dynamics Simulator (FDS), welcher für die Simulation von Bränden und insbesondere für die Simulation von Rauchausbreitungen entwickelt wurde. FDS wird durch das NIST (National Institute of Standards and Technology) sowie international Mitarbeitenden herausgegeben. Bei FDS handelt es sich um eine anerkannte und validierte Standardsoftware für die Berechnung von Tunnelbränden. Zur Anwendung gelangte die Version 6.7.1.

Simulationsrandbedingungen

Die gewählten Annahmen basieren auf Normen, Richtlinien und Erfahrungen und wurden möglichst realitätsnah getroffen. Dennoch verbleiben bei Strömungssimulationen immer Unsicherheiten und Unschärfen in den Ergebnissen. Aufgrund des hohen Berechnungsaufwandes und Komplexität des Problems konnten nur ausgewählte Szenarien untersucht werden.

Für die Simulation der Brandfälle wurden folgende Randbedingungen angewandt:

- Initialtemperatur 12 °C, Initialdruck 1013 hPa
- Kein Windeinfluss
- Brandquelle 5 MW bzw. 30 MW
- Grundlegende Bauwerksgeometrie und Materialeigenschaften der Konstruktion
- Rechengitter 50 x 25 x 25 cm
- Seitlich Anordnung einer Lärmschutzwand im Abstand von 1,0 m
- Glasmodule zerbersten nicht, es ist damit ein konservativer Ansatz betreffend entweichen der Brandenergie.

Es wurden 2 Lastfälle untersucht:

- **Lastfall PKW Brand 5 MW Brandlast**
- **Lastfall LKW-Brand 30 MW Brandlast**

Auf der Basis der Dauer von 15 bis 20 Minuten für eine eventuelle Selbstrettungsphase der Beteiligten Personen im Ereignisfall wurde die Simulationsdauer mit 33 Minuten gewählt. Diese setzt sich aus einer Vorlaufzeit und einer angenommenen Dauer der

Selbstrettungsphase zusammen. Die Vorlaufzeit aufgrund instationärer Strömungseffekte (Verwirbelungen, ungleichmäßiges Strömungsprofil, usw.) zu Beginn der Simulation war nicht erforderlich, da keine meteorologischen Randbedingungen (wie Strömung durch Wind) berücksichtigt wurden. Dies wurde unter der Annahme gewählt, dass eine Strömung die Rauchgase verdünnen und somit die Temperatureinwirkung auf die Bauteile verringern würde.

Brandquelle

Die Positionierung der Brandquelle wurde in etwa auf der ersten Fahrspur gewählt. Die Brandquelle wurde mit einer Fläche von 2 m x 7 m (Breite x Länge) bei 30 MW und 2 m x 6 m (Breite x Länge) bei 5 MW definiert und in Segmente unterteilt.

Entsprechend der Dimensionierungsbrände wurde die Brandleistung mit 5 MW bzw. 30 MW gewählt. Ebenso wurde der Brandwirkungsgrad in Übereinstimmung mit der RVS 09.02.31 [39] mit 0,75 angenommen. Um der zeitlichen Entwicklung eines Brandes Rechnung zu tragen, wurde die Wärme ebenso mit einem zeitlichen Verlauf freigesetzt. Dafür wurde die Simulation zum Zeitpunkt 0 s gestartet sowie auch das Brandereignis zum Zeitpunkt 0. Der zeitliche Verlauf der Brandentwicklung entspricht dabei einem linearen Anstieg bis zur maximalen Brandleistung. Die vorgegebene Brandrampe wurde über eine Zeitdauer von 300 s gewählt, das heißt, dass zum Zeitpunkt die volle Brandleistung von 5 MW bzw. 30 MW erreicht ist und im weiteren zeitlichen Verlauf konstant bleibt. Als Brandmedium wurde N-Octan mit einem spezifischen Heizwert von 40000 kJ/kg verwendet. Durch die vorgegebene Wärmefreisetzungsrate (HRR) von 5 MW bzw. 30 MW wird die Abbrandrate des Brennstoffes berechnet. Die Freisetzungsraten entsprechen der RVS 09.03.11 [40]. Die Brandorte wurden in Nähe der Stahlkonstruktion positioniert.

Randbedingungen Konstruktion

Die Trägerkonstruktion wurde aus Stahl angenommen, wobei dem Umstand Rechnung getragen wurde, dass die Träger als Formrohre ausgeführt sind. Die Deckplatte (Dach) der Konstruktion wurde als Glas definiert. Die angrenzende Lärmschutzwand- ungünstiger Fall zur Begrenzung im Abstand von 1,00 m und 4,0 m Höhe, wurde als Holz gewählt. Die Materialeigenschaften wurden gemäß Definition berücksichtigt.

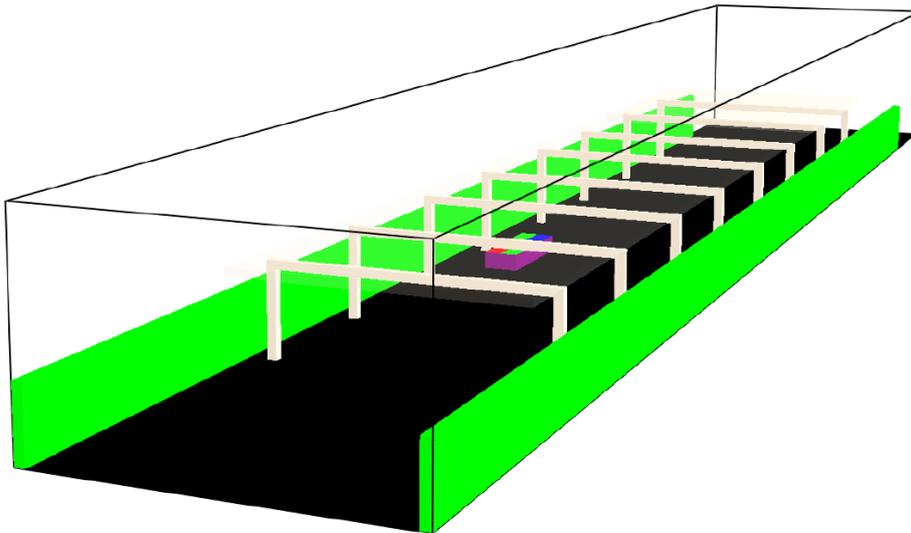


Abbildung 53: Vereinfachte Konstruktion in Simulationsumgebung und seitlicher Begrenzung einer vertikalen Lärmschutzwand (grün) mit $h = 4,0\text{m}$.

Rechengitter

In FDS können ausschließlich geradlinige Rechengitter angewandt werden. Das verwendete Rechengitter ist daher rechteckig und wird in ebenso quaderförmige Rechenzellen unterteilt. Je nach Anwendungsfall wird eine bestimmte Zellgröße und damit auch die Auflösung des Rechengitters ausgewählt. Kleine Zellgrößen ergeben eine feinere Auflösung und eine hohe Zellenzahl. Die Zellenanzahl hat wiederum einen direkten Einfluss auf die Rechenzeit. Je größer die Zellenanzahl desto größer der Rechenaufwand. Für die vorliegenden Simulationen wurde eine Zellengröße von $0.5\text{ m} \times 0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ (Länge in Überdachungslängsachse x Breite x Höhe) ausgewählt.

Die Zellgröße hat einen erheblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse, somit muss eine Zellgröße gefunden werden, die einen Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit schafft. In den vorliegenden Simulationen wurde die Zellgröße aufgrund von Erfahrungswerten gewählt. Grundsätzlich sollte eine Netzunabhängigkeitsanalyse durchgeführt werden oder die Simulation anhand von Versuchen validiert werden.

Ergebnisse des 30 MW Brandes im Zeitlichen Verlauf:

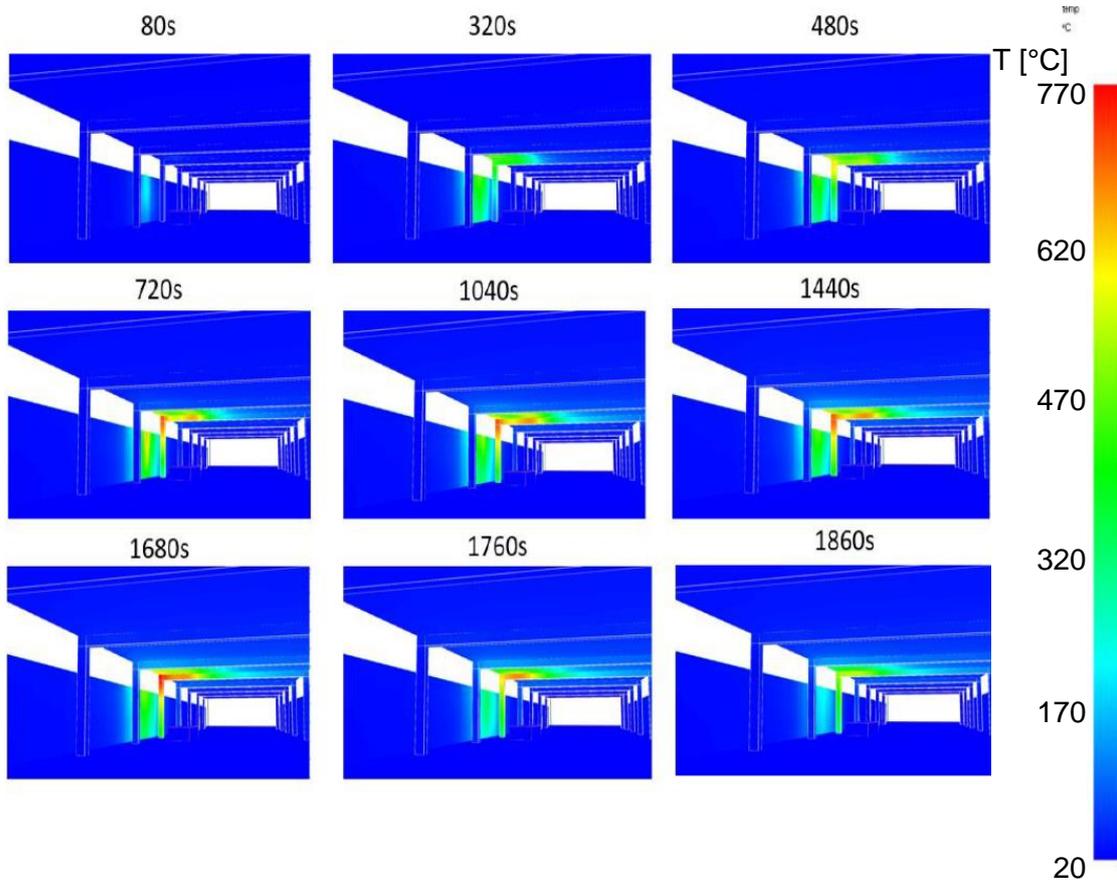


Abbildung 54: Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Zeit des 30 MW Brandes.

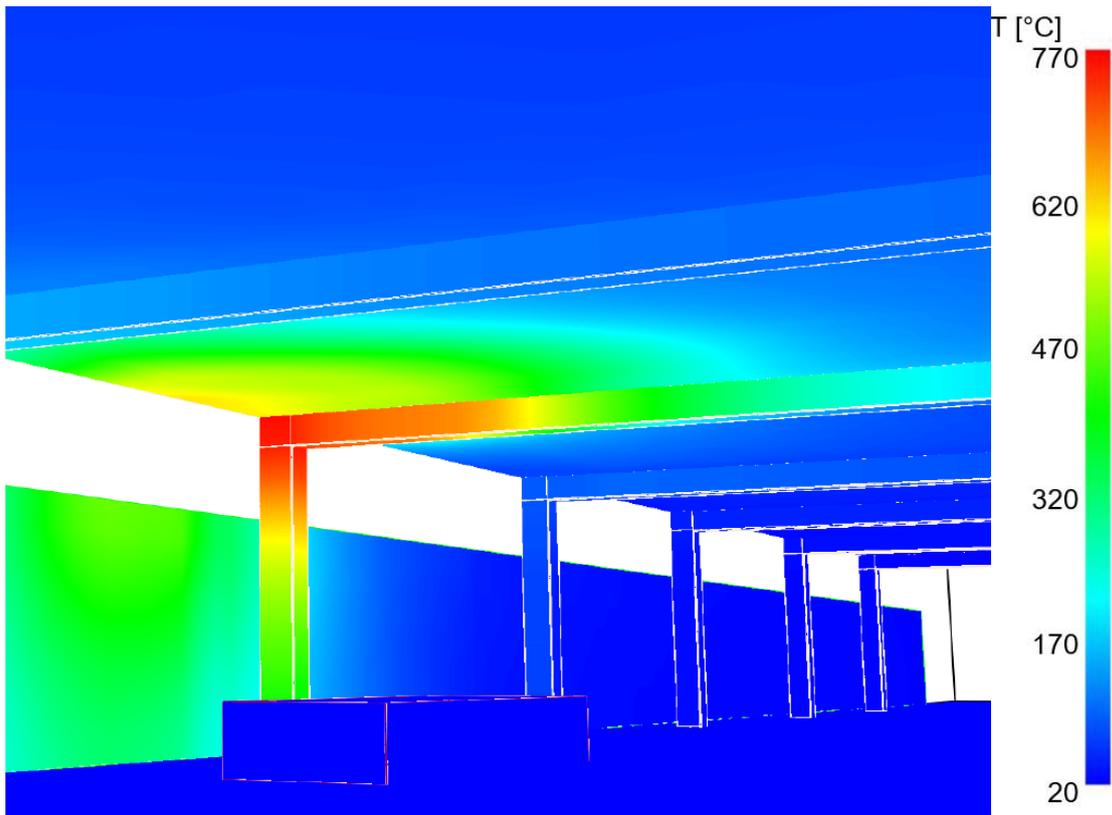


Abbildung 55: Lokale maximale Temperatur des 30 MW Brandes.

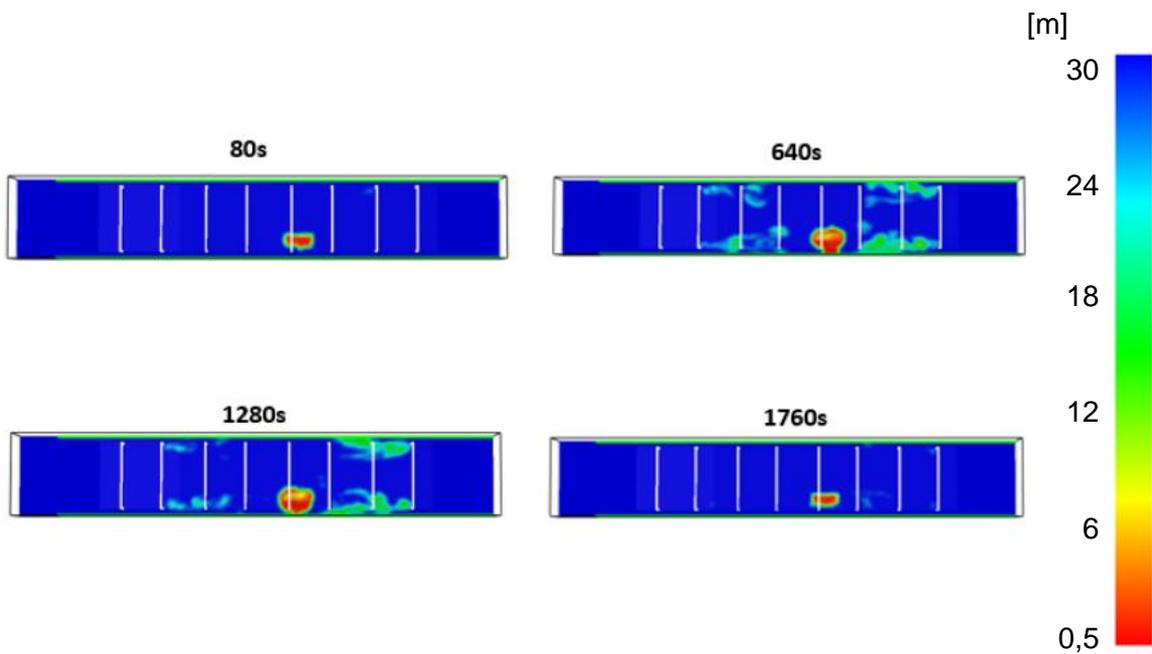


Abbildung 56: Sichtweite bedingt durch Rauch 1,6 m über Grund des 30 MW Brandes

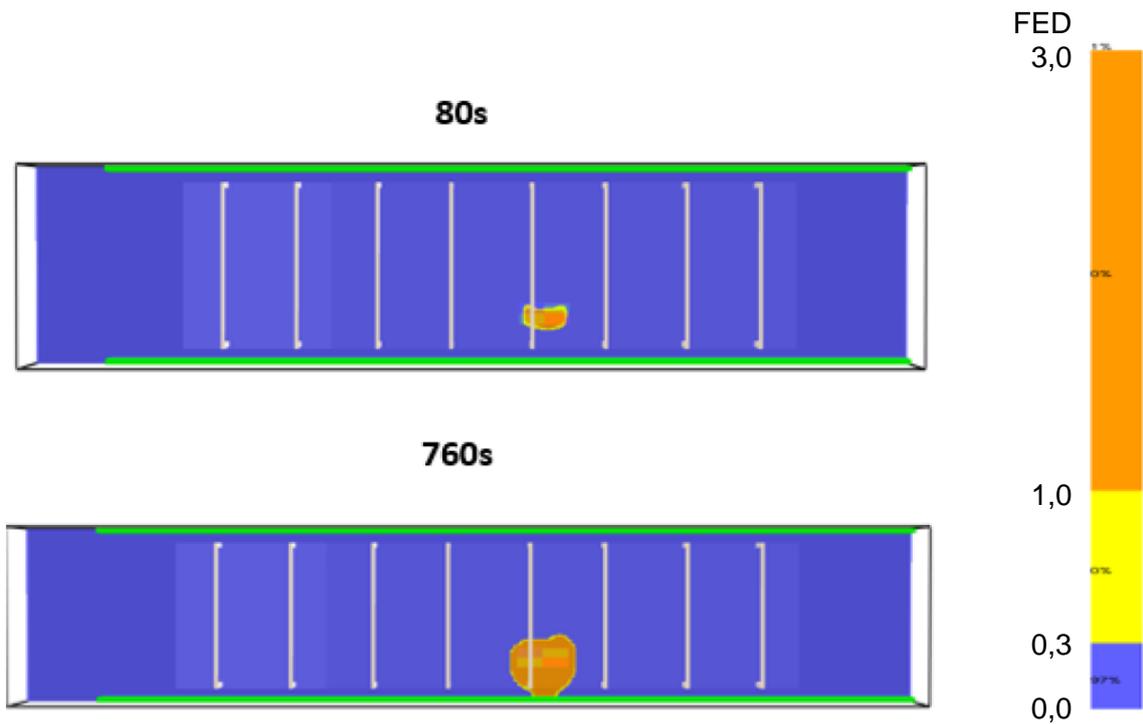


Abbildung 57: FED 1,6 m über Grund in Abhängigkeit der Zeit des 30 MW Brandes.

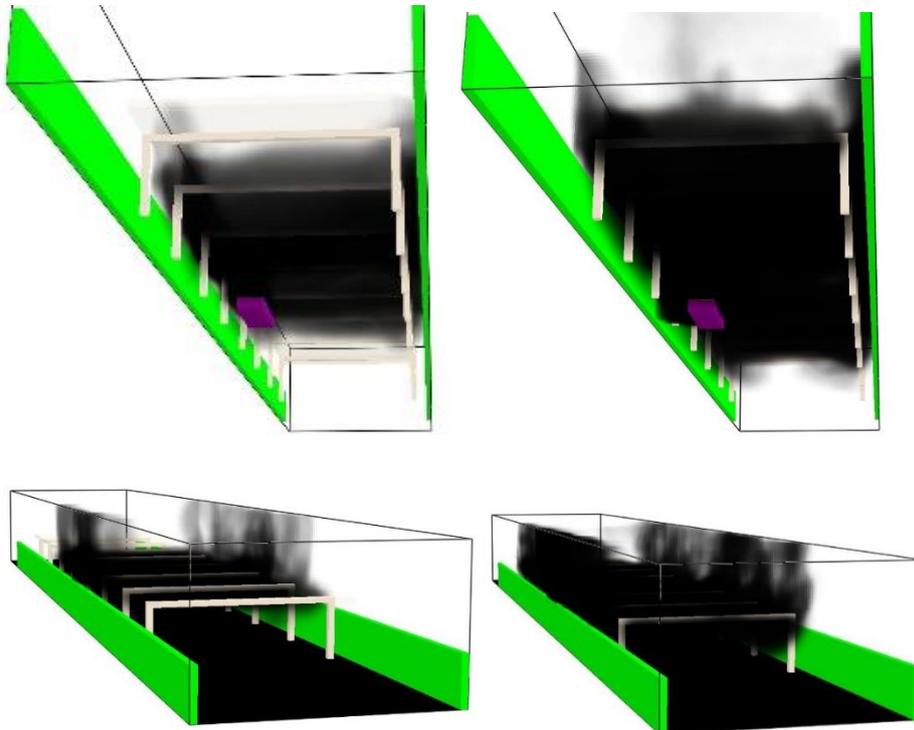


Abbildung 58: 3D Darstellung des Brandrauches nach 80 s (links) und nach 760 s (rechts) des 30 MW Brandes

Ergebnisse des 5 MW Brandes

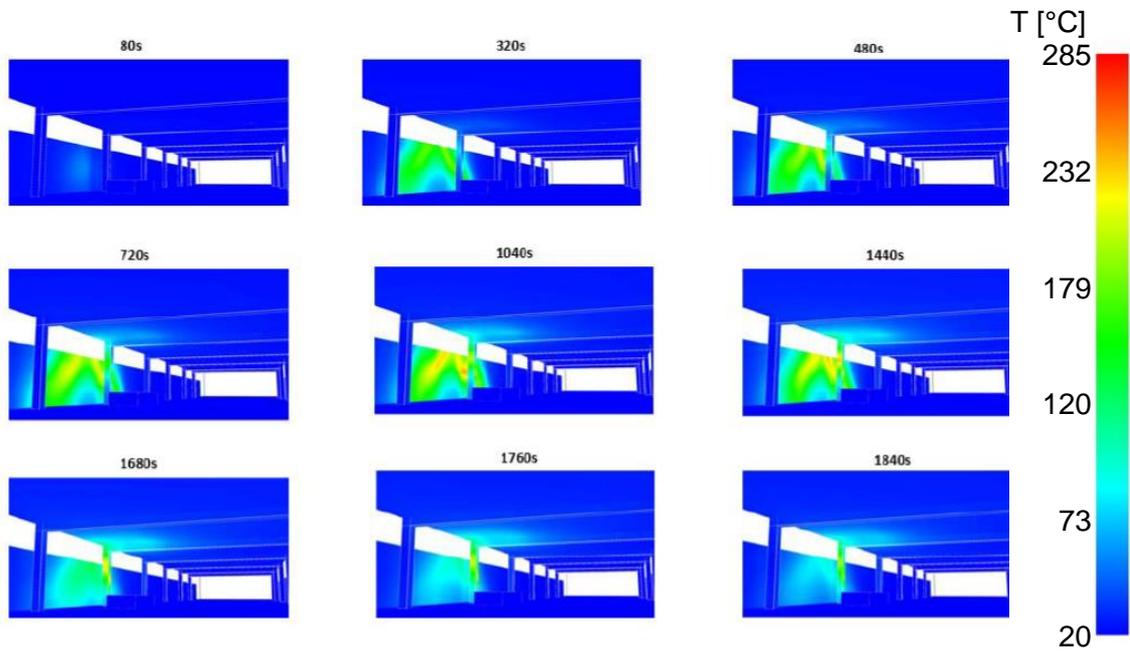


Abbildung 59: Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Zeit des 5 MW Brandes.

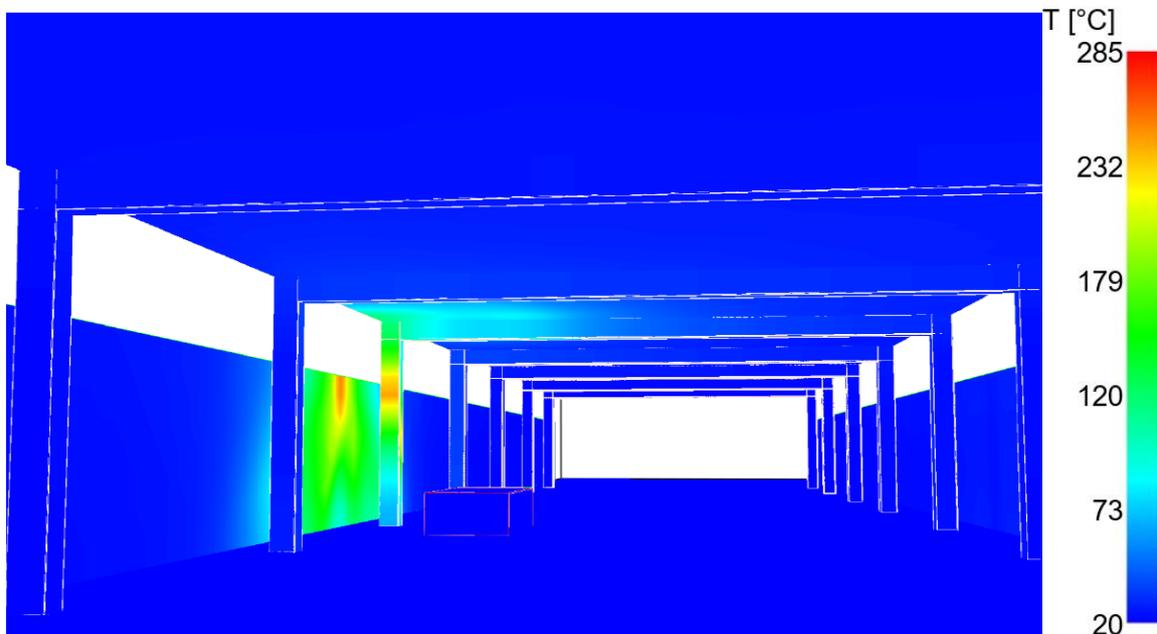


Abbildung 60: Lokale maximale Temperatur des 5 MW Brandes.

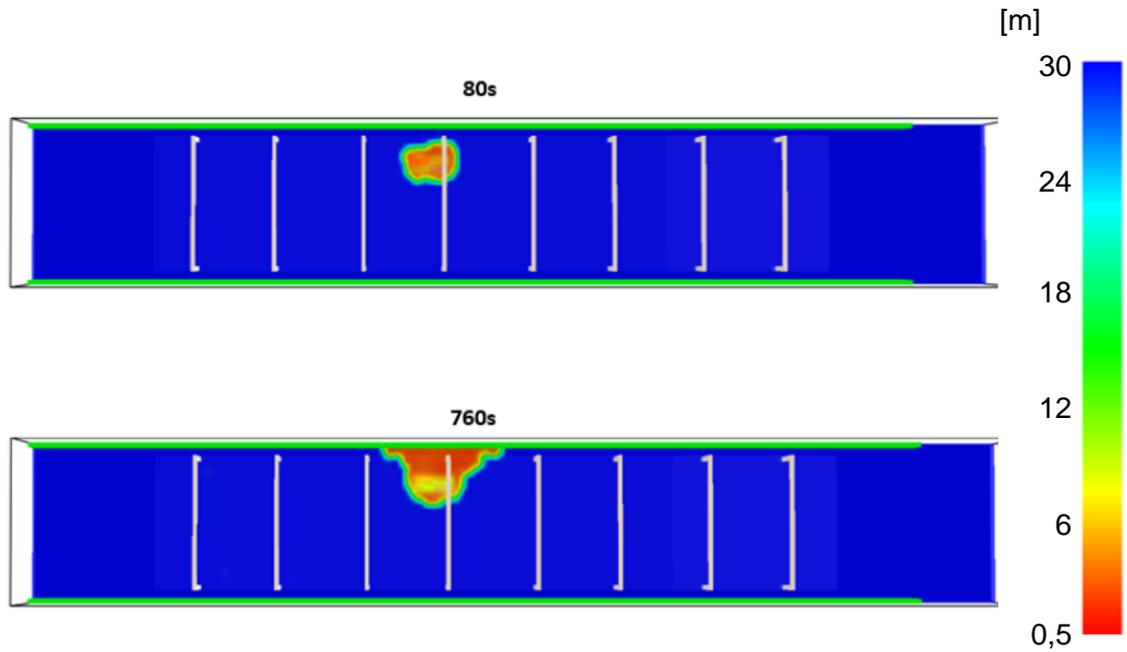


Abbildung 61: Sichtweite bedingt durch Rauch 1,6 m über Grund des 5MW Brandes

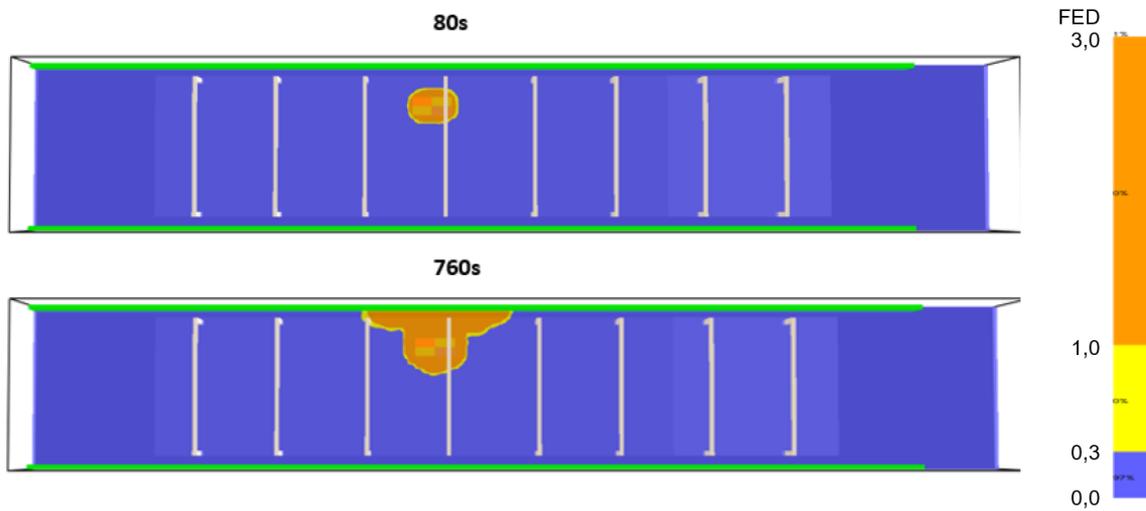


Abbildung 62: FED 1,6 m über Grund in Abhängigkeit der Zeit des 5 MW Brandes.

4.3.1.3 Brandschutzmaßnahmen

Das Ergebnis der CFD-Analyse zeigt, dass die Bauteiltemperaturen der tragenden Stahlbauteile bei einem 5 MW Brand 280°C nicht überschreiten. Das Simulationsergebnis des 30 MW Brands zeigt, dass die Bauteiltemperaturen der Stahlstützen und Träger hier in einem Zeitraum von 13 min auf ca. 780°-800°C ansteigen, und dann konstant bleiben und auch ab 15 Minuten jene der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nicht überschreiten, sondern knapp darunterbleiben (Abbildung 63).

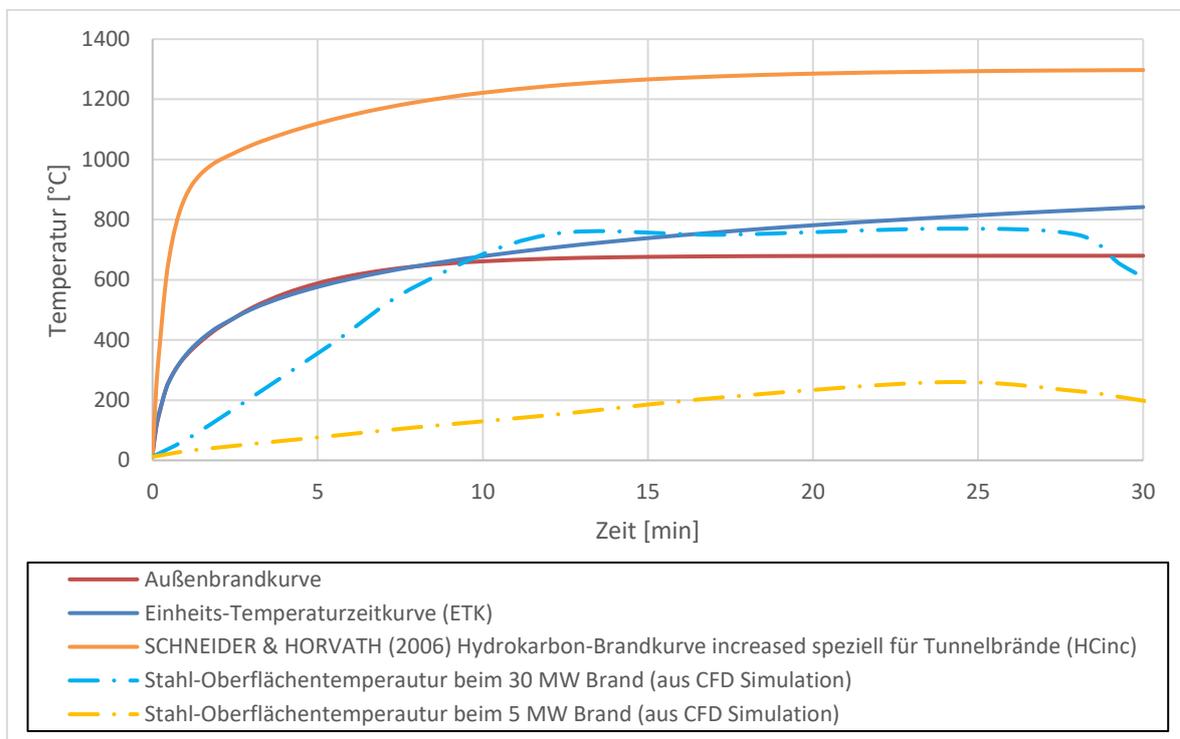


Abbildung 63: Brandkurven im Vergleich mit den maximalen Stahltemperaturen der CFD-Analyse

Temperaturbedingte Abminderungsfaktoren für Festigkeit und Proportionalitätsgrenze sowie E-Modul sind in der EN 1993-1-2 geregelt (siehe Tabelle 8).

- Bis 400°C sind keine Abminderungsfaktoren einzurechnen. Damit wäre ein 5 MW-Brand mit prognostizierten Temperaturen von 280°C aufnehmbar und es wäre geringe bleibenden Verformungszunahmen möglich. Beim 30 MW Brand wäre dieser Bereich nach 6 min erreicht.

- Bei 500°C ist mit einer Abnahmefaktor von 0,78 auf die Festigkeit einzurechnen.
- Bei 700 °C ist mit einer Abnahmefaktor von 0,23 auf die Festigkeit einzurechnen
- Bei 780°C ist die Resttragfähigkeit nur mehr 0,13.

So ein Szenario würde nach statistischer Auswertung der vorliegenden österreichischen Autobahndaten von LKW und Bus Bränden gemeinsam nach Kapitel 4.3.1.1 zusammen $6,8 \times 10^{-4}$ mal jährlich bezogen auf 80 m Autobahnlänge (z.B. ein Überdachungsbauwerk) auftreten. Dies beinhaltet noch keine Aussagen zur Zuverlässigkeit des Bauwerks oder zur Schwere der Brände. Es ist jedenfalls davon auszugehen, dass Personenschäden noch viel seltener aufgetreten.

Die in der Vordimensionierung abgeschätzte Ausnutzung der Stahlquerschnitte unter Eigengewichtsbelastung (ohne Schnee und Wind) beträgt ca. 20 % welche bei einer Temperaturbelastung von maximal ca. 700°C gerade noch aufnehmbar wäre. Diese würde nach Abbildung 63 nach ca. 10 min erreicht sein.

Tabelle 8: Abminderungsfaktoren für die Spannungs-Dehnungsbeziehung von Kohlenstoffstahl unter erhöhter Temperatur nach EN 1993-1-2.(2012).

Stahl- temperatur θ_a	Abminderungsfaktoren bei Temperatur θ_a relativ zu dem Wert f_y oder E_a bei 20 °C		
	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die effektive Fließgrenze $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die Proportionalitätsgrenze $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu E_a) für die Steigung im elastischen Bereich $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000

ANMERKUNG Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

4.3.1.4 Brandschutzanstrich

Optional kann die feuerverzinkte Stahl-Tragkonstruktion mit einem Brandschutzanstrich beschichtet werden. Brandschutzverkleidungen wurden gemeinsam im Konsortium mit AG-Vertretern diskutiert aber als betrieblich im Einsatz der Autobahn (Inspektionen, Schmutz, etc.) nicht weiterverfolgt.

Der Anstrich kann mittels Airless-Verfahren auf die Stahlkonstruktion aufgesprüht werden. Die Schichtstärken der Beschichtung sind für die Brandschutzklasse entscheidend. Je nach Anforderung bzw. Standort wird ein individueller Beschichtungsaufbau berechnet. Aus dem

Simulationsergebnis geht hervor das bei den getroffenen Annahmen (seitliche Lärmschutzwand, keine Hitzeöffnung durch Glasbruch) die Klasse R 30 ausreichen würde.

4.3.1.5 Zusammenfassung Brandbemessung

Seitens der Auftraggeber ist zu klären, ob das akzeptierte Risiko eines Weglassens des Brandschutzes in Kauf genommen werden kann. Dazu wurden seitens des Konsortiums folgende Entscheidungsgrundlagen aufbereitet:

Die häufiger auftretenden PKW-Brände würden ohne Brandschutzmaßnahme voraussichtlich nach CFD-Simulation die Tragsicherheit der Stahlkonstruktion nicht gefährden.

LKW- und Bus-Brände treten deutlich seltener als PKW-Brände auf. Bezogen auf die Überdachungslänge eines Bauwerks tritt das, nach derzeitiger Datenlage der ASFINAG, mit einer jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit von $P(\text{pro Bauwerk und Jahr}) = 7,2 \times 10^{-4}$ ein. Dies beinhaltet aber alle Brandereignisse, es gibt keine Daten zu Personenschäden oder Brandausmaß.

Das Konstruktionsprinzip wurde so gewählt das immer 10 m Tragwerkselement für sich selbsttragend sind, ein Systemversagen bei dem 80 m einstürzen, wäre demnach nicht gegeben. Gemäß CFD-Simulation tritt die Temperaturerhöhung sehr lokal auf, hohe Temperaturen werden nur auf wenige Meter Länge erreicht.

In der Simulation wurde ein 30 MW Brand als Untersuchungslastfall gewählt. Hier wäre ohne Brandschutz nach 6 min ein Temperaturbereich (Bauteiltemperatur 400°C) erreicht, bei dem die Stahlfestigkeit abnehmen würde. Bei Ausnutzung der Resttragfähigkeit im außergewöhnlichen Lastfall könnte dieser Zeitraum noch um wenige Minuten zur „Selbstrettung“ verlängert werden. Nach 10 min würden etwa 700°C erreicht werden, die Restfestigkeit des Stahls beträgt dabei 23%. Eine abgeschätzte Ausnutzung nur unter Eigengewichtslasten wäre in ähnlicher Größenordnung, das Gebäude würde damit gerade noch stehen bleiben, aber große bleibende Verformungen auftreten. Verbindungsmittel und Stöße wurden nicht weiter untersucht.

Zu beachten ist auch, dass die Glastemperatur der Module ähnlich hohe Temperaturen erreichen, und könnten – da Sicherheitsglas - zerbersten und Hitzeöffnungen freigeben, womit die Brandenergie entweichen könnte und die Temperaturbelastung der Tragkonstruktion sinkt. Dieser Aspekt sollte in die Entscheidung berücksichtigt werden und

vielleicht zukünftig gesondert wie schon in im Kapitel 3.8 durch Versuche abgedeckt werden. Brandversuche für horizontale Module liegen derzeit noch nicht vor.

Brandschutz kann durch Verkleidung, Anstrich oder durch eine detaillierte Dimensionierung als außergewöhnlicher Lastfall (nur Eigengewicht ohne Schnee und Windlasten) durchgeführt werden, was Mehrkosten (Stahlmassen bzw. Anstrich) mit sich bringt.

Aus der Simulation geht hervor, dass für einen Anstrich die Widerstandsklasse R30 für einen 30MW Brand reichen würde, dieser Ansatz wurde als Option noch weiterverfolgt und entsprechend ausgewiesen.

Die Brandrauchentwicklung (siehe Anhang) wäre laut CFD-Analyse auch bei einer seitlichen Lärmschutzwand nicht bedenklich. Die CFD-Simulation sollte aber in weiterer Folge auch noch durch einen Vorortversuch verifiziert werden.

4.3.2 Ermüdungsbeanspruchung PV-Modul

4.3.2.1 Bestimmung der aerodynamischen Einwirkung aus realen Tunnelmessungen-

Zu Bestimmung der aerodynamischen Lasten, welche auf die einzelnen Module und die Tragstruktur einwirken können wurde eine Messung im realen Tunnel durchgeführt. Da hier eine geschlossene Situation, ganz anders als bei einer Überdachung, vorliegt, handelt es sich hier um eine konservative Annahme. Langzeitmessungen wurden mit Differentialdrucksensoren im Tauerntunnel Fahrtrichtung Villach durchgeführt und ausgewertet. Da der Tunnel einen im Gegensatz zur gegenständlichen Tragstruktur rundum geschlossenen Querschnitt von großer Längsausdehnung darstellt wird die im Tunnel auftretende aerodynamische Belastung aus Drücken bei LKW-Passage als höher angesehen als an der zu projektierenden Tragstruktur.

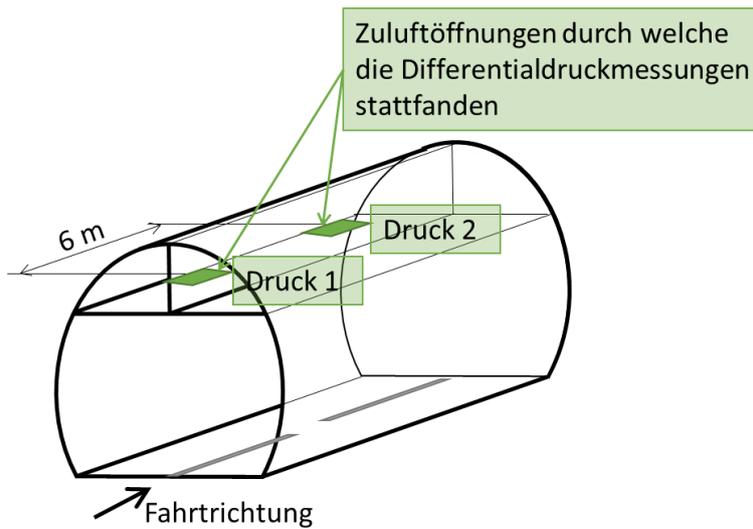


Abbildung 64: Schematische Darstellung des Differentialdruckmonitorings in der Tunnelröhre Fahrtrichtung Villach des Tauerntunnels

Gemessen wurde mit 2 Differentialdrucksensoren (Druck 1 und Druck 2), welche in einem Abstand von 6 m in Fahrtrichtung montiert wurden und den Differentialdruck zwischen Tunnelinnenraum und dem darüberliegenden Lüftungsschacht messen, siehe Abbildung 65. Die Abtastrate lag bei 1000 Hz. Für die Auswertung wurden die gemessenen Daten zuerst aufbereitet. Abbildung 65 zeigt die Datenaufbereitung beispielsweise an einem Ausschnitt für den Sensor Druck 1. In einem ersten Schritt wurde der Offset des gemessenen Signals (Druck 1 – Original) mit einem laufenden Mittelwert über eine Fensterbreite von 10 000 Messwerten korrigiert. Dieses Signal (Druck 1 – Offset) wurde anschließend mit einem laufenden Mittelwert über eine Fensterbreite von 100 Messwerten geglättet (Druck 1 – filt.) Dieses gefilterte Signal wurde dann für die weitere Auswertung herangezogen.

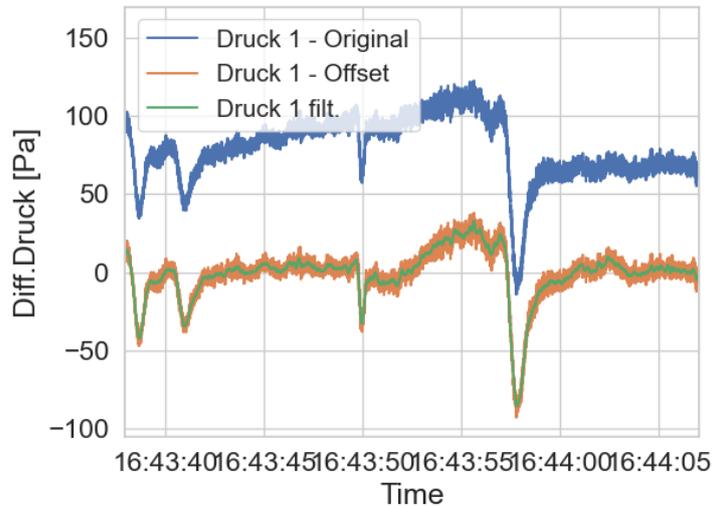


Abbildung 65: Aufbereitung der Messwerte am Beispiel von Sensor Druck 1

In Abbildung 66 sind die derart aufbereiteten Messdaten der beiden Sensoren Druck 1 und Druck 2 abgebildet. Die zeitliche Differenz zwischen dem Druckwechsel von Druck- auf Sogbelastung der beiden Sensoren wird zur Ermittlung der Geschwindigkeit des Fahrzeuges unter Verwendung des bekannten Abstandes der beiden Sensoren herangezogen. Die Ereignisse werden für die gegenständliche Auswertung vereinfacht mit dem Maximaldruck (Bugwelle, vor Vorbeifahrt) welcher schlagartig in eine Sogbelastung (bei Vorbeifahrt) mit einem Minimaldruck umschlägt beschrieben. Aus diesen beiden das Ereignis darstellenden Werten kann auch die Druckdifferenz zwischen Maximaldruck und Minimaldruck ermittelt werden, welche ein Maß für die ermüdungsrelevante Spannungsschwingbreite ist. Für diese Ermittlung werden die aufbereiteten Messwerte des Sensors Druck 1 verwendet.

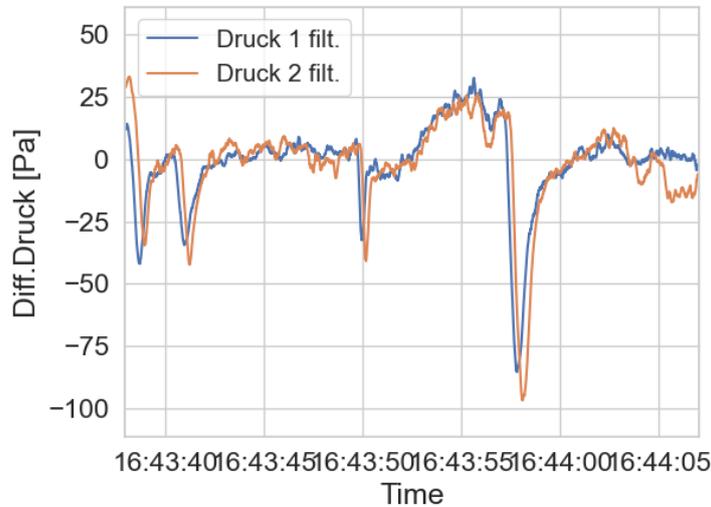


Abbildung 66: Aufbereitete Messwerte für die Sensoren Druck 1 und Druck 2

Zur Identifizierung der Ereignisse einer LKW Vorbeifahrt wurde festgelegt, alle Ereignisse zu betrachten, bei denen der Sog einen Wert von -25 Pa unterschreitet. In Abbildung 67 sind die identifizierten Ereignisse über einen Zeitraum von 15 Minuten dargestellt.

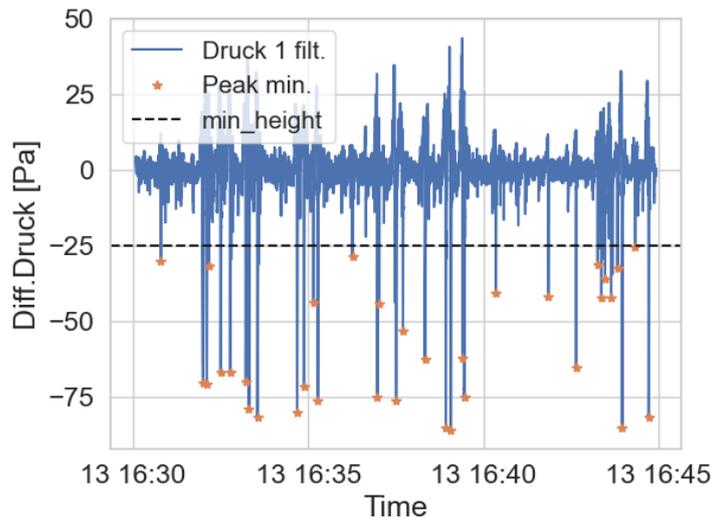


Abbildung 67: Beispiel der identifizierten Ereignisse über einen Zeitbereich von 15 Minuten

Für die Identifizierung der Peaks und der Maximal- und Minimalwerte wurde eine Fensterbreite von 2500 Messwerten (entspricht 2,5 Sekunden) festgelegt, um mehrfaches

Erkennen einzelner Peaks zu vermeiden. Allerdings können hier sehr naheliegende Ereignisse nicht mehr automatisiert unterschieden werden, wie beispielsweise bei den beiden linken Peaks in Abbildung 68. Auch für die Identifizierung der Maximal- und Minimalwerte wurden jeweils die Maximal und Minimalwerte über eine Fensterbreite von 2500 Messwerten ermittelt und daraus der Differenzwert $\text{Diff.} = \text{Max.} - \text{Min.}$ gebildet. Die Werte an der Position des ermittelten Peaks (mit einem * im Diagramm gekennzeichnet) wurden dann automatisch ermittelt für die weitere Verwendung abgespeichert.

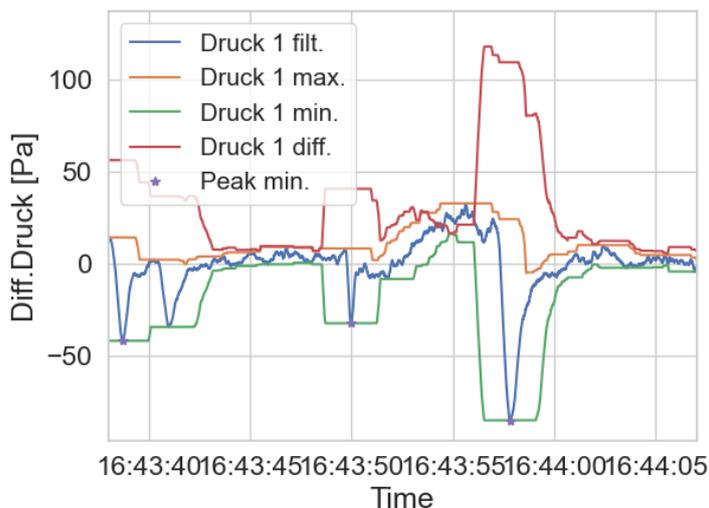


Abbildung 68: Aufbereitete Messwerte Sensor Druck 1: Ermittlung der Maximal-, Minimal- und Differenzwerte

Die automatische Auswertung über alle Messwerte liefert Ergebnisse über insgesamt 29536 Ereignisse. Es wird hier darauf hingewiesen, dass sehr nahe zusammenliegende Ereignisse mit dieser Methode nicht separat erfasst werden können.

Für die Auswertung wird der 95% Quantilwert des Differenzwertes als maßgebende Größe betrachtet. Hierfür wurde für alle ermittelten Maximalwerte der 97,5 % Quantilwert ($\text{Max}_{97,5\%} = 40,5 \text{ Pa}$) und für die ermittelten Minimalwerte der 2,5 % Quantilwert ($\text{Min}_{2,5\%} = -128,0 \text{ Pa}$) ermittelt. Der als charakteristisch angesehene Differenzwert wird entsprechend Gl. 1 mit $\text{Diff}_{95\%} = 168,5 \text{ Pa}$ festgelegt. Die Druckwerte von $\text{Max}_{97,5\%}$ und $\text{Min}_{2,5\%}$ können als Zielwerte für Ermüdungsversuche angesehen werden.

$$\text{Diff}_{95\%} = \text{Max}_{97,5\%} - \text{Min}_{2,5\%} = 40,5 - (-128,0) = 168,5 \text{ Pa} \quad \text{Gl. 1}$$

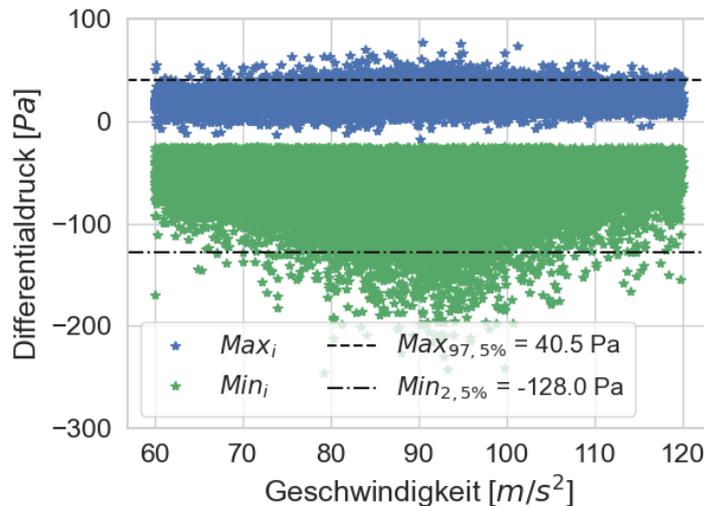


Abbildung 69: Ermittelte Maximal- und Minimalwerte inklusive Quantilwerten

4.3.2.2 Ermüdungsversuche an einem PV-Modul

Standardisierte mechanische Tests an Photovoltaikmodulen:

Die üblichen mechanischen Belastungstests von Photovoltaikmodulen im Rahmen der Bauartzulassung nach der IEC 61215 Serie, MQT 16 in IEC 61215-2:2016, dienen zum Nachweis der ausreichenden Widerstandsfähigkeit gegen Wind- (Druck- und Sog) und Schneelasten (Druck), wobei statische Lasten für jeweils 1 h aufgebracht werden. Siehe dazu auch Kapitel 2.2 und 3.1. Ein optionaler Test zur dynamischen mechanischen Belastung nach IEC TS 62782:2016 wird üblicherweise für 1000 Zyklen mit Drücken von ± 1 kPa durchgeführt, wobei 3 bis 7 Zyklen pro Minute (0.05 bis 0.12 Hz) ausgeführt werden. Der dynamische Belastungstest wurde nun in die 2. Edition der IEC 61215 Serie (veröffentlicht am 9.2.2021) als MQT 20 integriert. Die Testdruck- und Sogbeanspruchung wird mit einer Anordnung von Saugnäpfen realisiert, während beim optionalen Test zu asymmetrischer Schneelast auf Steildächern, IEC 62938:2020, auf Rollen gelagerte Gewichte eine statische Testlast für 24 h aufbringen. Optionale Schwingungsbelastungstests gibt es an Transportverpackungseinheiten (Modulpalletten) nach der IEC 62759-1:2015, die auf einem Rütteltisch ausgeführt werden.

Tests bei dynamischer Schwingungsanregung

Die Verhältnisse bei dynamischer Schwingungsanregung wie sie bei Tunneldurchfahrten gemessen wurden (s. Kap. 4.3.2.1) unterscheiden sich erheblich von den mechanischen

Tests (MQT 16 und MQT 20). Wenn z.B. 5 000 LKWs pro Tag an 250 Tagen im Jahr an 5 Tagen/Woche den Abschnitt passieren, bedeutet das, dass pro Jahr 1,25 Mio. solcher Lasten, bzw. 10 Mio. in je 8 Betriebsjahren auftreten. Ein dynamischer Belastungstest nach MQT 20 würde dafür bei 0.12 Hz mehr als zweieinhalb Jahre dauern.

Bei LKW-Passage im Tunnel wurden Schwingbreiten bis zu 160 Pa bei einer Grundfrequenz von ca. 1 Hz gemessen, siehe Kapitel 4.3.2.1 und Abbildung 70.

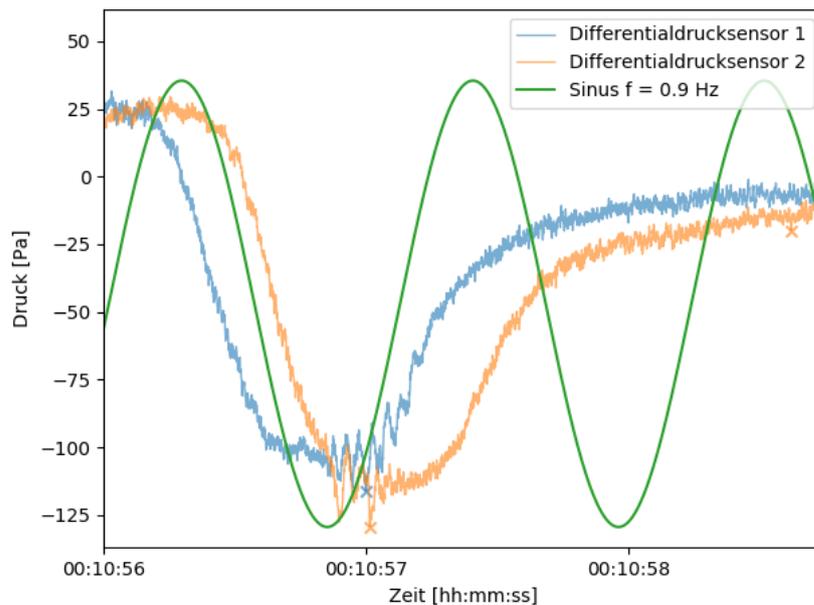


Abbildung 70: Beispiel eines gemessenen Druck-Sog-Wechsels im Vergleich zu einem Sinus ähnlicher Amplitude mit einer Frequenz von 0,9 Hz

Eine sinusförmige Anregung entsprechender Frequenz und Amplitude stellt daher eine gute Approximation der realen Belastungsverhältnisse dar. Es wurde ein elektromagnetischer Aktuator zur Anregung eingesetzt. Die Abbildung 71 gibt die Versuchsanordnung schematisch wieder.

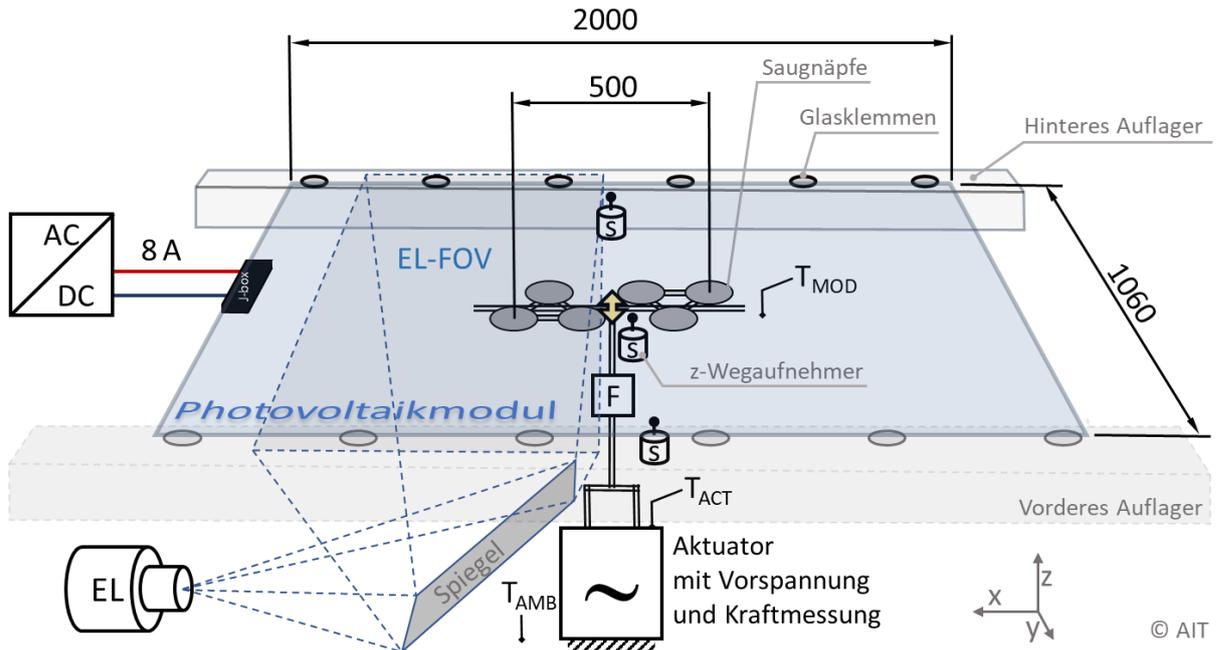


Abbildung 71: Versuchsaufbau zu Ermüdungstests am PV-Modul mit zentraler Schwingungsanregung

Dabei wurde ein großes, rahmenloses Glas/Glas PV-Modul, das mit 72 Zellen und vom Aufbau typisch für große Fassaden- oder Dachelemente ist und durch Verbundsicherheitsglas-Aufbau auch überkopftauglich ist, mit der Frontseite nach unten (sunny-side down) fixiert. Eine große Zahl von Befestigungspunkten (je 6 im konstruktiven Glasbau übliche Aluprofil-Klemmen mit Gummiauflage) ergibt praktisch eine zweiseitig linienförmige Lagerung.

Die Anregung erfolgte durch einem unterhalb des Moduls angeordneten elektrodynamischen Aktuator mit sinusförmiger Erregung. Eine vertikale Stange am beweglichen Teil des Aktuators wurde über eine Kraftmessdose mit einer Anordnung von sechs Saugnapfen verbunden, die am Modul festgesaugt sind. Da die oben beschriebenen Tunnel-Messergebnisse eine länger dauernden Sog als Druck ergaben (s. Abbildung 70), erfolgt die Anregung nicht symmetrisch um die Ruhelage, sondern mit einer nach oben (z-Richtung) gerichteten Vorspannung von 70 N, was bei der gewählten Lage des Moduls einem Sog auf der Modulrückseite entspricht.

Um die mechanische Modulschwingung zu erfassen wurden neben dem Anregungspunkt in der Modulmitte und in der Mitte beider Modullängsseiten Wegaufnehmer angeordnet, um

auch eine Verformung der beiden Holme auf denen das Modul befestigt wurde sowie ein eventuelles Lockern der Modulklemmung detektieren zu können.

Einerseits wäre beim Schwingungstest ein Versagen des Glases möglich, wobei das Einkapselungsmaterial und die eingebettete Struktur von Photovoltaikzellen und metallischen Zellverbindern auch noch nach Glasbruch eine Resttragfähigkeit aufweist. Andererseits könnte auch ein Ermüdungsbruch der Zellverbinder oder der Zellen selbst erfolgen, was eine Verringerung der Modulleistung zur Folge hätte, ohne dass zunächst sichtbare Schäden auftreten würden. Um die elektrischen Eigenschaften auch während des Schwingungstests erfassen zu können, wurde ein (forward-bias) Dunkelstrom von 8 Ampere eingepreßt und die dadurch emittierte Elektrolumineszenzstrahlung im nahen Infrarotbereich periodisch mit einer Kamera erfasst. Sowohl Zellverbinder- als auch Zellbrüche stellen sich dann als dunkle Bereiche dar.

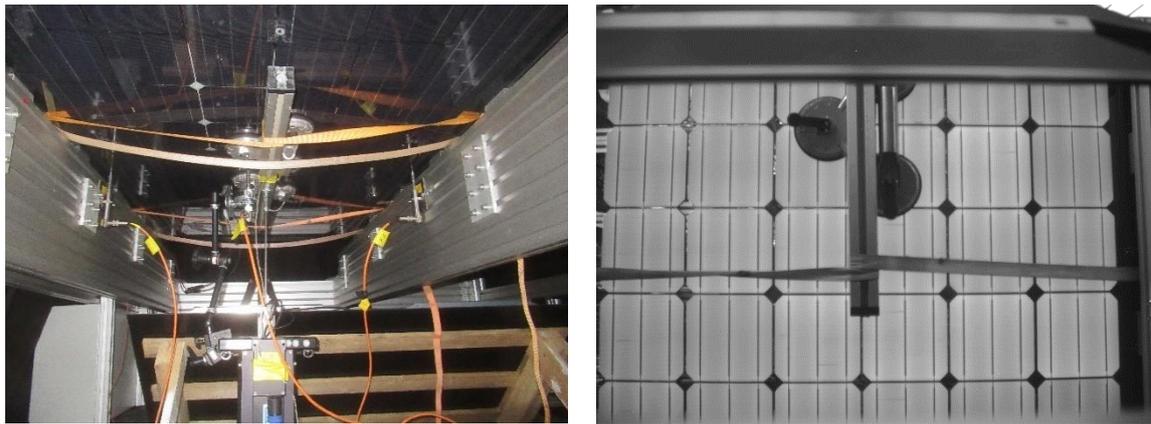


Abbildung 72: Testaufbau in Untersicht (linkes Bild): Aktuator unten etwas links der Bildmitte, Wegaufnehmer an den Tragholmen und neben der Anordnung von Saugnäpfen. Im Bildhintergrund der 45° geneigte Spiegel, um mit der Elektrolumineszenzkamera möglichst unverzerrt einen Teil des Moduls zu erfassen (rechtes Bild).

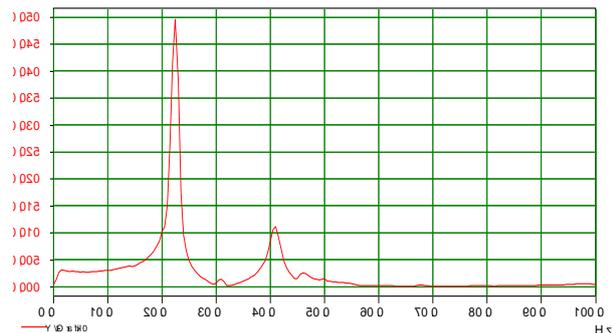
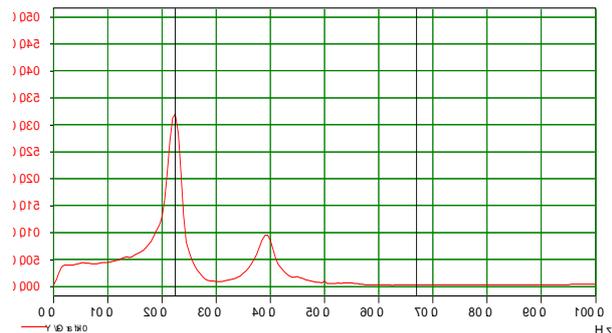
In **Abbildung 72** ist links ein Foto der Anordnung, rechts ein Elektrolumineszenzbild das einen Teil der Photovoltaikzellen im bei Stromfluss emittierten nahen IR-Licht darstellt. Die Modulmitte (Zentrum der Anregung) ist etwas oberhalb des oberen Bildrands, die drei kreisförmigen dunklen Bereiche sind drei der sechs Saugnäpfe, die an der Stange angeordnet wurden. Um ein allmähliches seitliches Auswandern aus der Modullängsachse und eventuelles Versagen der Saugnäpfe zu verhindern, wurde an beiden Seiten eine Abspannung quer zum Modul mittels Spanngurten vorgenommen, die hier etwas unterhalb der Bildmitte verläuft.

Würde der Schwingungsversuch bei einer Frequenz von ca. 1 Hz durchgeführt, müsste ein Test mit z.B. 10 Mio. Schwingungen nahezu vier Monate dauern. Eine weitere Beschleunigung ist möglich, indem in der Nähe einer Resonanzfrequenz angeregt wird, wo etwa dasselbe Kraft-Weg Verhältnis in der Versuchsanordnung besteht, wie bei einer freien Anregung bei ca. 1 Hz.

Vor (und nach) dem Schwingungstest wurde auch die Eigenresonanz des Moduls bei Anregung mit dem Impulshammer bestimmt, siehe **Abbildung 73**.



Abbildung 73: Anregung durch Impulshammer (links); FFT der Impulsantwort vor (rechts oben) und nach (unten) dem Dauerschwingungsversuch.



Bei LKW-Passage im Tunnel wurden Schwingbreiten bis zu 160 Pa bei ca. 1Hz Grundfrequenz gemessen. Daher wurde das Kraft-Weg Verhältnis bei 170N ($2.1\text{m}^2 \times 160\text{Pa}/2$) und 1 Hz gemessen, und eine Anregung oberhalb der 1. Harmonischen von 22,5 Hz mit 27,5 Hz so gewählt, dass sich wieder dasselbe Kraft-Weg Verhältnis ergibt: 0.27 mm Amplitude der Auslenkung bei 168 N Kraft-Amplitude. Mit 27,5 Hz werden 99 000 Zyklen pro Stunde gefahren. Wird eine Fahrzeugfrequenz von 5 000 Fahrzeugen pro Werktag angenommen, ergibt das ca. 100 000 Fahrten pro Monat, eine Stunde Test ist damit etwa 1 Monat äquivalent.

Ca. 12 Mio. Schwingungen wurden ausgeführt, wobei 10 Mio. mit etwa ± 0.3 mm Auslenkung (bei 27.5 Hz), weitere 2 Mio bei gleicher Kraft, aber näher an der 1. Resonanzfrequenz (bei 23,1 Hz) und einer resultierenden Auslenkungsamplitude von

±1.6 mm durchgeführt wurden. Nach Ende der Tests wurde erneut die Impulshammer-Methode angewandt, um eventuelle Änderungen im Schwingungsverhalten zu detektieren. Im gepulsten Sonnensimulator (Flasher) wurde die Strom-Spannungskennlinie des PV-Moduls bei Standardtestbedingungen (STC, 1000 W/m² senkrechte Einstrahlung bei solarem Spektrum mit Air Mass 1.5 und bei 25°C) gemessen und eine Gesamt-Elektrolumineszenz des Moduls aufgenommen.

Testergebnisse:

Während der Tests sowie bei den abschließenden Messungen konnten keinerlei Veränderungen oder Schäden am Modul (Glas, Zellen und Zellverbinder, Integrität des Materialverbundes) festgestellt werden. Die Elektrolumineszenz vor und nach den Tests, sowie die Leistungsmessung bei STC ergaben keinerlei Änderung oder Leistungsverlust / Degradation.

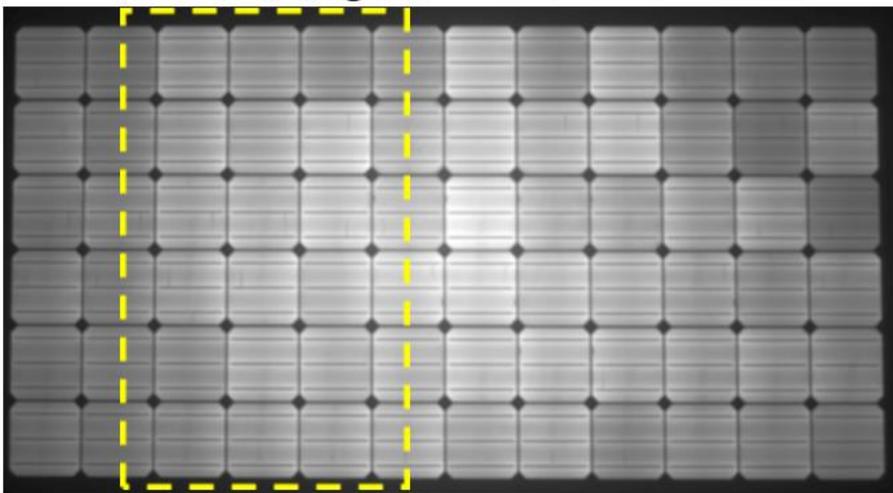


Abbildung 74: Volles EL-Bild nach Beendigung des Tests – keine Schäden. Der gelb umrandete Bereich entspricht dem Ausschnitt der auch „live“ beobachtet wurde.

Die Strom-Spannungskennlinien bei STC vor (blau) und nach dem Ermüdungstest (orange) liegen praktisch exakt übereinander, siehe Abbildung 75. Es gibt keine Änderung in der Strom-Spannungskennlinie, der Punkt max. Leistung lag vorher bei 284,9 W, danach bei 284,1 W. Die Änderung von -0,3 % ist im Rahmen der Messgenauigkeit ident.

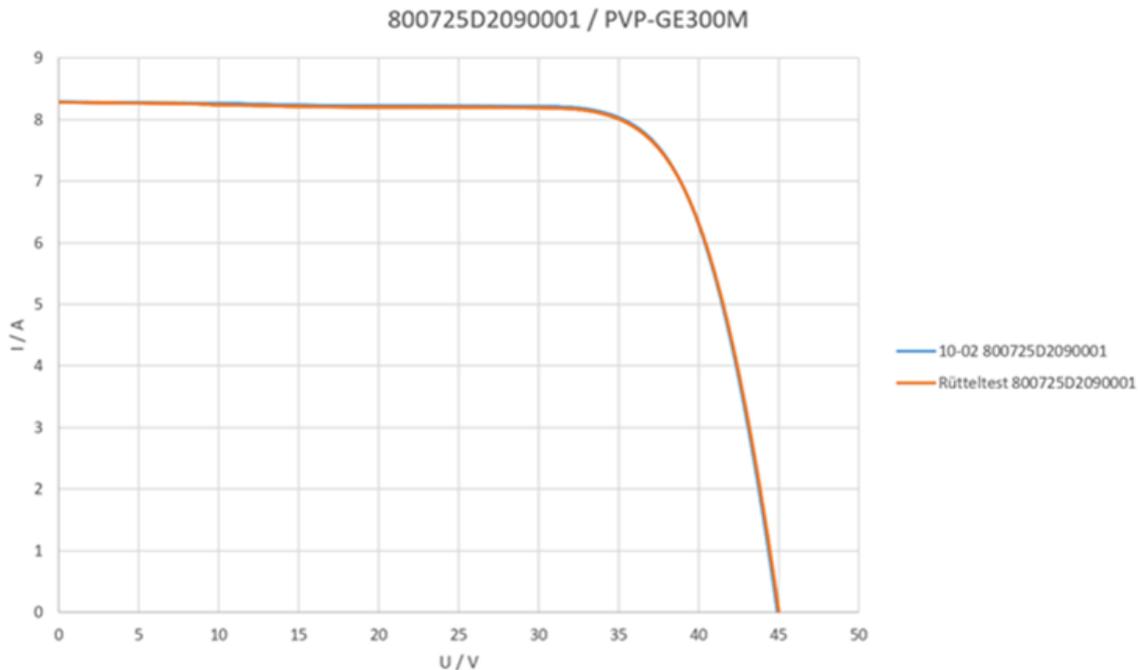


Abbildung 75: I-U Kennlinie vor (blau) und nach dem Schwingungs-Ermüdungstest (orange).

Diskussion:

Das getestete Glas-Glas Modul war zwar nicht mehr ganz zeitgemäß, ist aber durch seinen ebenfalls symmetrischen Aufbau den für den Demonstrator vorgesehenen Solarwatt-Modulen ähnlich. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten war es leider bisher nicht möglich, Solarwatt-Module in gleicher Weise zu testen. Diese weisen zwar eine geringere Glasdicke auf, aber (i) die Gläser sind voll getempert und nicht nur teilvorgespannt, (ii) es besteht eine größere Zahl paralleler Zellverbinder, und (iii) diese Module weisen zusätzlich einen Rahmen auf. Sie sind daher insgesamt als robuster anzusehen, und eine Schädigung durch eine gleichartige Schwingungs-Dauerbelastung nicht zu erwarten. Der Versuch auf Basis gemessener Druckdifferenzen bei Tunneldurchfahrten, ist sicherlich eine worst-case Belastungsannahme, denn bei einer Fahrbahnüberdachung mit großen seitlichen Öffnungen zwischen Oberkante der Lärmschutzwand und der Dachkonstruktion (vgl. etwa Abbildung 55) sind deutlich niedrigere Druckdifferenzen zu erwarten als im rundum geschlossenen Tunnel.

Dennoch sollten entsprechende Messungen der Druckverläufe an ausgeführten Prototypen, sowie entsprechende Labortests an der ausgewählten Modultype nachgeholt werden.

Standard-Glas-Folienmodule sind als weniger robust anzusehen und die Auslenkung bei gleich großen Druckdifferenzen sind bei sonst gleichen Versuchsbedingungen (± 170 Pa) nahezu um einen Faktor 7 größer als beim getesteten Glas-Glas Modul (1. Resonanzfrequenz bei 13 Hz, Start mit 18 Hz bei 175 N, resultierende Schwingamplitude 1,85 mm). Dennoch konnten auch hier nach mehreren 100 000 Schwingungen keine Schäden und selbst bei vorgeschädigten Zellen kein Risswachstum beobachtet werden.

Bei Hochleistungsmodulen die mit dem Laser geschnittene rechteckige Halbzellen verwenden, weil die Parallelschaltung von 2 Teilen mit jeweils halbem Strom die Stromwärmeverluste verringert, ist es möglich dass bei sehr starker mechanischer Belastung Risse von der Schnittkante ausgehen, wie es bei Versuchen zu (sehr) hoher Schneelast beobachtet wurde. Da solche Module bislang nicht mit Schwingungs-Ermüdungstests beansprucht wurden, sind für den Demonstrator Module mit Vollzellen zu empfehlen.

4.4 Gründung und Anprallschutz

Die Fundamente werden in Stahlbeton ausgeführt. Diese sollte vorzugsweise flach gegründet werden, diese Gründungsvarianten ist im Vergleich zur Bohrpfahlgründung wirtschaftlicher. Generell ist diese Entscheidung standortbezogen zu treffen und an örtliche Gegebenheit und die geologische bzw. geotechnische Situation anzupassen.

Regelungen betreffend Ausführung und in Bezug auf Anprallschutz sind in Regelwerken für Schilderbrücken zu finden:

Auszug aus der ZTV-ING – Teil 9 Bauwerke – Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken betreffend Gründung und Anprallschutz:

„Grundsätzlich sollten Ortbetonsockel vorgesehen werden. Zum Schutz vor Fahrzeuganprall sind bei $v > 50$ km/h Ortbetonsockel (Anprallkörper) entsprechend DIN EN 1991-1-7 mit einer Höhe von mindestens 80 cm über Fahrbahn vorzusehen, wobei deren Stirnseiten halbkreisförmig abzurunden sind“.

Die Fundamentposition ist in Österreich gemäß RVS 05.02.11 festzulegen bzw. in Deutschland nach ZTV-ING Teil 9 – Abschnitt 1. Des Weiteren ist bei der Gründung darauf zu achten, dass Energieleitungen etc. nicht beschädigt werden – siehe Trassenschutzrichtlinie, PLaNT 910.001.1000

Die Absicherung mit FRS (Fahrzeugrückhaltesystem) ist in Österreich gemäß RVS 05.02.31 vorzunehmen und in Deutschland nach RPS auszubilden.

Für das Konzept wurden entsprechend diesen Vorkehrungen zur Fundierung auf diese Regelwerke und Richtlinien für Schilderbrücken aufgebaut.

4.5 Montage und Aufstellungskonzept

Die Planung der Montage der Tragkonstruktion kann derzeit nur konzeptionell erfolgen und ist noch weiter zu detaillieren. Grundsätzlich abzustimmen ist der Grad der Vorfertigung bzw. Vormontage besonders im Hinblick auf PV-Module. Es wird von Schraubstößen an den Bauteilen, welche in transportierbaren Längen an den Aufstellungsort geliefert werden, ausgegangen.

Prinzipiell erfolgt die Montage wie nachstehend beschrieben: Nach Fertigung der Fundamente wird der vertikale Stiel auf Fundamente mittels Krans eingehoben, die Fußverankerung wird gemäß Anzugsprotokoll verschraubt.

Der Querriegel wird mittels Krans eingehoben, die Eckverbindung standardmäßig gemäß Anzugsprotokoll verschraubt. Diese Bauarbeiten können in der Regel mit lokalen Spureinschränkungen stattfinden.

Bei Bauteilen die in Querrichtung der Autobahn/Straße verlaufen, ist eine Sperre der Autobahn/Straße notwendig. Aus derzeitiger Sicht kann man Sperrzeiten bis zu 24h annehmen (Ableitung der Autobahn im Bauabschnitt). Im Zuge des Konzeptprojekts kann noch nicht im Detail abgeschätzt werden, welche Bauteile vormontiert werden („im Werk“) und welche Bauteile vor Ort montiert werden.

5 MESSTECHNIK-KONZEPT

5.1 Allgemeines

Für die Erfassung der allgemeinen Funktionsweise, der Einhaltung von in der Planung definierter technischer Parameter, sowie zur Beantwortung spezifischer fachlicher Fragestellungen ist eine Datenerfassung vor Ort unerlässlich. Die Erfassung umfasst die Bereiche (a) Umweltmeteorologie, (b) PV-spezifische, (c) fahrbahnspezifische und (d) konstruktionsspezifische Messwerte.

Die Untersuchungen erfolgen im Projektzeitraum in zwei Messarten:

- In-Situ Messungen: Vor-Ort im Rahmen einer Messkampagne,
 - Messungen punktuell zu definierten Zeiträumen und für spezifische Parameter (z.B. Fahrbahn);
 - Material und Geräte zur Messung werden zum Demonstrator gebracht und nach erfolgter Messung wieder entfernt
 - Messung abhängig von Wetter, kann aber wiederholt werden
 - Auswertung der Messungen in-Situ
- Monitoring: Dauermessung von Parametern durch verbaute Sensorik
 - Messung von Parametern, die Langzeitverhalten haben (z.B. solare Einstrahlung)
 - Sensoren und Geräte zur Messung werden bei Errichtung oder zu einem definierten Zeitpunkt danach für eine gewisse Zeitspanne oder dauerhaft errichtet und verbleiben über einen längeren Zeitraum am Demonstrator
 - Messung kann Wartungsaufwand erfordern (z.B. Sensorausfall), liefert aber durchgehende Zeitreihen an Werten.
 - Fernauswertung kann laufend erfolgen und auch automatisiert werden.

5.2 Überblick über die untersuchten Parameter

Die Messungen umfassen eine Vielzahl an Parametern zu den oben beschriebenen Bereichen. Ein Teil der Parameter wird durch das Monitoring abgedeckt, ein anderer Teil durch die in-Situ Messungen. Die Parameter und die zugehörigen, vorgeschlagenen Messsysteme sind hier aufgelistet:

- | | |
|---|--|
| • Fahrbahntemperaturen | über Thermoelement oder PT100 |
| • Schall / Akustik | über Mikrofone |
| • Bauwerksbewegung | über Wegsensoren |
| • Stahlbeanspruchung | über Dehnungsmesstreifen |
| • Dynamische Belastungen /Schwingungssensor | über Dehnungsmesstreifen |
| • Schwingungen | über Laser-Vibrometer bzw. Sensoren |
| • Elektrischer Ertrag | über Wechselrichter |
| • Windgeschwindigkeit | über Anemometer (2D Ultraschall / Schalen) |
| • Modultemperaturen | über PT100 |
| • Umgebungstemperatur | über PT100 |
| • Solare Einstrahlung | über Pyranometer / Referenzzelle |

Die Art der Sensoren und Messungen ist in weiterer Folge genau beschrieben.

5.3 Konzept für Datenerfassung und -verarbeitung

Datenerfassung

Die Erfassung der Daten der Messkampagnen und der In-Situ-Messungen erfolgt durch die zugehörigen Geräte und periphere IT-Infrastruktur. Demgegenüber benötigt das Monitoring (die dauerhafte Vor-Ort Messung) ein gemeinsames Konzept zur Erfassung, Zwischenspeicherung und Versendung der Daten an die Projektpartner. Die Abbildung 76 zeigt schematisch die Hauptaufgaben des Monitoringsystems:

- Erfassung der Sensormesswerte in definierten Intervallen
- Zusammenführen der Messstellen für die verschiedenen Bereiche
- Speicherung der Daten
- Senden der Daten
- Wetterfeste Einhausung der Steuerung, Datenerfassung und IT-Komponenten
- Stromversorgung für Sensoren und Messstellen, sowie IT-Komponenten

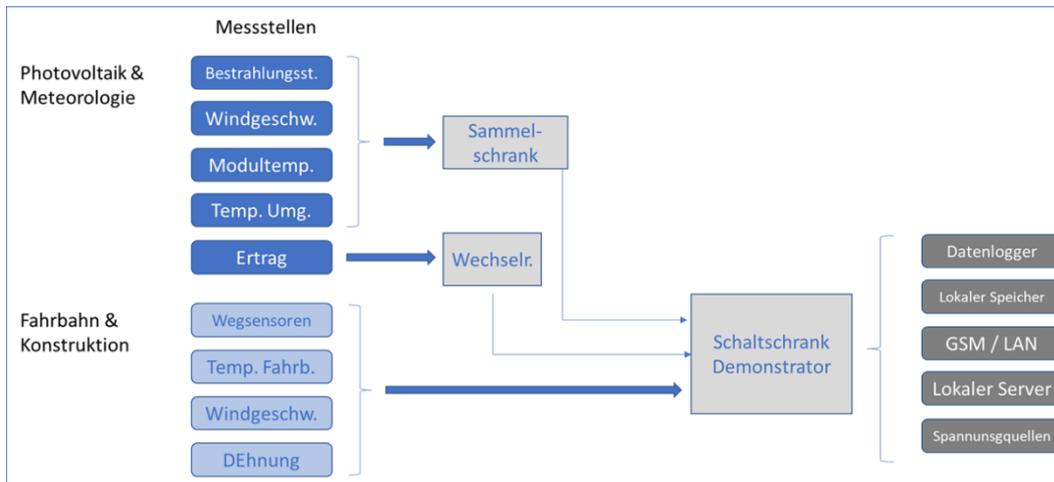


Abbildung 76: Messkonzept für die zu erfassenden Parameter

Für die Zusammenführung und Versorgung der Sensoren und IT-Komponenten wird ein ausreichend großer Schaltschrank verbaut werden. Der Schaltschrank ist im Wesentlichen Teil der Demonstratorphase und wird im Falle einer Multiplikation der PV-Überdachung nicht benötigt werden. Er muss neben Hutschienen für Montage von Geräten und IT über folgende Infrastruktur verfügen:

- Gebläse zur Luftkühlung (inkl. optional zweite Wandung gegen solaren Eintrag)
- Geeignete elektrische Durchführungen (üblich unten)
- Steckleisten mit geeigneter Absicherung
- Schaltschrankheizung für den Winter
- Ausgang und Option für GSM Antennenaufbau
- 19" Einschübe oder Fächer auf Hutschienen

Datenauswertung

Die erfassten Daten aus dem Monitoring werden an die Projektpartner (geplant: AIT) gesendet (per GSM Modem). Die Daten werden auf einem Server als Zeitreihen gespeichert und geeignet sortiert. Wesentlicher Punkt vor einer Datenauswertung wird es sein, die Daten zu filtern (z.B. hinsichtlich physikalischer Plausibilität) und zu bereinigen (z.B. hinsichtlich gesetzter Grenzwerte technischer Gültigkeit, Identifizieren und Bereinigen

von Doublette und Datenausfällen). Nach Aufbereitung der Zeitreihen wird eine geeignete Auswertung vorgenommen werden. Das betrifft

- Zeitverhalten (z.B. Temperaturen)
- Degradation (z.B. PV-Ertrag)
- Auffälliges Verhalten (z.B. Bauwerkbewegung)
- Bilanzsummen (Z.B. PV-Ertrag)

Die Ergebnisse der Bewertungen werden in geeigneter Form und übersichtlich zusammengestellt dargestellt. Schematisch ist die Kette der Datenbereinigung, Modellanwendung und Ergebnisdarstellung in der folgenden Abbildung gezeigt.

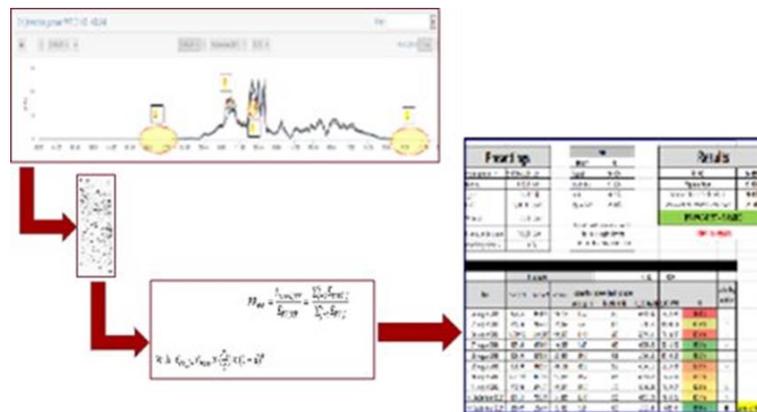


Abbildung 77: Schematische Darstellung der Datenauswertung. Nach einer Datenbereinigung und Filterung werden die Daten mit Modellen oder Bewertungsfunktionen beurteilt und dann geeignet zusammengefasst dargestellt.

5.4 Messungen im Bereich Photovoltaik

In den Bereich der Messungen an der verbauten Photovoltaik fallen Umweltmeteorologie, elektrische Erträge sowie das technische Funktionieren der Module. Das sind folgende Messtellen:

- Dynamische Belastungen über Dehnungsmesstreifen /Schwingungssensor
- Schwingungen über Laser-Vibrometer/ Schwingensensoren
- Elektrischer Ertrag über Wechselrichter
- Windgeschwindigkeit über Anemometer (2D Ultraschall / Schalen)
- Modultemperaturen über PT100
- Umgebungstemperatur über PT100
- Solare Einstrahlung über Pyranometer / Referenzzelle

Davon können alle Messstellen außer der berührungslosen Schwingungsmessung auch im Dauermonitoringbetrieb erfasst werden.

PV-spezifische Messsensoren werden im Folgenden beschrieben. Sensoren wie Dehnung oder Schwingung werden weiter unten im Kapitel zu Fahrbahn und Traglasten beschrieben.

Bestrahlungsstärke

Die Bestrahlungsstärke (W/m^2) oder die solare Einstrahlung wird üblicherweise durch eine technologiespezifische Referenzzelle oder ein Pyranometer erfasst. Hier vorgeschlagen wird ein Pyranometer. Während eine Referenzzelle nur im Strahlungsbereich misst, für den die PV-Technologie empfindlich ist (z.B. für kristalline Zellen 300 nm – 1200 nm) ist ein Pyranometer ein Instrument, das in einem breiten Spektralbereich empfindlich ist (ca. 250 nm – 4000 nm). Ein Pyranometer misst die gesamte Strahlung (direkte und diffuse Strahlung) im Halbraum, gewöhnlich auf einer horizontalen Fläche. Pyranometer wandeln die Strahlung in elektrische Spannung um, wobei der Strom ein Maß für die auftreffende Bestrahlungsstärke (W/m^2) ist. Die Messgenauigkeit liegt technisch bei ca. $5 W/m^2$ durch Kalibrierung auf Sekundär-Referenzstufe bei ca. 2,5% -3% absoluter Messgenauigkeit und die Reaktionszeit auf Veränderungen der Bestrahlungsstärke zwischen 5 Sekunden und 20 Sekunden.



Abbildung 78: Pyranometer zur Erfassung der horizontalen Globalstrahlung (Bildquelle: Kipp&Zonen)

Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit (in m/s) ist wesentlich, um den Ertrag korrekt zu bewerten können (er ist quadratisch von der Windgeschwindigkeit über die Temperatur abhängig). Die Windgeschwindigkeit wird üblicherweise mit einem Schalenkreuz mit einem definierten CW-Wert gemessen, oder mittels Ultraschallmessung und Errechnung der Dopplerformel (Ultraschallanemometer). Zur Erfassung der Windgeschwindigkeiten über und unter dem Demonstrator eignen sich 2D oder 3D Doppler-Anemometer am besten.



Abbildung 79: 2D-Doppler-Anemometer an einer PV-Testfassade

Temperaturen (Umgebung, Module)

Die Temperaturen an Photovoltaikmodulen werden mit PT100 Temperatursensoren erfasst. Das Messprinzip beruht auf dem fast vollständig linearen Verhalten des elektrischen Widerstandes eines Drahtes bei Raumtemperatur (ca. -40°C bis 100°C). Durch einen Kontrollstrom kann so der Widerstand und damit die Temperatur auf ca. 1K genau bestimmt werden. Zur Erreichung der Genauigkeit von 1K muss der Sensor korrosionsfrei über den Zeitraum sein, sowie mit geeigneten Maßnahmen von Störungen entkoppelt werden (z.B. durch Isolation von der Umgebungstemperatur bei Oberflächenmessungen und durch Abschirmung von der Sonne bei Umgebungstemperaturmessung).

Die Temperatur geht in den Ertrag von Photovoltaik ein, indem Module durch Temperaturen über 25°C an Leistung verlieren. Für moderne Technologien sind das ca. 0.3 - 0.5. %/ K. Die Korrektur für die Messtemperatur auf 25°C wird über IEC 60891 durchgeführt.

Elektrischer Ertrag

Der absolute Ertrag (kWh) wird üblicherweise vom Wechselrichter gemessen. Er ist die Summe aller momentanen Leistungen (W). Der Ertrag wird aber in einer normierten Größe angegeben, dem spezifischen Ertrag Y (kWh/kW = h), die es erlaubt (a) die Anlage hinsichtlich ihres Betriebszustandes zu bewerten und (b) den Ertrag der Anlage mit anderen Anlagen oder stromerzeugenden Technologien zu vergleichen. Der spezifische Ertrag ist gleich dem elektrischen Ertrag in kWh dividiert durch die installierte Nominalleistung in kW und gibt an, wie viele Stunden die Anlage im Jahr unter Volllast laufen würde, um den Ertrag zu erzeugen. Übliche Werte in der DACH Region liegen um 1000 kWh/kW oder 1000 Volllaststunden. Die Bewertung des Ertrages und der Systemperformance folgen IEC 617853 und IEC 61724.

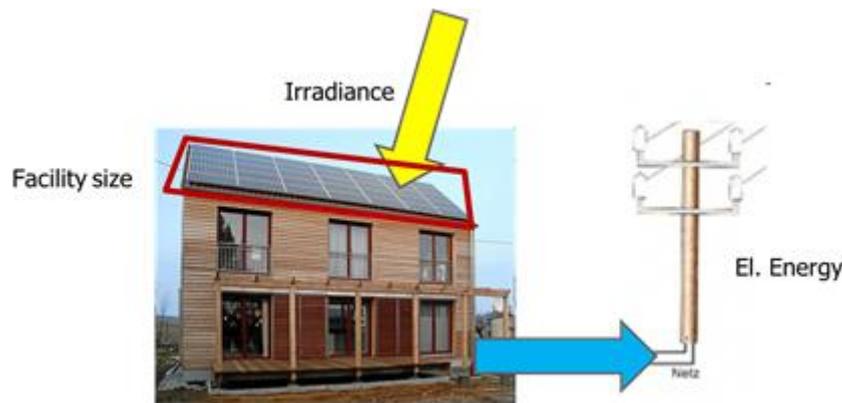


Abbildung 80: Schema: Notwendige Messgrößen zur Bestimmung des spezifischen Ertrages Y und der Anlagenqualität: Einstrahlung, Anlagengröße und elektrischer Ertrag.

type	full load hours [h]
Photovoltaic free field	1000
Photovoltaic facade	650
Photovoltaic desert	2000
Wind power onshore	2000
Wind power offshore	3000
Hydro power (Danube river)	6000
Nuclear / brown coal	8000

Abbildung 81: Vergleich verschiedener Erzeugungstechnologien hinsichtlich des spezifischen Ertrages gemessen in Volllaststunden (kWh/kW).

5.5 Messungen an der Tragkonstruktion und Auswirkungen auf die Infrastruktur

In Bezug auf die Tragstruktur erscheint ein zweigeteiltes Messkonzept sinnvoll, welches sich aus einer „statischen“ Dauermessung und Einzelmesskampagnen zusammensetzt. Die Dauermessung besteht aus am Bauwerk applizierten Dehnungs- und Temperatursensoren. Einzelmesskampagnen finden in Form von mehrstündiger „dynamischer“ Messung und optional einer Brand- bzw. Brandrauchversuchsmessung statt.

Die „statische“ Messung (siehe Abbildung 82, die Abtastrate liegt hier im Bereich von einem bis wenigen Werten pro Stunde) besteht bauwerksseitig zum einen aus einer Dehnungsmessung mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) an verschiedenen Stellen der Tragstruktur, mit welchen vor allem Schnee- und Temperaturbeanspruchungen (eventuell auch Windbeanspruchungen) auf das Bauwerk erfasst werden sollen. Zum anderen soll mithilfe von einem bis zwei Wegsensoren die Relativbewegung der Bauwerksmodule zu- bzw. voneinander im Jahresverlauf aufgenommen werden. In Bezug auf die Nebeneffekte einer Fahrbahnüberdachung auf die Fahrbahn erscheint außerdem noch die Erfassung der Fahrbahntemperatur in mindestens zwei Tiefenstufen sowohl an einer vom Bauwerk beschatteten als auch nicht beschatteten Stelle im Jahresverlauf als sehr interessant, da dies Rückschlüsse auf die zu erwartende Reduktion der Fahrbahndegradation zulässt (siehe dazu Kapitel 6.2.1).

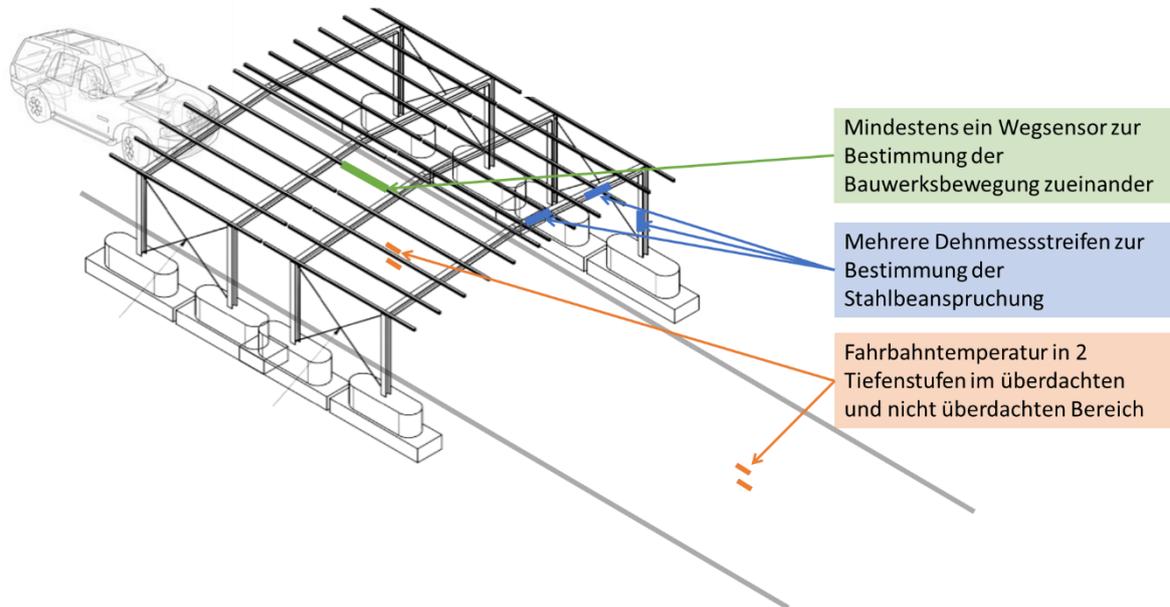


Abbildung 82: Messkonzept der Dauermessung

Bei der „dynamischen“ Messung (siehe Abbildung 83), wird das Tragwerk gezielt mit Schwingungsanregung in Bezug auf die dynamischen Eigenschaften untersucht, um hier Aussagen betreffend der Verkehrsinteraktion (Aerodynamik/Ermüdung) zu erhalten. Die Abtastrate liegt hier im Bereich von einigen hundert Hertz, und ist im Gegensatz zur „statischen“ keine Dauermessung, sondern wird an ein bis zwei Tagen durchgeführt. Die Schwingungen werden bei gezielter dynamischer Anregung des Tragwerks mit einem Long-Stroke-Shaker (Abbildung 86) an verschiedenen Stellen am Bauwerk durchgeführt, wobei die Frequenzen verändert werden und das Resonanzverhalten untersucht wird. Erfasst werden die Schwingungen sowohl mit applizierten triaxialen Schwingungssensoren, oder auch berührungslos mit einem Laservibrometer (Abbildung 85) wie auch mit den für die Dauermessung vorgesehenen DMS. Es ist vorgesehen das Tragwerk sowohl vertikal in Überdachungsmitte, als auch, falls erforderlich, horizontal (in Längs- und Querrichtung) anzuregen, um das Eigenschwingverhalten untersuchen zu können, um auf mögliche Resonanzeffekte im Betrieb schließen zu können. Zusätzlich werden noch im Zuge der Validierung der Ermüdungsversuche der Module (Kapitel 4.3.2) die Eigenfrequenzen einiger fertig eingebauter Module durch Anregung mit dem Impulshammer mittels Schwingungssensor bestimmt (Abbildung 83).

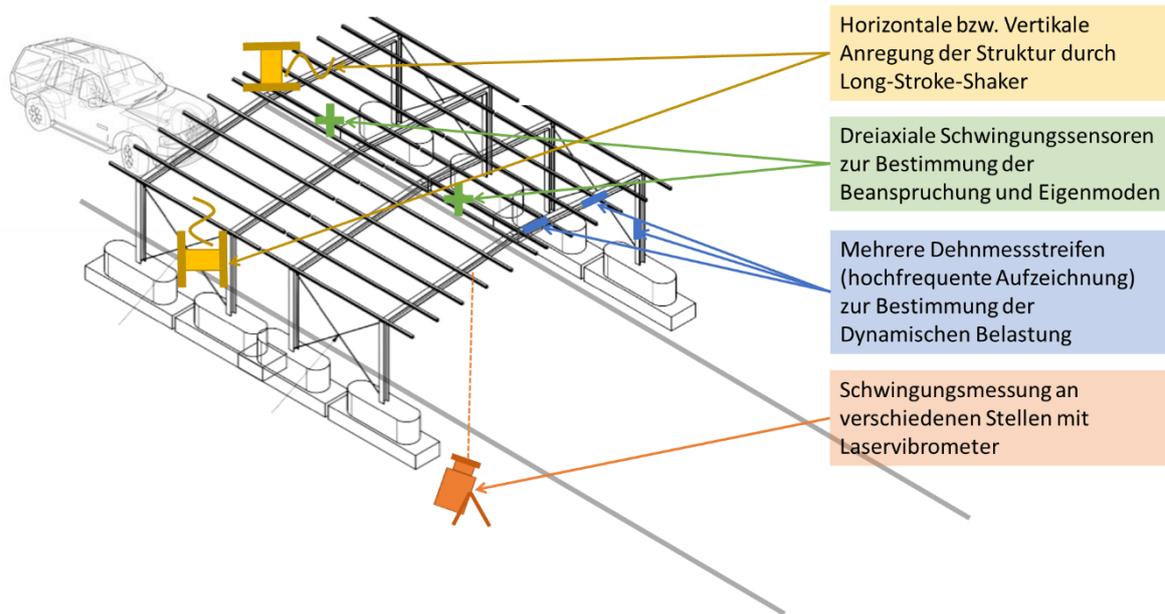


Abbildung 83: Messkonzept der Einzelmesskampagne: dynamische Anregung

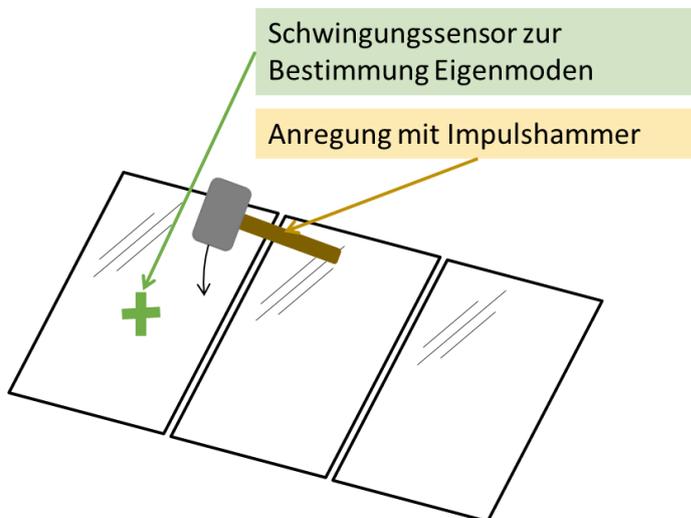


Abbildung 84: Eigenfrequenzbestimmung der fertig eingebauten PV-Module mit dem Impulshammer



Abbildung 85: Laservibrometer zur kontaktlosen Bestimmung von Bauwerksschwingungen



Abbildung 86: Long-Stroke-Shaker zur dynamischen Bauwerksanregung und Schwingungssensor



Abbildung 87: Induktive (links), optische (mittig) und Seilzug-(rechts) Wegsensoren

Optionaler Rauch- oder Brandversuch

Nach Abstimmung der durchführungs- und sicherheitstechnischen Randbedingungen sowie der allenfalls vom AG zur Verfügung zu stellenden Verkehrssperren besteht auch die Möglichkeit eines Brandrauchversuchs. Hier ist angedacht, einen Brand mit einer Brandlast von 2,5 MW messtechnisch zu erfassen. Dazu werden in einem Raster (beispielsweise 2 m x 2 m) Sensoren im relevanten Bereich des Bauwerks Temperatursensoren aufgebracht um die Temperaturentwicklung räumlich zu erfassen. Eine optische Erfassung der Rauchentwicklung ist nicht vorgesehen. Zur Durchführung dieses Versuches ist allerdings eine mehrstündige Sperrung des Bereichs unter der Überdachung nötig bzw. in Abhängigkeit von der Distanz der Autobahn zur Überdachung auch eine Sperrung der Autobahn für ca. 30 min. Aufgrund der notwendigen Sperrungen werden derartige Versuche meist nachts durchgeführt.

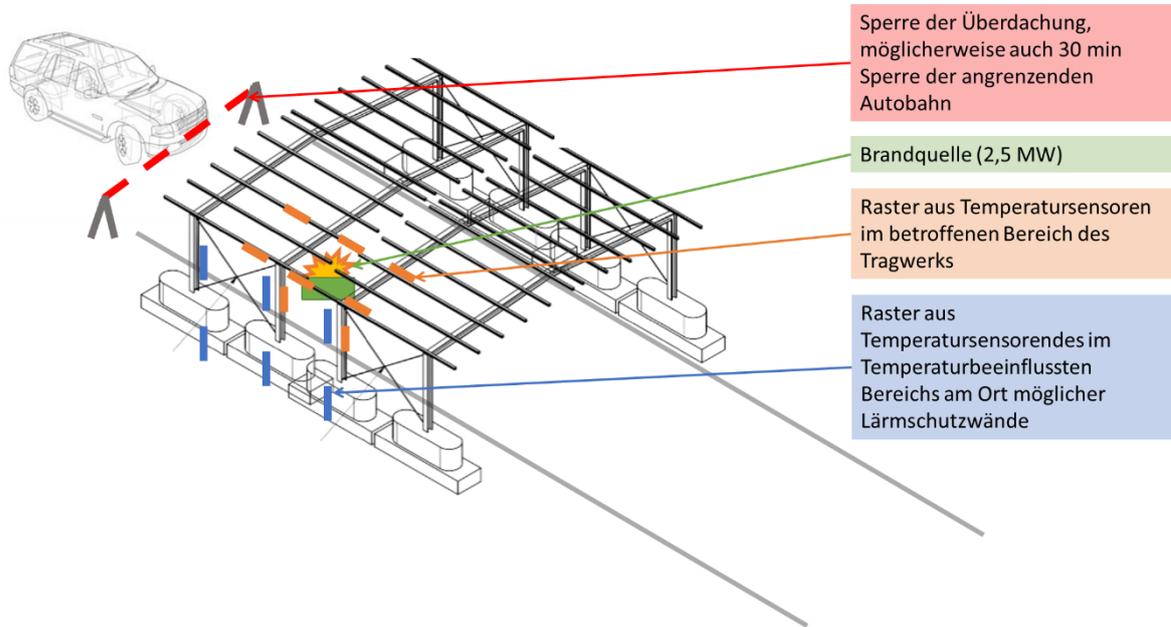


Abbildung 88: Messkonzept des Brandversuchs

5.6 Messungen im Bereich Akustik und Lärmschutz

Die für das Thema Schallschutz relevante Größe ist die Veränderung des Schalldruckpegels an relevanten Immissionspunkten, welcher durch die unter der PV-Überdachung verkehrenden Fahrzeuge hervorgerufen wird. Da in größerer Entfernung keine weiteren Modifikationen der Verkehrsinfrastruktur durch die Überdachung erzeugt werden, sind vergleichende Messungen nahe der Emissionsquelle ausreichend, um die Veränderung der effektiven Schalleistung der Straße als Schallemittent zu bestimmen. Zur Bewertung der Auswirkungen der PV-Überdachung auf die abgestrahlte Schalleistung sowie den Umgebungslärm sind folgende Messungen mit komplementären Eigenschaften geplant:

1) Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen:

An zwei Querschnitten am Testabschnitt werden kontrollierte Vorbeifahrtmessungen mit einem PKW durchgeführt, und zwar an einem Referenzabschnitt ohne Überdachung und an einem zweiten Querschnitt in der Mitte der Überdachung. Dabei werden geeignete Mikrofonpositionen gewählt, um den geometrischen Gegebenheiten der Überdachung Rechnung zu tragen. Je nach Umgebungsbedingungen und weiteren Lärmquellen im Bereich der Überdachung müssen diese Messungen aufgrund des benötigten Signal-Rauschverhältnisses möglicherweise in der Nacht durchgeführt werden.

o Vorteile:

- realistische Bewertung der Schallemission einer (zeitabhängigen) Vorbeifahrt
- einfache Abschätzung eines Korrekturwertes für die Schallabstrahlung

o Nachteile:

- Anforderungen an eine Mindestlänge des Abschnittes (konstante Fahrgeschwindigkeit in beiden Messquerschnitten)
- Anforderungen an den Umgebungslärm
- Anforderungen an die Homogenität des Fahrbahnbelages

2) Messungen der Übertragungsfunktion:

Mittels eines am Fahrstreifen positionierten Lautsprechers können Übertragungsfunktionen zu Mikrofonen im Nahbereich der Überdachung für jeden

der beiden Querschnitte gemessen werden. Dabei werden Signale verwendet, die eine Wiedererkennung der ausgesandten Schallwellen und damit ein großes Signal-Rauschverhältnis ermöglichen. Durch Laufzeitverfahren können auch durch die Überdachung reflektierte Signalanteile identifiziert werden und somit der Energiebeitrag dieser zusätzlichen Reflexionen bewertet werden.

- o Vorteile:
 - Trennung der Komponenten der direkten und der an der Überdachung reflektierten und gestreuten Schallenergieanteile
 - Ermittlung einer Übertragungsfunktion zu repräsentativen Immissionspunkten
- o Nachteile:
 - Streckensperre notwendig
 - Strenge Anforderungen an die meteorologischen Bedingungen
 - Keine direkten Aussagen zu Vorbeifahrtspegeln

Die Kombination dieser beiden Verfahren ermöglicht sowohl eine Beurteilung der Veränderung bei einer typischen Fahrzeugvorbeifahrt zu erwartenden Schallemissionen wie auch eine weitergehende Charakterisierung der auftretenden akustischen Effekte. Die Messungen werden nach Errichtung des Demonstrators einmalig durchgeführt. Diese Untersuchungen können in weiterer Folge auch dafür verwendet werden, Schallausbreitungssimulationen im Nahfeld der PV-Überdachung zu verifizieren. Im Rahmen des geplanten Demonstrators ist ein Standort ohne Lärmschutzwände im Bereich der Überdachung vorgesehen, was eine einfachere Beurteilung ermöglicht. In Kombination mit Lärmschutzwänden ergeben sich erheblich komplexere Schallfelder und akustische Effekte, die entweder Simulationen oder Messungen direkt am geplanten Einsatzort erfordern.

6 ENERGIE- UND WIRTSCHAFTLICHKEITSRECHNUNG SOWIE ANALYSE DER NEBENEFFEKTE

In diesem Abschnitt werden sowohl die Energieertragsberechnungen, als auch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen des ausgearbeiteten Konzeptes durchgeführt. Zusätzlich werden auch die Nebeneffekte der baulichen Struktur auf die Instandhaltung und Lebensdauer der Fahrbahn in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt.

6.1 Energieerträge aus der Photovoltaik

Die Menge an nutzbarem Solarstrom, die eine Photovoltaik-Anlage erzeugt, wird Ertrag genannt und in Kilowattstunden (kWh) gemessen. Als Energiequelle bestimmt die Sonne die Höhe des Solarertrags. Es gilt: Je mehr Solarenergie auf die Solarmodule der Anlage trifft, desto mehr kann diese in nutzbaren Strom umwandeln. Neben dem Standort der PV-Anlage, der Ausrichtung und Neigung der Module hängt der Energieertrag natürlich auch von der Größe der Modulfläche (Anzahl der PV-Module, Größe der PV-Anlage in kWp), sowie den Modulen selbst (Technologie, Leistungsklasse, Wirkungsgrad) ab.

Waferbasierte PV-Module unterliegen einem laufenden Degradationsprozess, d.h. bei diesen PV-Modulen ist mit einem Leistungsverlust von bis zu 0,5% pro Jahr zu rechnen. Hersteller von PV-Modulen geben eine Leistungsgarantie dieser Produkte von ca. 80% der ursprünglichen Leistung nach 25 Jahren. Dies wird auch bei der Ertragsberechnung über die Lebensdauer der PV Anlage berücksichtigt.

Für das gewählte Photovoltaik-System (gemäß Abschnitt 3) ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle 9 dargestellten technischen Daten:

Tabelle 9: Daten für das gewählte PV System für die Energieertragssimulation

Komponente	Technische Daten	Einheit
Größe Stahlbau	ca. 10 x 17	m, Länge x Breite
Generatorfläche:	11,88 x 16,8	m, Länge x Breite
PV-Generatorfläche	199,6	m ²
PV-Generatorleistung	37,8	kWp
Anzahl PV-Module	120	Stk.
PV-Module	SOLARWATT Vision construct, 315Wp	Wp
Neigung der Dachfläche	5	°
Wechselrichter Modell	FRONIUS Symo	

Aufbauend auf diesem Grundsystem wurde für die in Abschnitt 3.5.3 beschriebenen Standorte jeweils eine Ertragssimulation im Planungstool PV*SOL durchgeführt.

Berechnung mit PV*SOL:

Mit dieser Software-Anwendung ist eine Planung und Simulation von PV-Anlagen möglich. Dieses Tool

- berücksichtigt den Standort der PV-Anlage mit durchschnittlichen Temperaturen und Einstrahlungswerten,
- erlaubt eine genaue Konfiguration der Anlage (Art, Ausrichtung, Neigung, Einbau, Verschattung der Module),
- gibt die ideale Verschaltung der Module an

Es wird eingesetzt zur

- Abschätzung des zu erwartenden Ertrags und der Deckung des Verbrauchs / Einspeisung
- Ermittlung der optimalen Verschaltung der PV-Module und Wechselrichter
- optimalen Wahl des Wechselrichtermodells (bei vorheriger Auswahl des Herstellers)

Variantenvergleich an den gewählten Standorten

Im Kapitel 3.5.3 wurden Standorte für eine potentielle Positionierung des PV-SÜD Demonstrators an Autobahnen in Österreich und Deutschland beschrieben. Hierfür wurden aufbauend auf dem PV-System gemäß Tabelle 9 Energieertragssimulationen für den jeweiligen Standort durchgeführt. Dabei wird der spezifische Jahresertrag in kWh/kWp, der Anlagennutzungsgrad in % sowie die Energieerzeugung pro Jahr berechnet (Netzeinspeisung in kWh/Jahr). Die Ergebnisse der Energieertragssimulation sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 zusammengefasst.

Für die Ertragssimulationen wurden ein Pultdach mit 5° Neigung sowie ein Satteldach mit jeweils 5° Neigungswinkel (wie in Kapitel 4.1 erläutert) herangezogen. Ist der Straßenverlauf Nord-Süd so wird ein Satteldach mit Ost/West Ausrichtung der Dachflächen und damit der PV Modulfelder (z.B. Standort Leobersdorf (O/W)) gewählt. Bei einem Straßenverlauf von West nach Ost wird ein Pultdach mit Ausrichtung der Dachflächen und damit der PV Modulfelder nach Süden gewählt (z.B. Standort St.Pölten (S)). Die Bezeichnungen Ost/West (O/W) bzw. Süd (S) in den folgenden Tabellen in diesem Kapitel

beziehen sich auf die Ausrichtung der Dach- bzw. Modulflächen der Konstruktion (nicht auf den Straßenverlauf).

Für die meisten Standorte ist der Straßenverlauf zwischen Nord/Süd und Ost/West und damit die optimale Wahl der Dachart hinsichtlich Energieertrag nicht immer eindeutig. Deshalb wurden in den Simulationen beide Varianten für die alle Standorte (außer Leobersdorf) gerechnet.

Tabelle 10: Berechnete Jahresenergieerträge an unterschiedlichen Standorten

	Leobersdorf (O/W)	St. Pölten (O/W)	St. Pölten (S)	Klagenfurt (O/W)	Klagenfurt (S)	Hamburg (O/W)	Hamburg (S)
PV-Generatorleistung [kWp]	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8
Spez. Jahresertrag [kWh/kWp]	1 015,7	991,7	1 033,9	1 132,1	1 165,6	835,6	872,0
Anlagennutzungsgrad [%]	87,4	87,1	87,5	88	88,3	87,3	87,7
Netzeinspeisung [kWh/Jahr]	38 416	37 509	39 104	42 815	44 080	31 612	32 988

Tabelle 11: Berechnete Jahresenergieerträge an unterschiedlichen Standorten

	Brandbühl (O/W)	Brandbühl (S)	Engen (O/W)	Engen (S)	Hegau (O/W)	Hegau (S)
PV-Generatorleistung [kWp]	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8
Spez. Jahresertrag [kWh/kWp]	1 020,9	1 062,3	1 013,9	1 048,7	1 013,3	1 041,2
Anlagennutzungsgrad [%]	87,6	87,9	87,8	88	87,8	88
Netzeinspeisung [kWh/Jahr]	38 614	40 177	38 348	39 655	38 325	39 379

O-W oder S-Orientierung der Module direkt über den Fahrbahnen der Autobahn:

In den folgenden Abbildungen sind die Varianten für die unterschiedlichen Dacharten an den beispielhaften Standorten dargestellt.

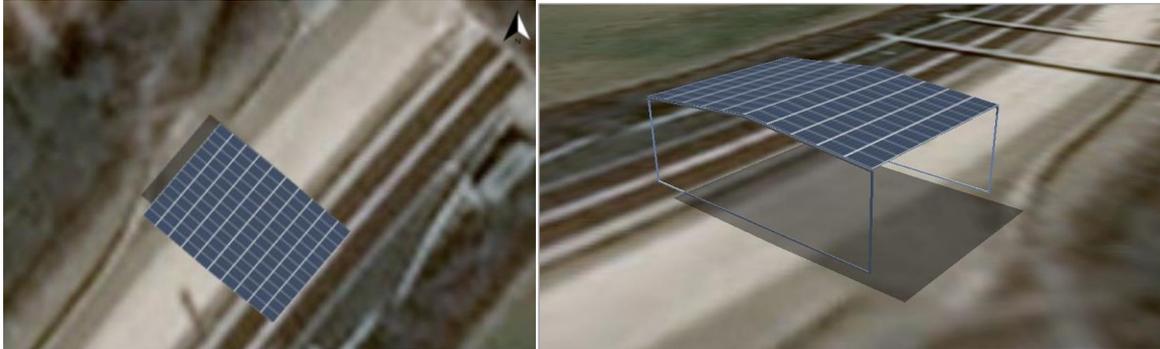


Abbildung 89: Variante Satteldach mit Ost-West Orientierung der PV Module für den Standort Klagenfurt



Abbildung 90: Variante Pultdach mit Süd-Orientierung der PV Module für den Standort Klagenfurt

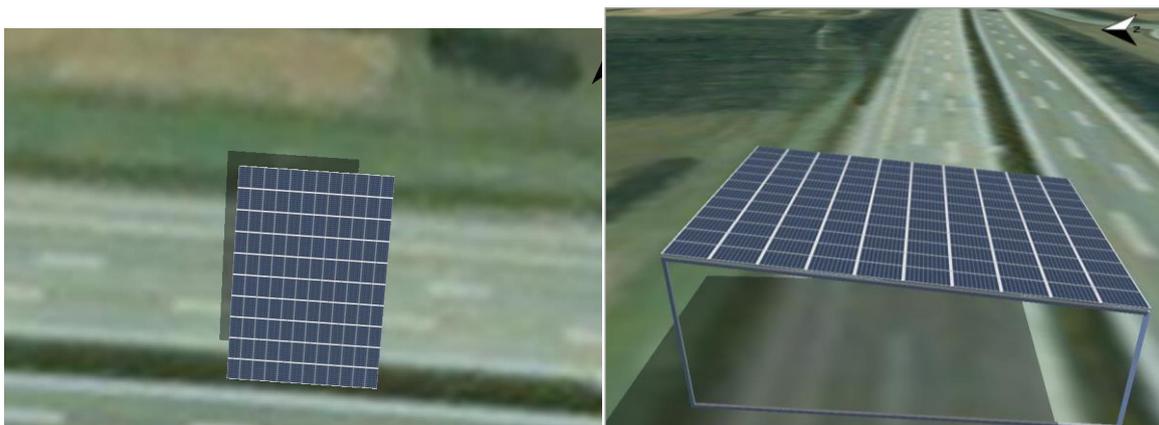


Abbildung 91: Variante Pultdach mit Süd-Orientierung der PV Module für den Standort St. Pölten

Standortwahl HEGAU

Die Standortwahl in Abstimmung mit den Auftraggebern fiel auf Hegau, da dieser Standort genügend Verbraucher und geeignete Zu- und Abfahrtswege aufweist (Kapitel 3.5.3; f)

T+R Anlage Hegau an der A 81 (Engen, LK Konstanz),

- Koordinaten: 47.862292, 8.785754
- Vorteile:
 - Lage im „Drei-Länder-Eck D-A-CH“,
 - Anschluss an Stromnetz + augenscheinlich geeignete Verkehrsflächen für Aufbau vorhanden
 - Montage an der Autobahnausfahrt (z.B. Hegau Ost)

Die vorläufige Positionierung der Anlage für die Zwecke der Berechnung ist in Abbildung 92 dargestellt. Für beide Dacharten (Abbildung 93) wurden die Energieertragsberechnungen über den Jahresverlauf durchgeführt und im Vergleich in Abbildung 94 dargestellt.

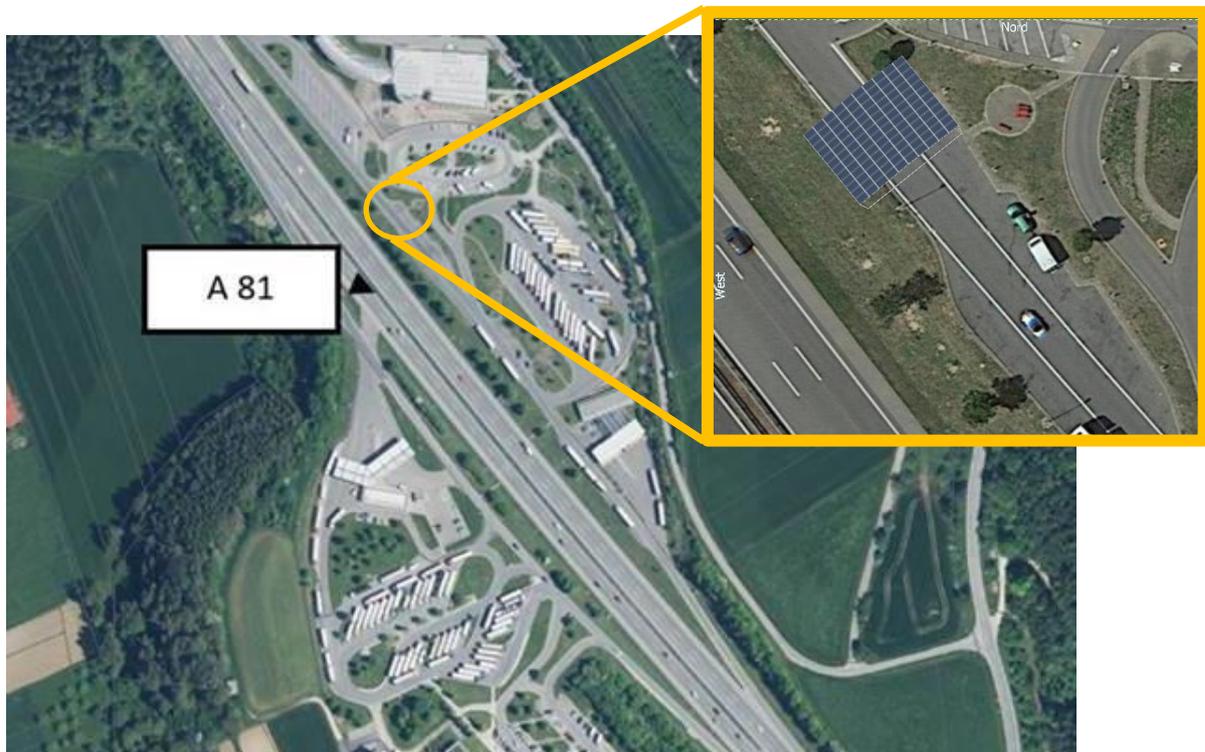


Abbildung 92: Vorläufige Positionierung der PV-SÜD Demonstrator Anlage am Standort Hegau Ost für die Ertragsberechnung



Abbildung 93: Variante Satteldach (links) und Pulldach (rechts) für den Standort Hegau Ost

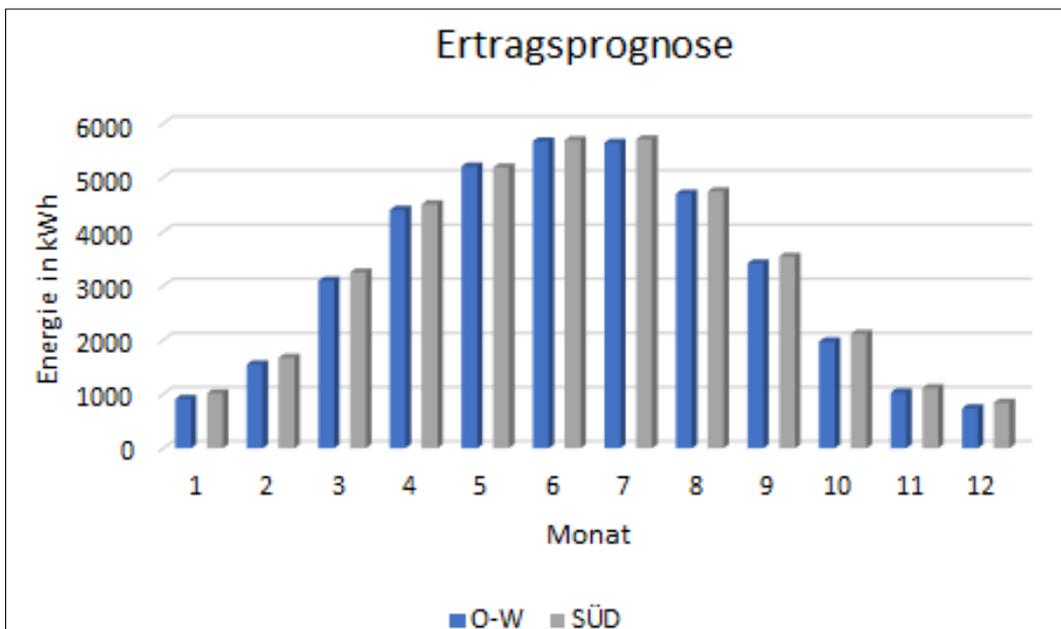


Abbildung 94: Am Standort Hegau erzeugt die PV-Anlage auf dem Pulldach mit 40° nach Westen orientiert mehr Energie in jedem Monat im Jahr als die Variante mit dem Satteldach (O/W).

Weiters wurden unterschiedliche PV-Modultechnologien am Standort Hegau am Pulldach mit vorrangiger Süd-Ausrichtung verglichen. Es wurde das Modul Solar Vision 315W von Solarwatt mit dem bifazialen Modul JAM60D09 315/BP von JASolar verglichen. Die Ertragsprognosen und Anlagenkennzahlen für beide Varianten sind in Tabelle 12 und Abbildung 95 zusammengefasst. Mit der Simulation konnte gezeigt werden, dass die bifaziale PV Module in diesem Fall nur einen geringen Mehrertrag bringen. Die weiteren Vergleichsrechnungen und Simulationen wurden daher auf den einseitig aktiven Solarwatt Modulen aufgebaut.

Tabelle 12: Berechnete Jahresenergieerträge für einseitige PV Module und beidseitig wirkende PV Module (bifazial)

	Hegau (S) SolarWatt	Hegau (S) JaSolar (bifazial)	Einheit
PV-Generatorleistung	37,8	37,8	[kWp]
Generatorfläche	199,6	201,8	[m ²]
Modulanzahl	120	120	Stk
Modul	60 Zellen Modulgröße: 1680mmx990mm	60 Zellen Modulgröße: 1682mmx1000mm	
Spez. Jahresertrag	1 041,17	1 058,89	[kWh/kWp]
Anlagennutzungsgrad	88	89,8	[%]
Netzeinspeisung	39 379	40 048	[kWh/Jahr]

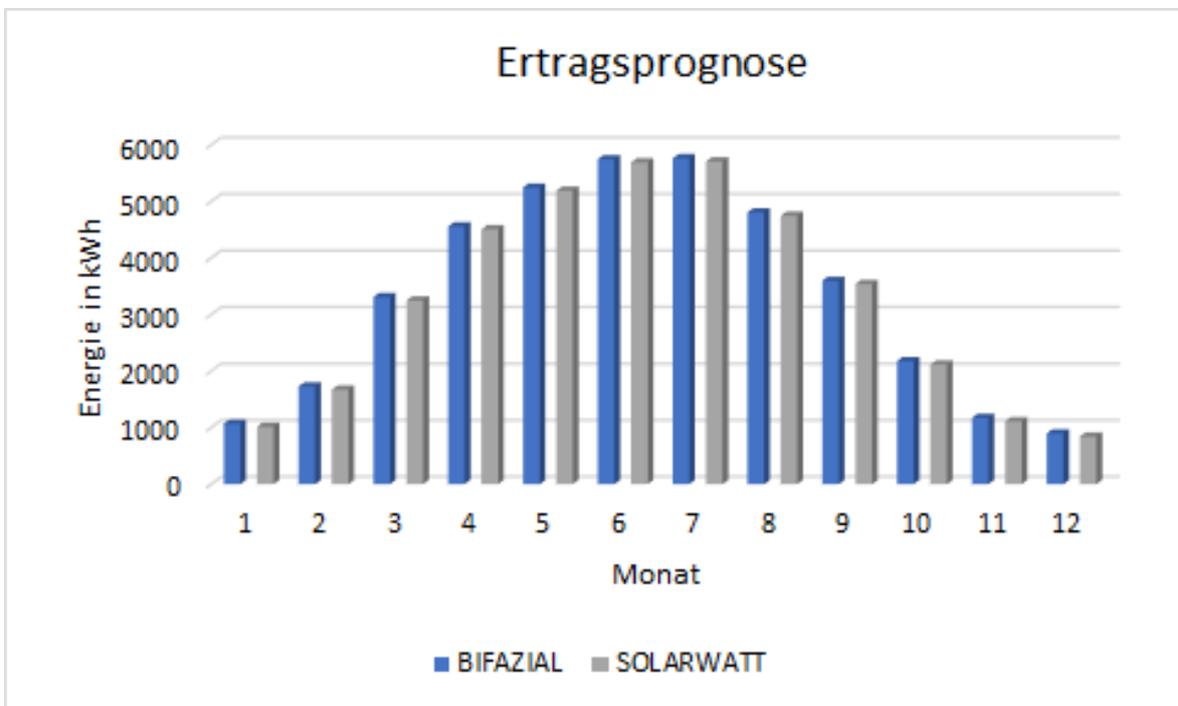


Abbildung 95: Ertragsprognose je Monat im Jahresverlauf im Vergleich zwischen einseitigem SolarWatt PV Modul und bifazialen PV Modul von JaSolar

6.2 Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur

Neben der Energiegewinnung durch die Photovoltaik sind durch die Überdachung und die damit einhergehende teilweise Abschirmung von direkter Sonneneinstrahlung und Niederschlägen auch Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur zu erwarten, die im Folgenden betrachtet werden. Insbesondere wurden diese Themen analysiert:

- Veränderung der Temperaturen, die in der darunterliegenden Fahrbahndecke auftreten
- Veränderungen wesentlicher Oberflächenparameter wie Ausmaß und Häufigkeit von Rissen, Tiefe von Spurrinnen und Griffigkeit
- Abschätzung der Auswirkungen dieser Veränderungen auf die effektive Lebensdauer der Fahrbahn
- Veränderung der Schallausbreitung und der Schallimmission an relevanten Immissionspunkten durch Einsatz der Überdachung und Wechselwirkung mit Lärmschutzwänden unterschiedlicher Höhen

6.2.1 Auswirkung der Temperatur auf die Fahrbahnschädigung

Temperatur ist einer der treibenden Faktoren in der Schädigung von Fahrbahnoberflächen. Die tatsächliche Fahrbahntemperatur ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, ganz wesentliche Umwelteinflüsse sind neben der Lufttemperatur die Globalstrahlung, welche sich in Abhängigkeit vom Rückstrahlvermögen (Albedo) unterschiedlich stark auswirkt und die Windgeschwindigkeit. Durch eine Überdachung und die damit einhergehende Beschattung der Fahrbahn kann hier also eine starke Reduktion der Strahlung auf die Fahrbahn erfolgen. Zur Abschätzung der Fahrbahnoberflächentemperatur wurde eine Analyse auf Basis des Modells von Outcalt [45] durchgeführt. In Tabelle 13 sind die in der Analyse nicht variierten Parameter zusammengefasst. Ziel der Analyse ist eine Abschätzung der Reduktion der Oberflächentemperatur. In der folgenden Analyse (Tabelle 14) wurde eine Reduktion der Globalstrahlung um 80 % bei Überdachung angenommen. Des Weiteren wurde die Albedo variiert. So wurden sowohl für Asphalt als auch Beton Werte für neue wie auch gealterte Oberflächen verglichen.

Tabelle 13: Nicht variierte Parameter in der Oberflächentemperaturabschätzung

Parameter	Wert	Einheit
Stefan-Boltzmann-Konstante	5.67E-08	[W/(m ² K ⁴)]
Von Karman Konstante	0.5	[-]
Luftdichte	1.29	[kg/m ³]
Höhe Lufttemperatur	3	[m]
Oberflächenrauigkeit	0.03	[m]
Albedo	0.3	[-]
Adiabatisches Temperaturgefälle	9.80E-03	[K/m]
Tiefe der Untergrundtemperatur	0.2	[m]
Wärmeleitfähigkeit	0.72	[W/(m*K)]
Diffuse Strahlung	0	[W/m ²]
Bodentemperatur in 20cm Tiefe	20	[°C]
Strahlung	900	[W/m ²]
Windgeschwindigkeit	1	[m/s]

Tabelle 14: Oberflächentemperaturabschätzung mit und ohne Überdachung

Oberfläche	neuer Asphalt	gealterter Asphalt	neuer Beton	gealterter Beton
Albedo	0.04	0.15	0.45	0.3
Oberflächentemperatur [°C] ohne Überdachung bei 25 °C Lufttemperatur (100% Einstrahlung)	48.8	45.5	36.4	41
Oberflächentemperatur [°C] ohne Überdachung bei 25 °C Lufttemperatur (20% Einstrahlung)	25.2	24.6	22.7	23.6
Temperaturdifferenz [K] durch Beschattung bei 25 °C Lufttemperatur	-23.6	-20.9	-13.7	-17.4
Oberflächentemperatur [°C] ohne Überdachung bei 35 °C Lufttemperatur (100% Einstrahlung)	53.9	50.6	41.6	46.1
Oberflächentemperatur [°C] ohne Überdachung bei 35 °C Lufttemperatur (20% Einstrahlung)	30.6	29.9	28	29
Temperaturdifferenz [K] durch Beschattung bei 55 °C Lufttemperatur	-23.3	-20.7	-13.6	-17.1

In der Analyse wird ersichtlich, dass der Temperaturunterschied weniger von der Lufttemperatur als viel mehr von der Globalstrahlung beeinflusst wird. Wie zu erwarten steigt der Einfluss der Globalstrahlung mit abnehmender Albedo. Bei Asphalt, je nach Alter,

ergibt sich eine Reduktion der Temperatur von 23,3 K bzw. 20,7 K. Bei Beton ergibt sich einer Reduktion von 13,6 K bzw. 17,1 K.

6.2.1.1 Temperaturabhängigkeit der bleibenden Verformung von Asphalt

In Schindler [44] wurde für verschiedene in Deutschland hergestellte Asphalte (Tabelle 15) Versuche zum Verformungsverhalten diesen Baustoffen durchgeführt. Asphalt ist ein äußerst komplexer Baustoff, dessen Verhalten von einer Vielzahl von Parametern abhängt. Wesentlich in dem hier betrachteten Kontext ist allerdings der Einfluss der Temperatur auf das Verformungsverhalten, welcher ein sehr großer ist. Dies kann beim Betrachten des E-Moduls in Abhängigkeit von der Temperatur gut veranschaulicht werden (Abbildung 96). So beträgt der E-Modul bei 40°C nur noch rund ein Zwanzigstel von jenem bei 0°C. Der E-Modul gibt allerdings noch nicht direkt Auskunft über die bleibende Verformung, welche ja letztlich für das Entstehen von Spurrinnen verantwortlich ist. In [44] wurde in diesem Zusammenhang ein Versuch durchgeführt, bei welchem auf die eben erwähnten Asphaltarten 16000 Lastwechsel bei einer gleichbleibenden Amplitude (0,3 MPa) und variierenden Temperaturen (30 °C, 40 °C und 50 °C) wie auch Frequenzen (10 Hz, 5Hz und 3,33Hz) aufgebracht wurden (Abbildung 97). Ergebnis dieser Analyse ist, dass die Dauerverformung bei 30 °C zwischen ca. 40 % und 70 % kleiner ist als jene bei 50 °C. Wird also eine Reduktion der Oberflächentemperatur des Asphalts um 20 °C erreicht kann mit großer Wahrscheinlichkeit von zumindest einer Halbierung der Spurrinnentiefe ausgegangen werden. Ebenfalls ersichtlich wird, dass der Faktor Temperatur eine größere Rolle als die hier verwendete Einwirkungsgeschwindigkeit spielt. Die Verminderung der Spurrinnentiefe durch Beschattung wird auch im Kapitel 6.2.2 ersichtlich.

Tabelle 15: Von Schindler [44] verwendete Asphalte

Asphaltvariante	Abkürzung	Gestein	Bindemittel	Mischwerk
AB 0/11S	AB	Moräne (Wullenstetten)	50/70 (Esso)	Kirchhoff Asphaltmischwerke GmbH & Co. KG Stuttgart Weilimdorf
SMA 0/11S (Norddeutschland)	SMA I	Gabbro (Bad Harz- burg)	PmB45 A (Caribit, Shell)	ISV Ilseder Mischwerke GmbH & Co. KG Osloss
SMA 0/11S (Süddeutschland)	SMA II	Moräne (Wullenstetten)	PmB45A (Olexobit, BP)	Asphaltmischwerke Donau-Iller GmbH & Co. KG Ehingen
OPA 0/8	OPA	Kiessplitt	PmBH (Olexobit 40- 100/65H, BP)	Hohenloher Asphalt- Mischwerke GmbH & Co. KG Heilbronn
ABi 0/16S	ABi	Moräne (Wullenstetten)	PmB45A (Olexobit, BP)	Asphaltmischwerke Donau-Iller GmbH & Co. KG Ehingen
ATS 0/32CS	ATS	Muschelkalk (Mönsheim)	50/70 (Esso)	Kirchhoff Asphaltmischwerke GmbH & Co. KG Mönsheim

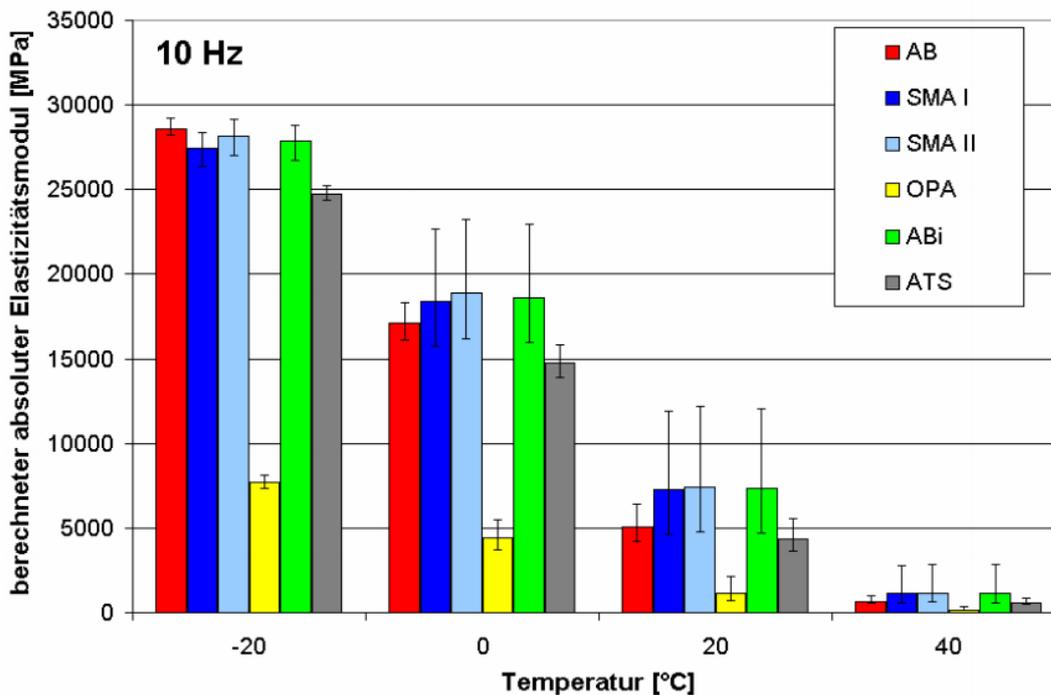


Abbildung 96: Abhängigkeit des E-Moduls verschiedener Asphaltarten in Abhängigkeit von der Temperatur [44]

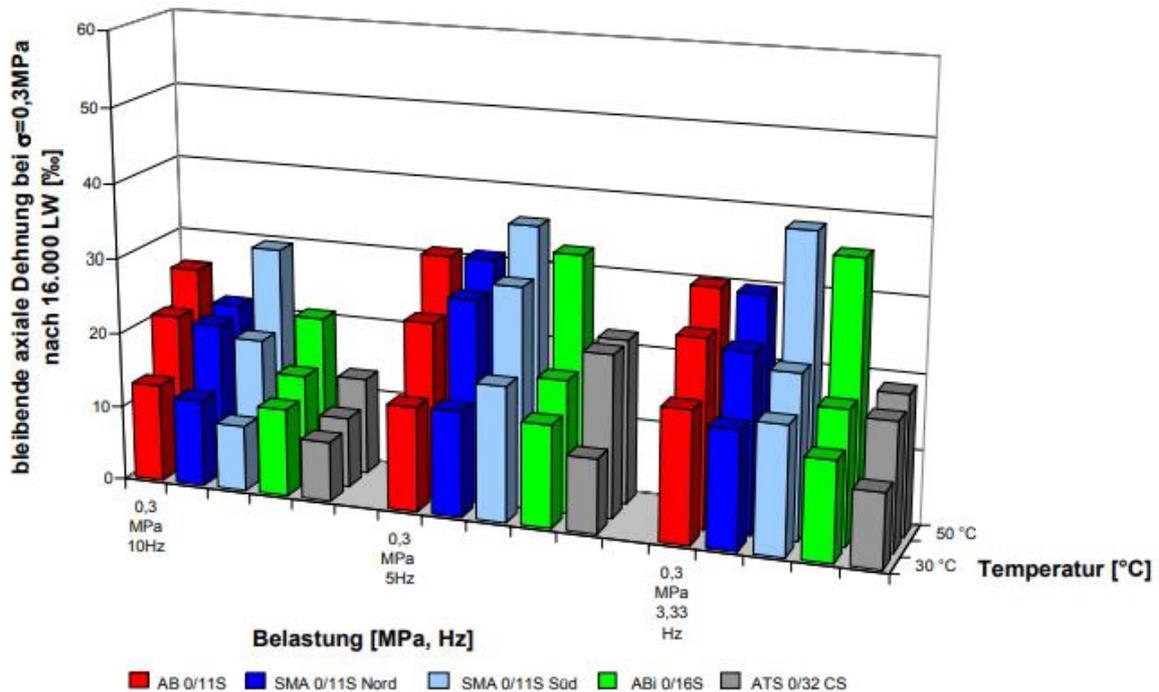


Abbildung 97: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 Lastwechseln im Dauerschwingversuch für verschiedene Asphaltvarianten [44]

6.2.1.2 Temperaturabhängige Beanspruchung von Betonfahrbahndecken

Der Temperaturgradient (= Maß für die Form des Temperaturverlaufs über Plattenstärke), welcher wiederum stark von der Oberflächentemperatur geprägt wird, ist für eine Reihe von Schadensbildern mitverantwortlich. Je nachdem ob eine positiver oder negativer Temperaturgradient in der Fahrbahn vorherrscht, wölben (Abheben in Plattenmitte) bzw. schüsseln (Abheben der Plattenränder) sich die Platten einer Betonfahrbahn auf (Abbildung 98). Die daraus resultierenden Verformungen ergeben in Kombination mit der äußeren Verkehrsbelastung unterschiedliche Beanspruchungen und Plattenspannungen. Für die Ausprägung des Spannungszustandes der Fahrbahnplatten spielt aber auch die Größe des Gradienten eine entscheidende Rolle. Allgemein konnte in zahlreichen Untersuchungen als auch im Abgleich mit realen Messwerten gezeigt werden, dass sowohl bei reiner Temperaturbelastung als auch bei gleichzeitiger Einwirkung von Verkehrslasten die Hauptzugspannungen steigen, umso negativer bzw. positiver der Temperaturgradient wird.

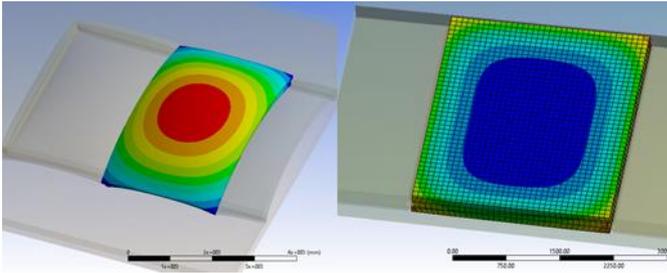


Abbildung 98: Modellierung der Platten und der umgebenden Fahrbahn bei einer Aufwölbung am Tag (links) und einer Aufschüsselung in der Nacht (rechts).

In einer messdatengestützten Simulationsauswertung einer Betonfahrbahn aus Fertigteilen von Betonfahrbahnplatten in Prammer et al [43] wird eine deutliche Reduktion der zu erwartenden Hauptzugspannungen in Betonfahrbahnplatten bei einer Halbierung des Temperaturgradienten sichtbar (Tabelle 16). So ist die maximale Hauptzugspannung bei einem Temperaturgradienten von 0,45 K/cm bei der Überfahrt eines 40 t LKWs um rund 30 % niedriger als jene bei einem Gradienten von 0,9 K/cm. Unter Eigenlast beträgt die Reduktion sogar rund 50%. Durch Beschattung ist aber nicht nur mit einer Verringerung der positiven Gradienten (LF1 und LF2) zu rechnen, da große negative Gradienten (LF3 und LF4) üblicherweise auch im Zusammenhang mit einer vorangegangenen starken Erhitzung stehen und daher, wie auch extreme positive Gradienten, in der warmen Jahreshälfte auftreten (Abbildung 99). Bei den negativen Gradienten kann sowohl unter Eigenlast als auch unter Verkehrsbelastung eine Reduktion der Hauptzugspannung von 50 % bei Verringerung des Gradienten von -0,5 auf -0,25 erreicht werden.

Tabelle 16: Relevante Ergebnisse der transienten Analyse aus kombinierter Belastung (Temperatur und Überfahrt 40 t LKW) bei realen Fahrbahnoberflächen und 10 mm Plattenversatz [43].

Temperatur Lastfall	Temperaturgradient dT/dz [K/cm]	Berechnete maximale Hauptzugspannung unter Eigenlast [MPa]	Berechnete maximale Hauptzugspannung unter kombinierter Last [MPa]
LF1 (Tag extrem)	0,9	2,53	3,59
LF 2 (Tag typisch)	0,45	1,34	2,58
LF 3 (Nacht extrem)	-0,5	2,26	2,42
LF 4 (Nacht typisch)	-0,25	1,12	1,27

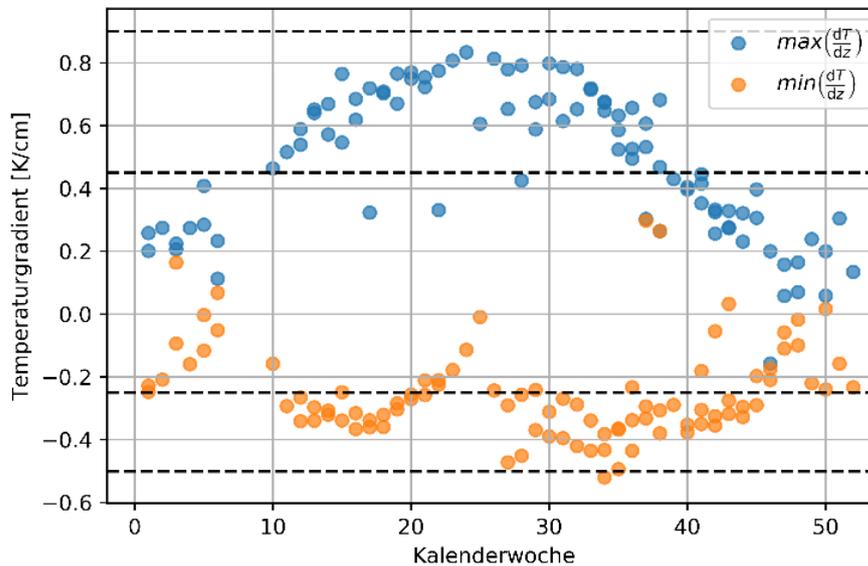


Abbildung 99: Aus eine Temperaturdauermessung an einer Betonfahrbahn im Bereich der A1 Anschlussstelle St. Valentin (AT) des Messzeitraums von 26 Monaten (22.8.2018 bis 21.10.2020) abgeleitete maximale und minimale Temperaturgradienten pro Kalenderwoche. Strichliert sind die Temperaturgradienten nach Tabelle 16 zum Vergleich [43].

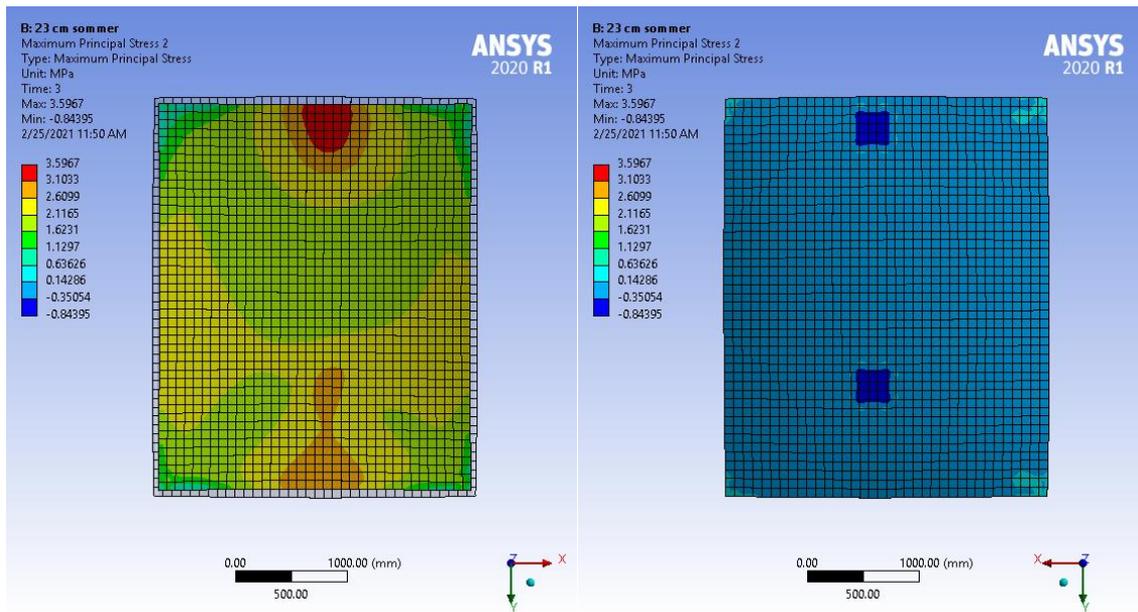


Abbildung 100: Hauptzugspannungen der Plattenober- (links) und Plattenunterseite (rechts) der mit einer Achse belasteten Betonfahrbahnplatte unter einem positiven Temperaturgradienten von 0,9 K/cm.

Ein weiteres Schadensbild von Betonfahrbahnen, welches in Zusammenhang mit Extremtemperaturen gebracht wird, ist die Schädigung durch extreme Längsdehnung der Fahrbahn. Der sogenannte „Hitzeschaden“, „Hitzaufbruch“ oder „Blow Up“ ist abhängig von der Nullspannungstemperatur, also jener Temperatur, bei welcher die Fahrbahn bei geschlossenen Fugen spannungsfrei ist. Sobald die Nullspannungstemperatur überschritten wird, treten in Längsrichtung Druckspannungen auf (Abbildung 101). Umso tiefer die Nullspannungstemperatur also liegt, umso anfälliger ist die Fahrbahn für dieses Schadensbild [46]. Villaret [46] zeigt in diesem Zusammenhang, dass ein Übersteigen der Nullspannungstemperatur um 20 K bereits zu Schäden führen kann. Wird also eine Temperaturreduktion durch Beschattung von 13 K-17 K wie in Tabelle 14 erreicht, kann in diesem Zusammenhang von einer deutlichen Verbesserung der Situation durch Überdachung ausgegangen werden. Zur Veranschaulichung der Problematik ist in Abbildung 102 ein Fugenriss durch Spannungen in Längsrichtung dargestellt. Abbildung 103 zeigt die Verformung einer in Betonfahrbahn bei überschreiten der Nullspannungstemperatur um 20 K bei räumlich variablen Randbedingungen (Plattendicke, Reibung, Kerbtiefe, Materialeigenschaften, Verkehrslast, nicht linearer Temperaturverlauf über den Querschnitt und lokale Materialschwächung).

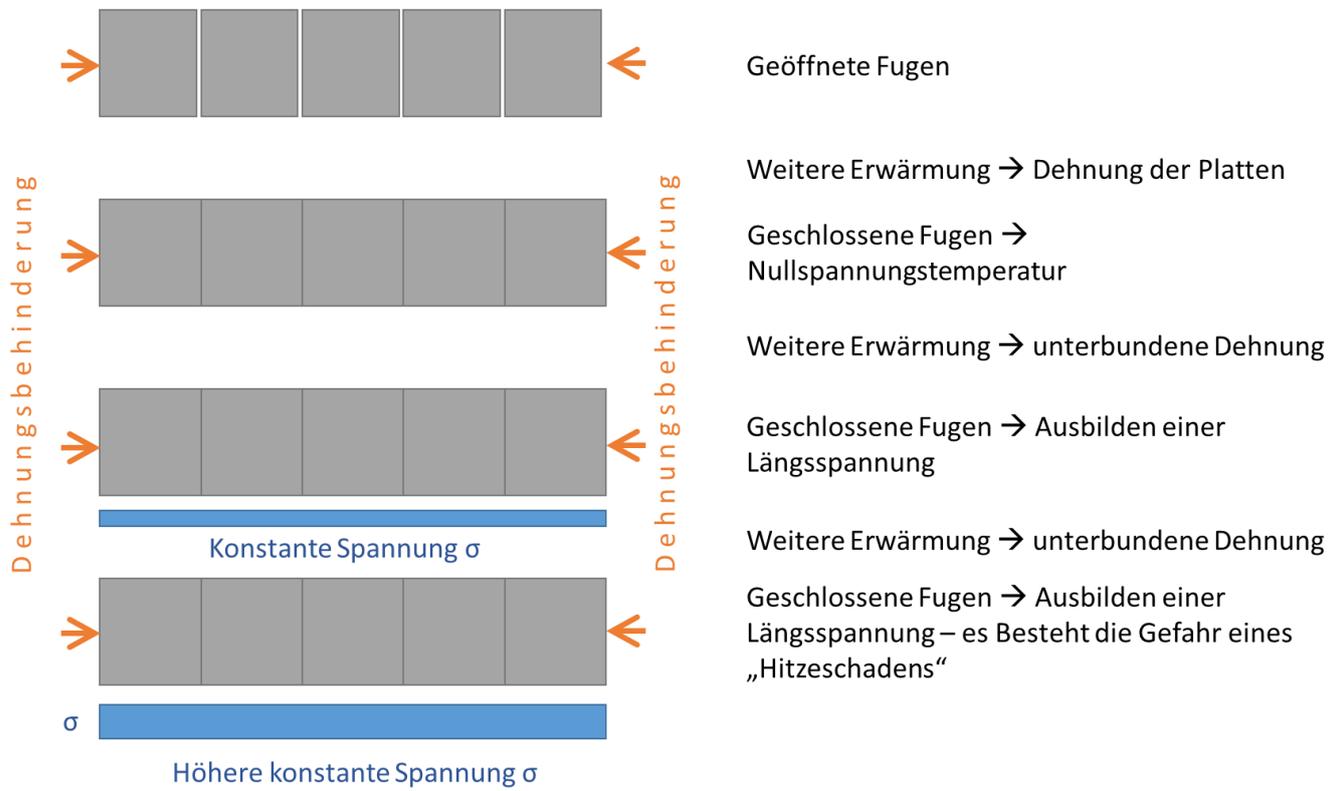


Abbildung 101: Verhalten und Längsspannungsaufbau eines Fahrbahnplattensystems unter steigender Temperatur

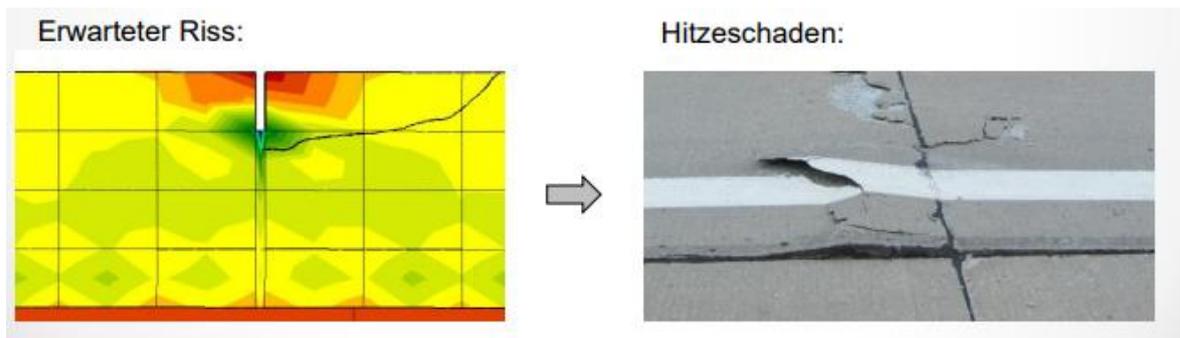


Abbildung 102: Rissbildung im Fugenbereich bei längsspannungsbeanspruchten Betonfahrbahnen [46].

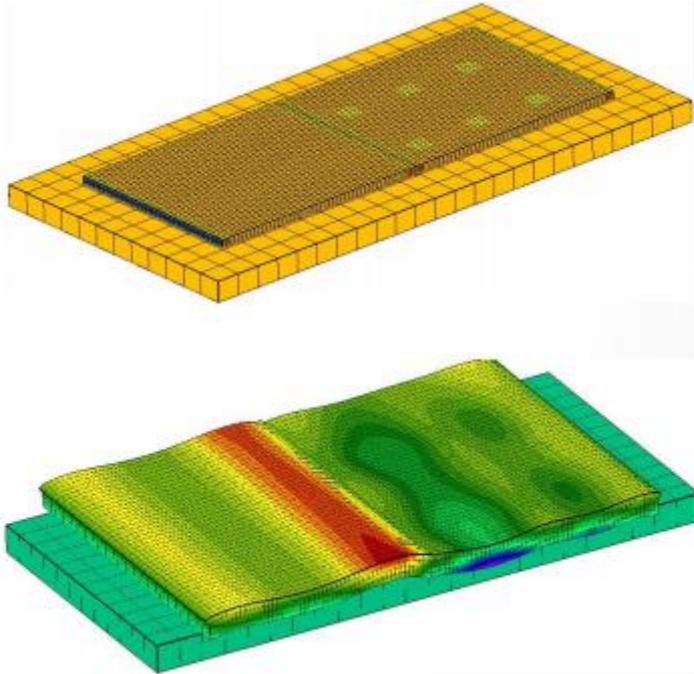


Abbildung 103: Verformung einer längsspannungsbeanspruchten Fahrbahnplatte in einer Simulation mit variierten Randbedingungen [46].

6.2.2 Datenbasierte Auswertung der Fahrbahnschädigung unter Überdachungen

Im Zuge des Projekts fand eine Auswertung von Straßenbelagszustandsdaten eines Teils des österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetzes statt. Ziel der Analyse war die Quantifizierung der Änderung der Griffigkeit, der Querunebenheitstiefe (Spurrinntiefe) und des Rissanteils unter breiten Brücken im Vergleich zu Bereichen vor und nach der durch sie überdachten Strecke anhand von vorausgewerteten Belagsdaten, welche mit dem RoadSTAR im Jahr 2018 erfasst wurden. Der Fokus der Analyse lag auf breiten Brücken ab einer Überdachungslänge von 30 m. Hier ist die Vergleichbarkeit der Änderung im Gegensatz zu Tunnel weitaus besser gegeben ist, da es im Bereich von Tunnelportalen meist einen Wechsel des Belags gibt.

In der Analyse wurden die Fahrbahnbeläge der ersten Fahrspur unter 36 Brücken einer Breite von 30 m bis 101 m entlang der österreichischen A2, A3, A4, A10, A22 und S1 bewertet. In 14 Fällen handelte es sich um ein Betonbelag, in 22 Fällen um ein Asphaltbelag. Das Alter des Belags war in dieser Auswertung nicht bekannt. Es wurde mittels eines Auszugs des Pavement Management Systems der ASFINAG überprüft, ob es

in den betrachteten Abschnitten einen Belagswechsel gibt, sofern dies der Fall war, wurde der Bereich nicht in die Auswertung miteinbezogen. Außerdem war es nötig den genauen Ort (Kilometrierung) der Abschnitte manuell zu kontrollieren und gegebenenfalls anzupassen. Alle Werte der folgenden Grafiken beziehen sich auf den Mittelwert des Vergleichsbereichs von 150 m vor und nach der die Autobahn überspannenden Brücke.



Abbildung 104: Messfahrzeug RoadSTAR des AIT.

Die Griffigkeitsmessung des RoadSTAR erfolgt nach RVS 11.06.65 [42] Teil V. wie in Abbildung 105 dargestellt handelt es sich beim Reibungsbeiwert μ um Kraftverhältnis aus Bremskraft und Radlast des genormten Messreifens auf bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h am 0,5 mm dicken Wasserfilm.

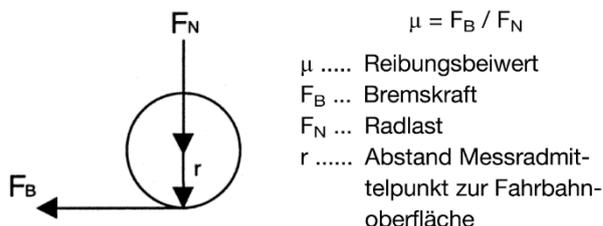


Abbildung 105: Ermittlung des Reibungsbeiwerts μ nach RVS 16.06.65 [42].

Die Ergebnisse der Datenauswertung im Folgenden sind immer als absolute Änderung des Reibungsbeiwerts dargestellt. In Abbildung 106 und Abbildung 107 ist also zu sehen, dass

sich dieser im Schnitt um ca. 0,04 und 0,08 unter breiten Brücken vermindert – die Griffigkeit verringert sich also. Dies Änderung tritt nicht abrupt auf, sondern passiert in den ersten 15 m nach Überdachungsbeginn. Einen Unterschied scheint hier die Belagsart zu machen (Abbildung 106 und Abbildung 107), während die absolute Abnahme des Mittelwertes des Reibungsbeiwerts von Betonbelägen zwischen 0,05 und 0,1 liegt, liegt der Wert bei Asphaltbelägen nur zwischen 0,03 und 0,04.

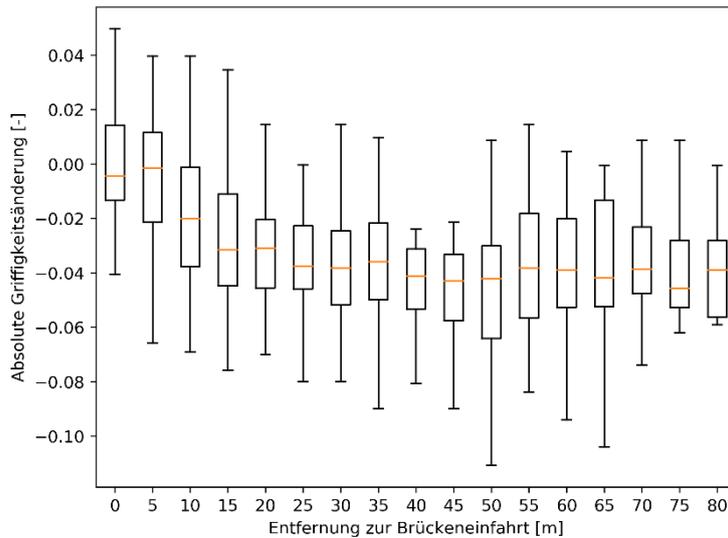


Abbildung 106: Griffigkeitsverlust von Autobahnen mit Asphaltbelag unter breiten Brücken

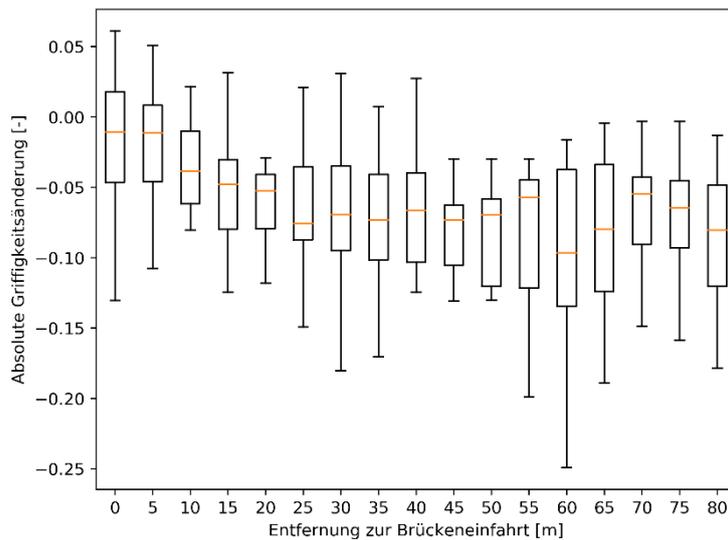


Abbildung 107: Griffigkeitsverlust von Autobahnen mit Betonbelag unter breiten Brücken.

Die Querebenheitsdaten wurden mit dem RoadSTAR nach RVS 16.06.65 [42] Teil VII aufgenommen. Wie eingangs beschrieben ist hier aufgrund der Beschattung des Belages und der damit verbundenen geringeren Erhitzung bei Asphaltoberflächen mit einer verringerten Bildung von Spurrinnen zu rechnen. Bei Betonoberflächen wird bei der Querebenheit mit keiner Änderung gerechnet. Dies bestätigt auch die Auswertung. Bei Asphaltbelägen wird eine Verringerung der Änderung der Querebenheit von etwas weniger als 2 mm beobachtet (siehe Abbildung 108), Extremwerte reichen von einem Rauschen um 0 mm bis zu einer Unebenheitstiefe von 6 mm.

Bei Betondecken ist im Vergleich zu den Referenzflächen kein Unterschied zu erkennen (siehe Abbildung 109).

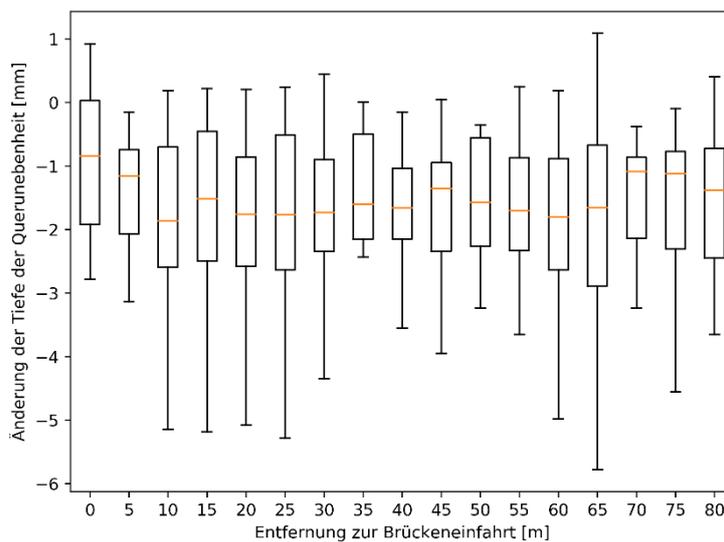


Abbildung 108: Änderung der Querebenheitstiefe (Reduktion der Spurrinentiefe) von Autobahnen mit Asphaltbelag unter breiten Brücken

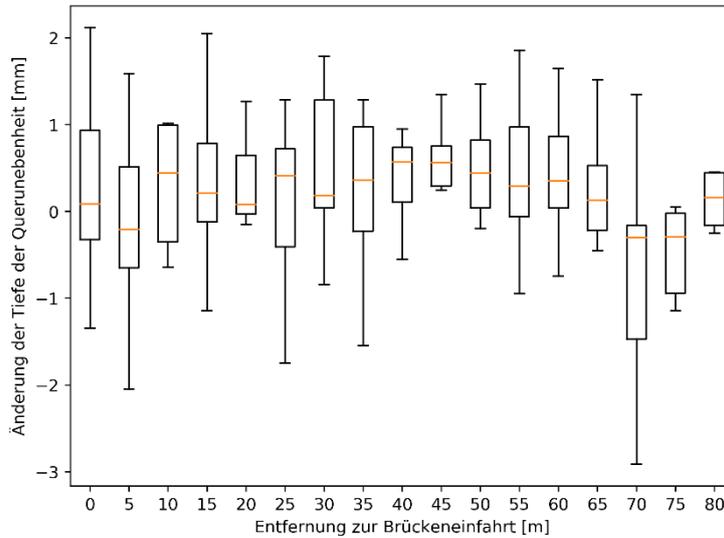


Abbildung 109: Änderung der Querebenheitstiefe (Reduktion der Spurrinntentiefe) von Autobahnen mit Betonbelag unter breiten Brücken.

Die Daten der Bewertung des Schadensausmaßes durch Risse wurde aus Oberflächenscandaten des RoadSTAR nach RVS 13.01.16 [41] bewertet. Da Risse häufig diskret, also nicht über einen längeren Abschnitt mehr oder weniger konstant auftreten, wird hier des prozentuelle Schadensmaß des Vergleichsbereich mit jenem unter der Brücke verglichen. Für Asphaltfahrbahnen konnte hier so gut wie kein Unterschied festgestellt werden, in beiden Bereichen lag der Mittelwert des Schadensmaßes bei 0,12 %. Im Gegensatz dazu wurde Betonfahrbahnen schon ein Unterschied festgestellt (siehe Abbildung 110). Hier lag das Schadensmaß unter der Brücke mit 0,06 % um das ca. 5-Fache niedriger als im Vergleichsbereich mit 0,35% (siehe Abbildung 111).

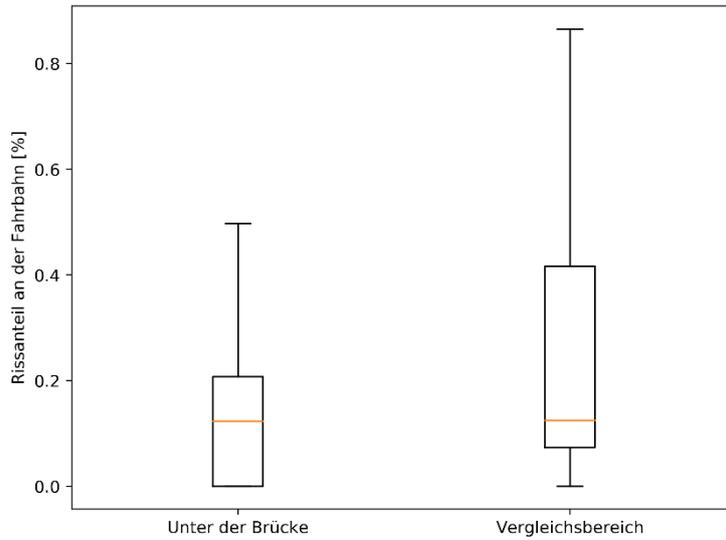


Abbildung 110: Prozentueller Rissanteil von Autobahnen mit Asphaltbelag unter breiten Brücken und im Vergleich zu Bereichen vor und nach der Überdachung

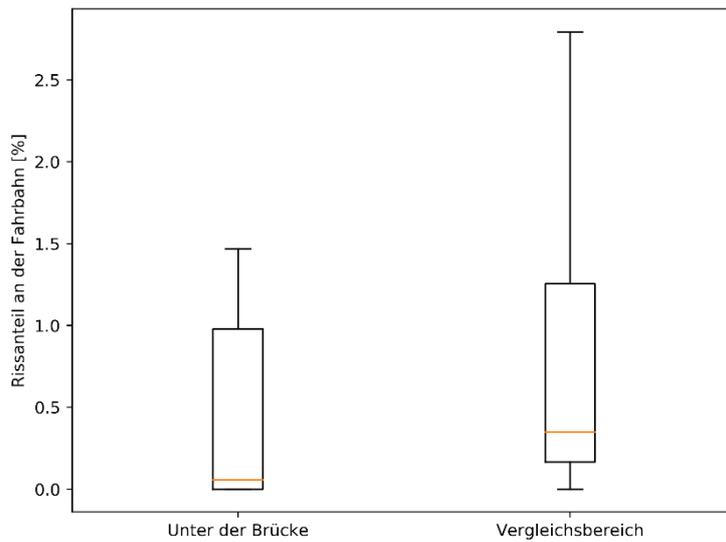


Abbildung 111: Prozentueller Rissanteil von Autobahnen mit Betonbelag unter breiten Brücken und im Vergleich zu Bereichen vor und nach der Überdachung

6.2.3 Abschätzung des Lebensdauererlängerung des Straßenoberbaus

Um Aussagen abzuleiten zu können, welche Auswirkung Beschattung auf die theoretische Lebensdauer des Straßenoberbaus hat, wird in diesem Kapitel in einem ingenieurmäßigen Ansatz unter Heranziehung des Handbuch Pavement Management 2009 [47] und der Ergebnisse des Kapitels 6.2.2 eine Abschätzung dahingehend vorgenommen. Im Zuge dieser Abschätzungen werden genaue Belagsaufbauten und statistische Schwankungen oder detaillierte physikalische Schädigungsmechanismen vernachlässigt – es handelt sich wie gesagt nur um einen groben Richtwert. Aus demselben Grund wurde auch auf eine Bewertung nach in Deutschland üblichen Degradationskurven nach Hinsch et al. [48] verzichtet.

Laut Pavement Management Handbuch beträgt die theoretischen Bemessungs-Lebensdauern von Asphaltfahrbahnen 20 Jahre und von Betonfahrbahnen 30 Jahre.

Alle im Folgenden durchgeführten Abschätzungen erfolgten auf Basis der jeweiligen theoretischen Zustandsgröße im Handbuch Pavement Management 2009 [47]. Die Griffigkeit wird also als Reibungsbeiwert (siehe Abbildung 105), die Spurrinntiefe als Tiefe in Millimeter und der Rissanteil wird als Prozentwert der Rissfläche der Fahrbahn angegeben. Aus dieser Zustandsgröße wird nun mit der Entsprechenden linearen Normierungsfunktion der Zustandswert, ein Wert zwischen 1 (sehr guter Zustand) und 5 (sehr schlechter Zustand), ermittelt.

Für die Griffigkeit ergab die Messung im Mittel eine Reduktion des Reibungsbeiwertes von 0,05. Dieser Effekt ist von Fahrbahnbelägen im Tunnel grundsätzlich bekannt, aber trotz mehrerer Forschungsprojekte ist nicht restlos geklärt, aus welchen Mechanismen sich die Alterung oder Abweichung zusammensetzt. Üblicherweise hat die Polierwirkung den größten Einfluss auf den Griffigkeitsverlust. Im Falle von Überdachungen der Fahrbahn, wie auch durch breite Brücken wird derzeit davon ausgegangen, dass vor allem die Schmierwirkung durch die reduzierte Aus- und Abwaschung von Rückständen des fließenden Verkehrs zur Reduktion der Griffigkeit führt. Effekte wie eine erhöhte Polierwirkung durch verminderte Variation der Spurführung aufgrund einer Verengung des Fahrbahnregelquerschnitts wie sie teilweise in Tunnel vorkommen sind bei Solarüberdachungen nicht zu erwarten. Weiters kommen auch keine Chemikalien wie in der Tunnelreinigung zum Einsatz. Dieser Logik folgend kommt es also wahrscheinlich zu keiner weiteren zusätzlichen negativen Veränderung der Oberflächenstruktur des

Baustoffes – die Griffigkeit ist aufgrund der Schmierwirkung zwar schlechter, als auf freier Strecke, sollte hier aber nicht anders altern.

Die entsprechenden Modelle im Handbuch Pavement Management 2009 zeigen außerdem, der Reibungsbeiwerte hauptsächlich vom initialen Herstellungszustand abhängt, Verschlechterungen erfolgen nur sehr langsam. In der Bewertung in Abbildung 112 wurde davon ausgegangen, dass der Initialzustand des Reibungsbeiwertes 0,77 beträgt. Laut Handbuch Pavement Management kann von einer jährlichen Verschlechterung von 0,0018 ausgegangen werden. Im Vergleich dazu ist der Initialzustand unter der Überdachung um 0,05 geringer, die jährliche Verschlechterung wird aber ebenfalls 0,0018 angenommen.

Daraus folgt, dass Aufgrund einer Überdachung eine einmalige Griffigkeitsreduktion eintritt, aber mit keiner Verkürzung der theoretischen Liegedauer des Belages zu rechnen ist. Vielmehr ist hier der Initialzustand entscheidend.

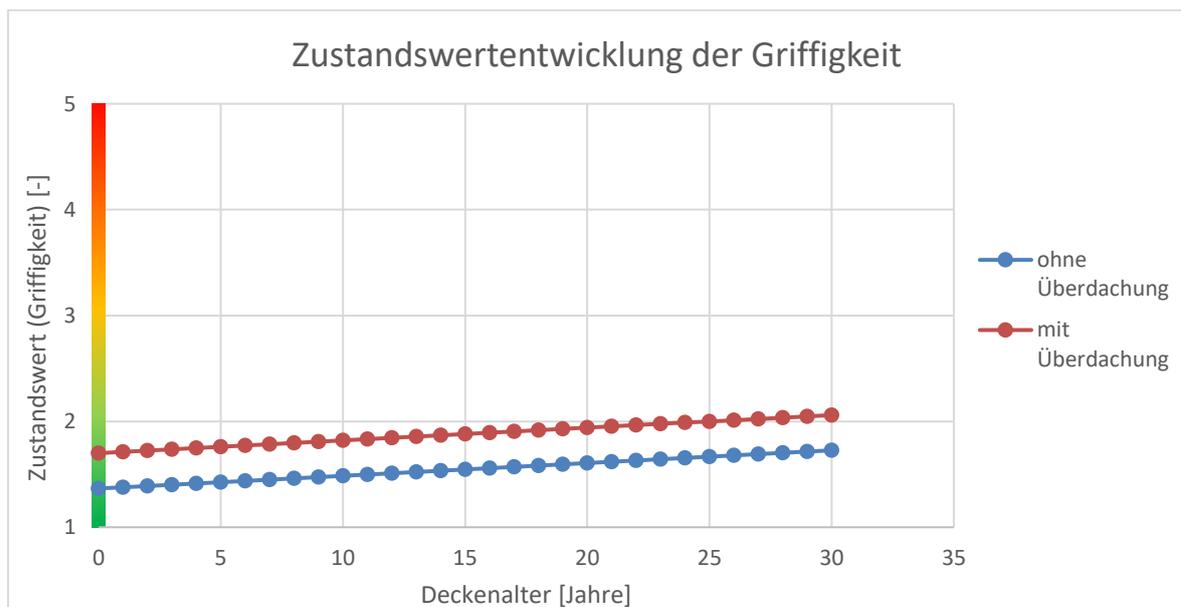


Abbildung 112: Ingenieursmäßige Abschätzung der Veränderung des theoretischen Zustandswertes der Griffigkeit über die Belagslebensdauer

Bei der Bildung von Spurrinnen wurde in Kapitel 6.2.2 ohne Kenntnis des Belagsalters eine Reduktion von etwa 2 mm Spurrinnentiefe bei Asphaltfahrbahnen festgestellt. Da die Bemessungslebensdauer von Asphaltbelägen 20 Jahre beträgt wurden die Parameter der Formel der Zustandsgröße Spurrinnentiefe des Handbuchs Pavement Management so

angepasst, dass im Falle ohne Überdachung der Zustandswert 4 nach 20 Jahren erreicht wird. Zur Anpassung der Parameter für den überdachten Fall wurde nun angenommen, dass das durchschnittliche Belagsalter der Auswertung in Kapitel 6.2.2 10 Jahre (halbe Lebensdauer) beträgt. Daher wurden die Parameter so angepasst, dass die Zustandsgröße nach 10 Jahren 2 mm weniger Eintiefung beträgt. Durch diese Herangehensweise wird der theoretische Zustandswert 4 erst 7 Jahre später erreicht (Abbildung 113).

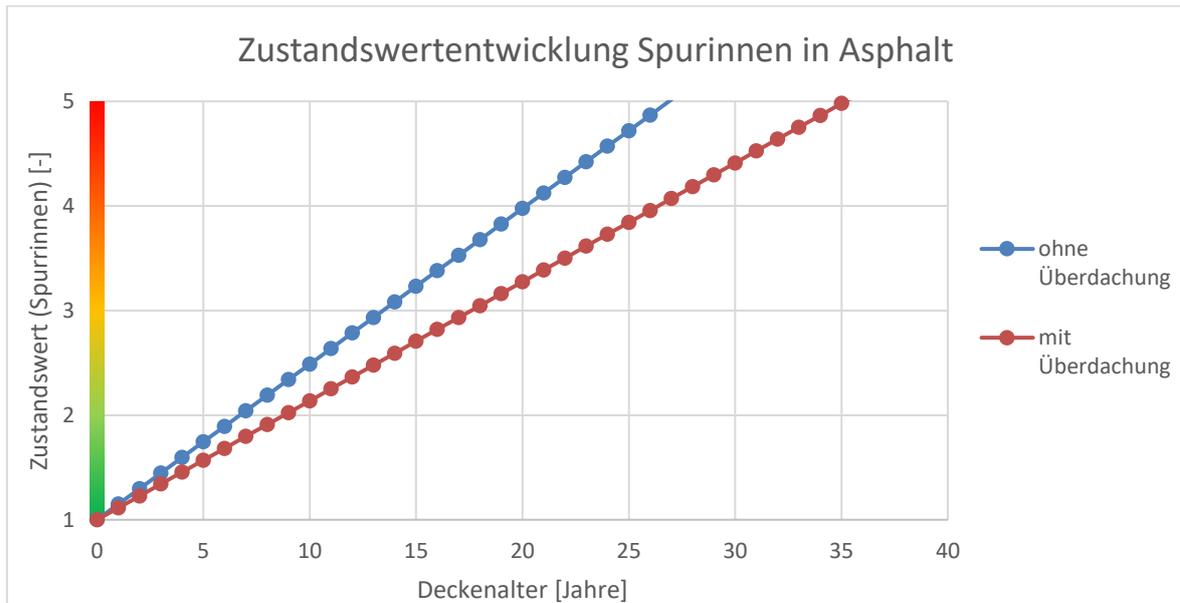


Abbildung 113: Ingenieursmäßige grobe Abschätzung der Veränderung des theoretischen Zustandswertes der Spurrinnen von Asphaltfahrbahnen über die Belagslebensdauer

Die Degradationskurven im des Rissanteils Handbuch Pavement Management sind durch ein exponentielles Wachstum gekennzeichnet. Dies bedeutet, dass Risse erst am Ende der Lebensdauer auftreten und dementsprechend über den Großteil der Lebensdauer sehr selten sind.

Aufgrund der zur Mitte der Lebensdauer noch sehr geringen Zustandsgröße hat ein anpassen der Parameter in diesem Bereich extreme Auswirkungen auf die Kurve am Ende der Lebensdauer. Da die Messwerte eine große Schwankungsbreite aufweisen und auch das Belagsalter unbekannt ist scheint ein Anpassen der Parameter analog zur Vorgehensweise bei den Spurrinnen hier nicht zielführend.

Zur Abschätzung der zusätzlich möglichen Liegedauer wurden also zuerst die Parameter der Kurve ohne Überdachung so angepasst, dass der Zustandswert 4 nach 30 Jahren

erreicht wird. In einer vergleichsweise vorsichtigen Vorgehensweise wurde nun die Kurve für den überdachten Bereich so nach hinten geschoben, dass die gemessene Risschädigung gleichzeitig auftritt. Dies ist bei einem Verschieben der Kurve um 7 Jahren im 17. Beobachtungsjahr der Fall.

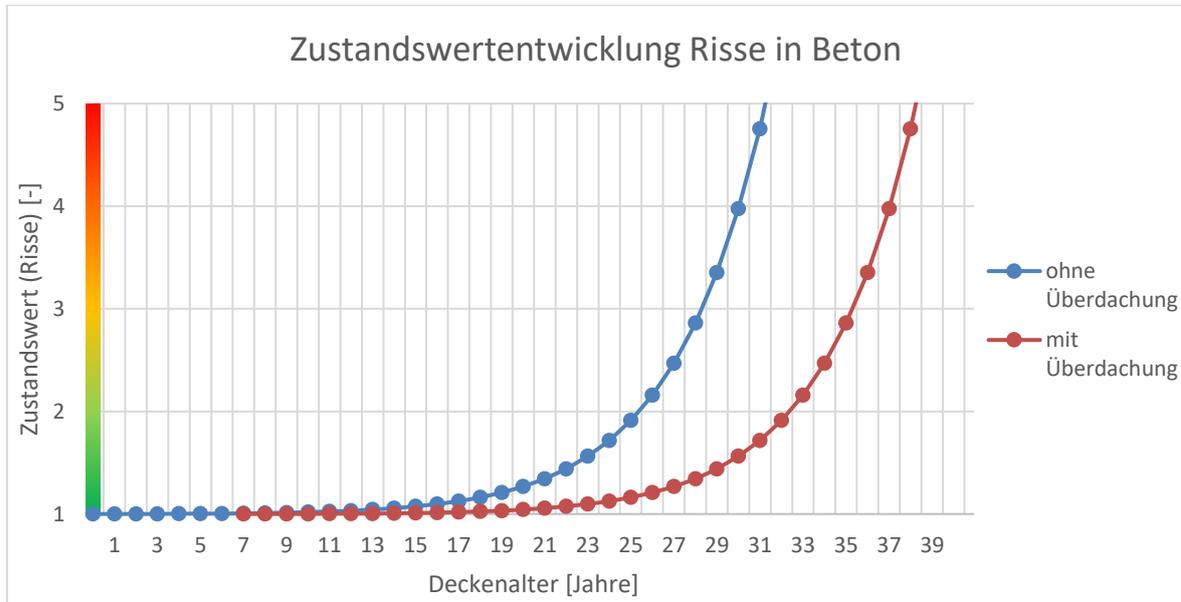


Abbildung 114: Ingenieursmäßige grobe Abschätzung der Veränderung des Zustandswertes der Risse in Betonfahrbahnen über die Belagslebensdauer

Zusammenfassend kann also angemerkt werden, dass es, unter Einbeziehung der Auswertungen von derzeitigen überdachten Autobahnabschnitten wie breiten Brücken in die theoretischen Modelle des Handbuch Pavement Management, zu einer Verlängerung der theoretischen Liegedauern von 20 - 30 % kommt.

6.2.4 Auswirkung der Überdachung auf Schallausbreitung und Lärmschutz

Der von den Fahrzeugen auf einer hochrangigen Straße erzeugte Lärm kann akustisch als Linienquelle über einer im Quellenbereich akustisch reflektierenden Ebene modelliert werden, wobei jedem Fahrstreifen eine Emissionslinie zugeordnet wird. Der von dieser Quelle emittierte Schall breitet sich nun aus, wobei der Schalldruckpegel einerseits mit der Entfernung abnimmt, andererseits aber natürlich auch z.B. durch Hindernisse wie Lärmschutzwände stark reduziert werden kann. Um die Auswirkungen einer PV-Überdachung in akustische Hinsicht zu analysieren, wurde für eine Simulation des

Schallfeldes nach der BEM-Methode (Boundary Element Method bzw. Randelementmethode) eine ebene Geometrie ohne Variation der Geländehöhe gewählt und die Auswirkungen verschiedener Kombination von Überdachungen und Lärmschutzwänden auf Immissionspunkte in bis zu 200 m Entfernung in Höhen von 1,5 m und 4 m über dem Boden untersucht. Das Hauptaugenmerk lag hier nicht auf den absoluten Schalldruckpegeln, sondern auf den durch die Überdachung hervorgerufenen Schalldruckpegeldifferenzen.

Aufgrund der Größe (sowohl Länge als auch Breite) der zu simulierenden Geometrie (Fahrbahnüberdachung und Lärmschutzwände auf etwa 80 m Länge) und der Anforderung das gesamte Verkehrslärmspektrum bis zum 5 kHz-Terzband abzudecken, wurden die Randelementsimulationen für die akustische Bewertung des Fahrbahnquerschnitts in 2D durchgeführt. Da der Fahrbahnquerschnitt näherungsweise als konstant angenommen werden kann, stellt dies eine gute Approximation der Aufgabenstellung dar. Des Weiteren wurde der Boden als vollreflektierend angenommen um auch Mikrofonpositionen in großen Entfernungen (bis zu 200 m) mit vertretbarem Rechenaufwand simulieren zu können. Dies ermöglicht es, die Spiegelquellenmethode (Spiegelung der Quellen und der gesamten Geometrie um die Ebene des Bodens) einsetzen zu können.

Abbildung 115 zeigt eine Übersicht über die simulierten Geometrien. Es wurden zwei Überdachungsvarianten (Nord-Süd und Ost-West) sowie eine Variante ohne Überdachung simuliert. Die betrachteten Lärmschutzwandhöhen waren dabei 0, 2, 3, 4 und 5m. Die Oberflächenadmittanz der Lärmschutzwände wurde frequenzabhängig wie bei einer typischen Aluminiumkassettenlärmschutzwand mit einem DLRI nach EN 1793-5 189[50] von 6,2 dB angenommen, was einer typischen hochabsorbierenden Lärmschutzwand entspricht. Um den Verkehr abzubilden wurden in beide Fahrtrichtungen jeweils 2 Linienquellen in 0,5 m Höhe in der Mitte der beiden inneren Fahrstreifen (3 bzw. 7 m von der Fahrbahnmitte) angenommen. Die Mikrofonpositionen wurden in typischen Höhen von 1.5 und 4 m bzw. in Entfernungen von 5 bis 200 m in 5m Schritten, gemessen von der Rückseite der Lärmschutzwände, auf beiden Seiten angenommen. Beugungseffekte an den vertikalen Stehern der Überdachung wurden nicht betrachtet, da die seitlichen Öffnungen flächenmäßig bei weitem überwiegen und der Haupteffekt durch das eigentliche PV-Dach hervorgerufen wird.

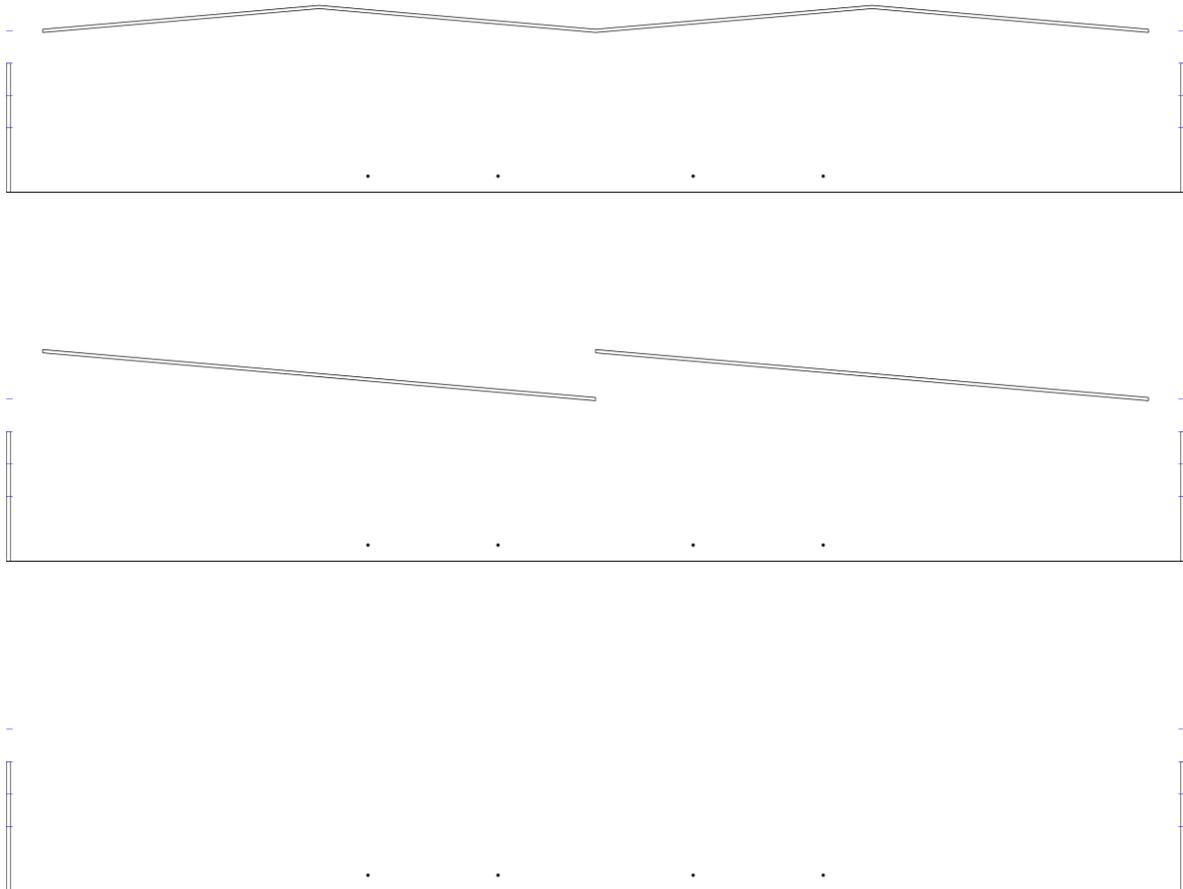


Abbildung 115: Simulierte Geometrien (von oben nach unten): Überdachung bei Fahrbahn in Nord-Süd-Richtung (Satteldach), Überdachung bei Fahrbahn in Ost-West-Richtung (Pulldach), keine Überdachung. Die blauen Marker geben die simulierten Lärmschutzwandhöhen an (0, 2, 3, 4 und 5m). Die Breite der Überdachung beträgt 17 m pro Fahrtrichtung (34 m gesamt). Die Lärmschutzwände befinden sich 1 m neben der Dach-Außenkante. Der Winkel des Dachs beträgt 5 Grad und die Höhe der Dächer beträgt 5 m an deren Unterkanten. Die Punkte repräsentieren die Quellpositionen, sie befinden sich in 0,5 m Höhe und sind jeweils 3 bzw. 7 m entfernt von der Straßenmitte.

Auswertung

In jedem Terzband des Verkehrslärmspektrums nach EN 1793-3 [49] von 100 - 5000Hz wurden 15 Frequenzbereiche logarithmisch verteilt simuliert. Die daraus resultierenden komplexwertigen Schalldrücke (p_{act}) wurden dann für jedes Terzband quadratisch aufintegriert und mit dem Freifeld-Schalldruck (p_{ff}) ohne Wand und ohne Überdachung regelmäßig verglichen.

$$L_i = 10 \log \left(\frac{\int_{\Delta f_i} |p_{act}|^2 df}{\int_{\Delta f_i} |p_{ff}|^2 df} \right)$$

Im nächsten Schritt wurden Terzbandpegeldifferenzen zwischen jeweils zwei simulierten Fällen gebildet.

$$\Delta L_i = L_{i,act} - L_{i,ref}$$

Dabei bezieht sich $L_{i,ref}$ immer auf den Referenzfall, auf den das Ergebnis bezogen werden soll (z.B. ohne Lärmschutzwand und/oder ohne Überdachung).

Um die Performance schließlich auf eine einzelne Zahl herunterzubrechen, wurden diese Terzbandpegeldifferenzen mit dem standardisierten Verkehrslärmspektrum nach EN 1793-3 gewichtet und gemittelt.

$$\Delta L = 10 \log \left(\frac{\sum_i 10^{0.1\Delta L_i} 10^{0.1L_{i,Verkehr}}}{\sum_i 10^{0.1L_{i,Verkehr}}} \right)$$

Diese gewichteten Pegeldifferenzen werden in den folgenden Grafiken aufgetragen. Dabei wurden zwei verschiedene Darstellungsarten gewählt.

Im ersten Fall wurde ermittelt welche Schalldruckpegeldifferenzen sich ergeben, wenn zu einer bestehenden Autobahn, mit oder ohne Lärmschutzwände, eine Überdachung eines bestimmten Typs hinzugefügt wird (siehe Abbildung 116 und Abbildung 117).

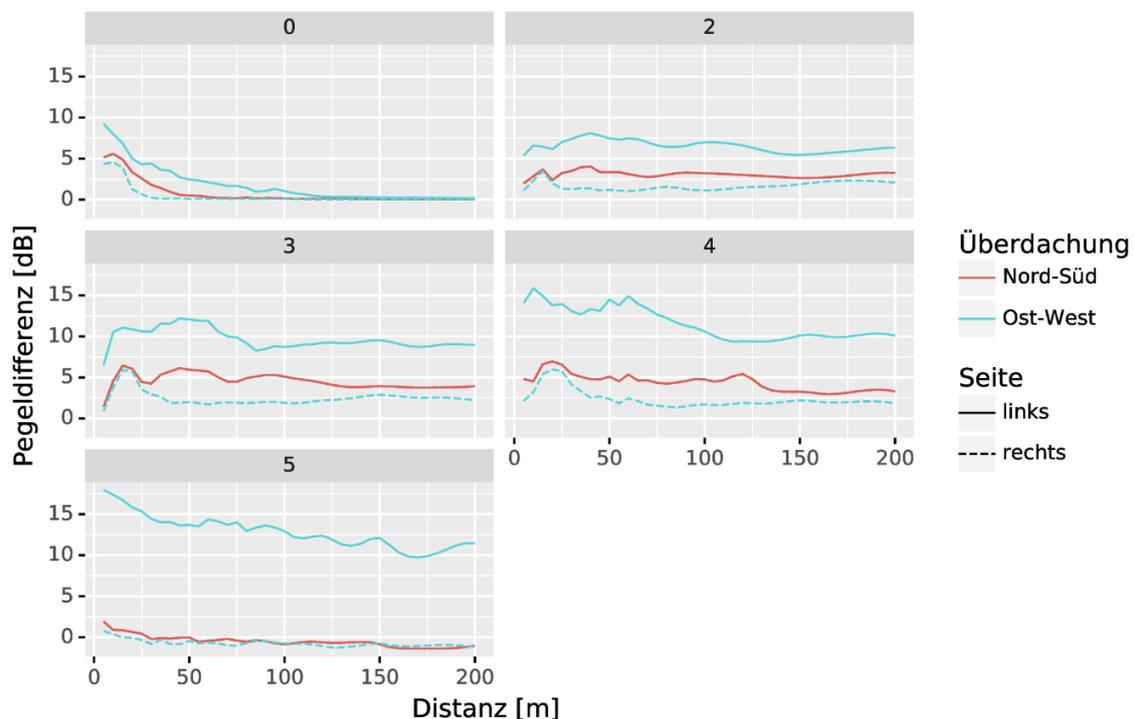


Abbildung 116: Pegelveränderung durch Einsatz einer Überdachung bei bestehenden Lärmschutzwandhöhen von 0-5 m für Mikrofonpositionen 1,5 m über dem Boden.

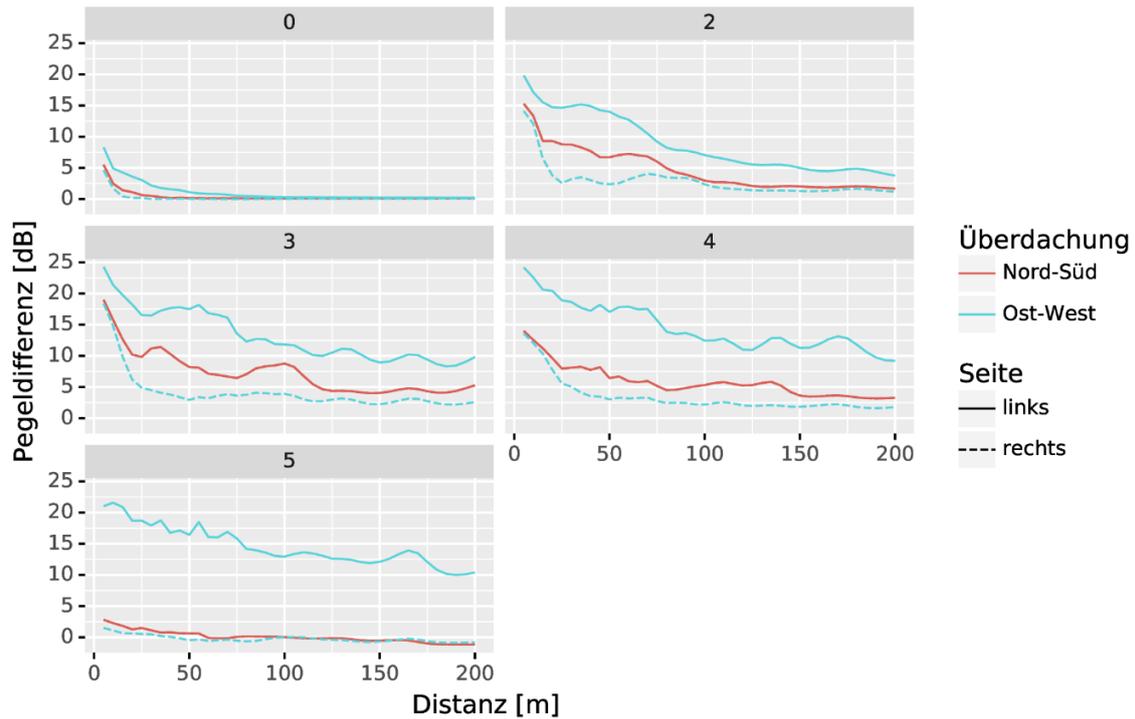


Abbildung 117: Pegelveränderung durch Einsatz einer Überdachung bei bestehenden Lärmschutzwandhöhen von 0-5 m für Mikrofonpositionen 4 m über dem Boden.

Im zweiten Fall wurde die Betrachtung umgedreht, und zwar wurde betrachtet, welche Schalldruckpegeldifferenzen sich ergeben, wenn an einer Autobahn mit bestehender Überdachung Lärmschutzwände mit verschiedenen Höhen errichtet werden (siehe Abbildung 118 und Abbildung 119).

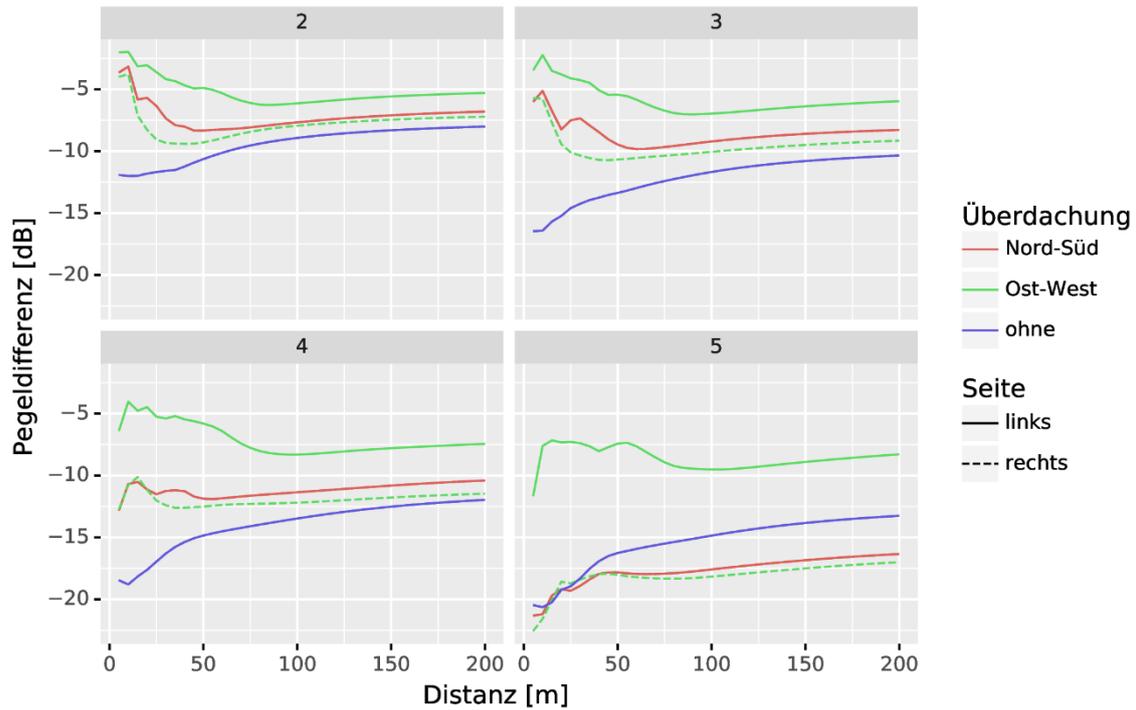


Abbildung 118: Pegelveränderung durch Errichtung von 2-5 m hohen Lärmschutzwänden bei bestehender Überdachung für Mikrofonpositionen 1,5 m über dem Boden.

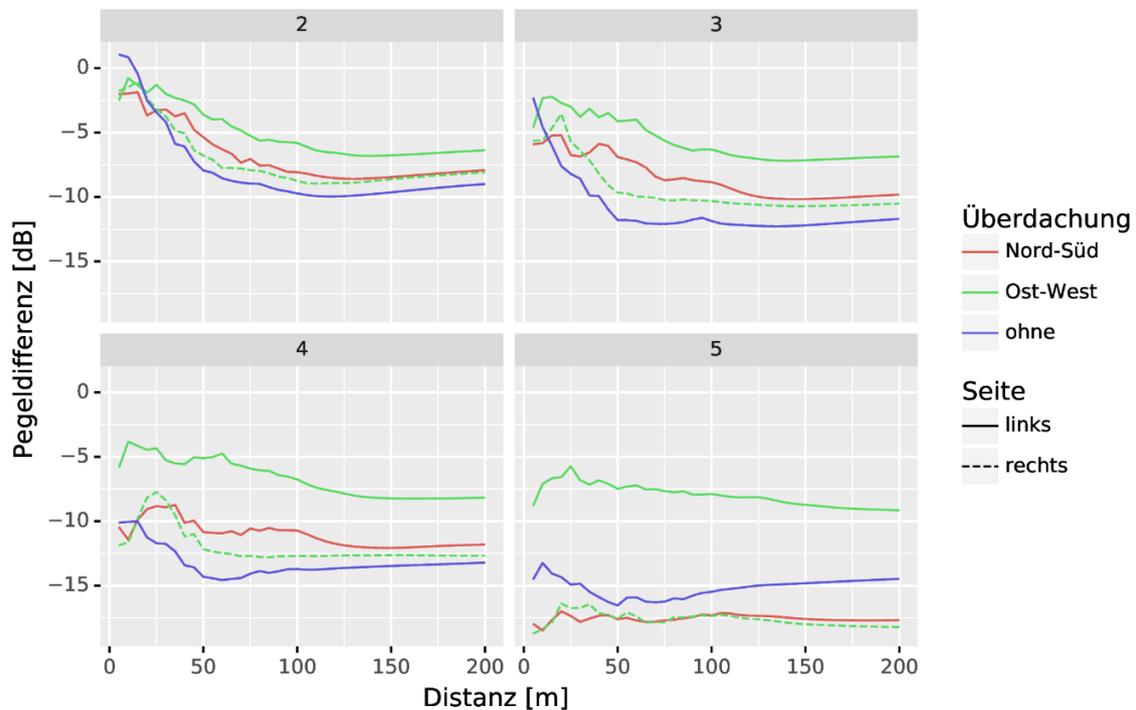


Abbildung 119: Pegelveränderung durch Errichtung von 2-5 m hohen Lärmschutzwänden bei bestehender Überdachung für Mikrofonpositionen 4 m über dem Boden.

Interpretation der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der Simulationen ist zu erkennen, dass durch den Einsatz einer Überdachung die Schallenergie, die ansonst von den Fahrzeugen nach oben abgestrahlt würde, teilweise wieder in bodennahe Bereiche zurückreflektiert wird. Das führt in der Situation ohne Lärmschutzwände zu einer lokalen Schalldruckpegelerhöhung, die sich nur im Nahbereich bis 25 m Entfernung von der Straße bemerkbar macht. Im Falle der asymmetrischen Ost-West-Überdachung (Pulldach) ist dieser Effekt auf einer Seite deutlich ausgeprägter und auch in größeren Entfernungen wirksam. In Kombination mit einer Lärmschutzwand bis etwa 3-4 m Höhe führt die Reflexion an der Überdachung in etwa 5 m Höhe dazu, dass die Abschirmwirkung der Lärmschutzwand teilweise aufgehoben wird und auch in größeren Entfernungen mit Pegelanhebungen zu rechnen ist. Auch hier ist der Effekt bei der Ost-West-Variante wie zu erwarten sehr asymmetrisch. Erst im Fall der 5 m hohen Lärmschutzwand wirken die Lärmschutzwand und die Überdachung zumindest im Fall der Nord-Süd-Variante so zusammen, dass die Schallenergie im Bereich der Überdachung konzentriert bleibt und durch Absorption an der verkehrszugewandten Seite der Lärmschutzwand reduziert wird, sodass sich insgesamt hinter der Lärmschutzwand geringere Schalldruckpegel als nur mit der Lärmschutzwand allein ergeben. Diese Variante kommt allerdings schon in die Nähe einer Einhausung, welche nicht Projektziel war. Insgesamt ist aus schalltechnischer Sicht die Wirkung der Überdachung in der Nord-Süd-Variante ohne Lärmschutzwände außer im Nahbereich weitgehend neutral, bei niedrigen bis mittelhohen Lärmschutzwänden (2 - 4 m) negativ und erst ab 5 m Lärmschutzwandhöhe positiv zu bewerten. Die Ost-West-Variante verursacht in allen Konfigurationen Schalldruckpegelerhöhungen auf der linken Seite entsprechend Abbildung 115. Daher erscheint der Einsatz der Überdachung ohne die Gefahr wesentlicher Schallpegelerhöhungen vor allem in Bereichen ohne Lärmschutzwände möglich. Wenn die Pulldachform gewählt wird oder die Überdachung gemeinsam mit Lärmschutzwänden eingesetzt werden soll, ist jedenfalls eine detaillierte schalltechnische Untersuchung der Wirkung am konkreten Einsatzort erforderlich.

6.2.5 Optische Auswirkung der Konstruktion auf die Verkehrsteilnehmer

Ein verkehrssicherheitsrelevanter Aspekt ist die optische Wirkung solch einer Konstruktion. Eine PV-Überdachung ist auf Straßen neuartig und führt zu etwaigen Ablenkungen oder möglichen störenden optischen Effekten. Rasche Dunkel-Hell Wechsel (z.B. Schattenwurf, durch die Querbalken oder Stützen) können bei bestimmten Geschwindigkeiten zu Stroboskop-Effekten führen. Dieser Effekt ist nicht nur ablenkend, er beeinträchtigt die Sicht und kann in Folge zur Unfallursache werden.

Das periphere Sehen reagiert empfindlicher auf den sogenannten Flickereffekt, der beispielsweise zu Konzentrationsstörungen eines Fahrzeugführers und zur Umlenkung der Aufmerksamkeit auf die Lichtquelle führen kann, was die Verkehrssicherheit gefährdet. Der Effekt, der im Allgemeinen eine periodische Schwankung der Intensität des Lichtes, darstellt, muss untersucht werden. Er ist direkt abhängig vom Sonnenstand, der Abständen und Dicken der Querbalken und der Fahrgeschwindigkeit. Auswirkungen und Messsystem sind u.a. aus der Prüfung von LED-Lampen bekannt.

Starke Intensitätsschwankungen bei niedrigen Frequenzen (< 60 Hz) sind mit bloßem Auge sichtbar. Ein solches Flimmern wird in der Regel als unangenehm empfunden und kann unter Umständen zu erheblichen Störungen des Wohlbefindens führen. Bis zu einer Frequenz von 100 Hz ist Flimmern im peripheren Gesichtsfeld wahrnehmbar. In welchem Maße das Flimmern als störend oder akzeptierbar empfunden wird, hängt in hohem Maße von den Umgebungsbedingungen vor Ort und der zu verrichtenden Sehaufgabe ab. Außerdem können Flimmern und Intensitätsschwankungen höherer Frequenzen zu Stroboskopeffekten führen. Zum Beispiel überlagert sich die periodische Lichtschwankung mit der periodischen Bewegung rotierender oder sich hin- und herbewegender Maschinenteile und verändert dadurch die Wahrnehmung des Bewegungsverlaufs. Dies kann zu gefährlichen Fehleinschätzungen führen.

Aber auch ohne sichtbare Wahrnehmung kann Flimmern bis zu Frequenzen von ca. 400 Hz bei empfindlich veranlagten Personen mit dem Auge erfasst werden und zu direkten physiologischen Auswirkungen führen.

Bei den geplanten Abständen von 6 m und einer Fahrgeschwindigkeit von maximal 130 km/h ist kein störender Stroboskopeffekt zu erwarten, weil die Frequenzen der Dunkel-Hell Wechsel eine nicht zu niedrige Frequenz aufweisen. Etwaige lokale, ablenkende Wirkungen sind vor Ort zu überprüfen.

6.3 Abschätzung der Kosten

6.3.1 Investitionskosten PV-SÜD Überdachungs-Modul

Die Kosten der konzipierten PV-SÜD-Konstruktion mit Photovoltaikanlage setzen sich aus den in Tabelle 17 gelisteten Positionen zusammen. Dabei handelt es sich um grobe Kostenangaben für die Projektierung und Errichtung eines PV-SÜD-Moduls.

Tabelle 17: Grobkosten für die Projektierung und Errichtung eines PV-SÜD Moduls.

Beschreibung	Wert	Einheit	Anmerkung
Fläche	170	m ²	
Anzahl Module	120	Stk.	1680 x 990 mm
Leistung pro Modul	315	Wp	Solarwatt Vision Construct 60M
Leistung Anlage	37,8	kWp	
Kosten pro PV Modul	205	Euro	Einzelpreis Liste
PV Modulkosten Anlage	24.600	Euro	
DC Kabel Anlage + Stecker	700	Euro	2x2x25 + 2x2x35 10mm ² (insgesamt 4 unabhängige Stränge)
Wechselrichter	4.600	Euro	z.B. 2x Fronius Symo 17kW, á 2300 Euro
PV Unterkonstruktion Click-On	20.000	Euro	
Montagekosten Module gesamt	11.900	Euro	70 Euro/m ² (Ertex)
Netzanschlusskosten, AC Kabel (Verlegung und Material)	6.000	Euro	Ca. 10% der PV Anlagenkosten
Blitzschutz	2.500	Euro	
PV Kosten gesamt	70.300	Euro	Für 37,8 kWp
Spezifische Kosten (nur PV Anlage)	1.860	Euro/kWp	
Stahlbau, inkl. Gründung	97.000	Euro	
Transport	2.910	Euro	ca. 3 % vom Stahlbau
Engineering, Projekt., Stahlmontage	14.550	Euro	ca. 15% vom Stahlbau
Monitoring	1.000	Euro	PV, Straße, IT und Komm.
Option: Messtechnik	11.000	Euro	Siehe Messtechnik-Konzept
Option: Brandanstrich Stahl	10.000	Euro	
Gesamtkosten PV-SÜD Modul	185.760	Euro	(ohne Optionen)
Spezifische Kosten	4.914	Euro/kWp	Gesamte PV Anlage inkl. Konstruktion

Die Kostenangaben beruhen auf Hersteller- und Lieferantenangaben, sowie eigenen Berechnungen und Kalkulationen (z.B. Stahlbau). Alle Angaben zu Kosten und Wirtschaftlichkeit sind netto, exkl. MwSt.

Standortabhängig Kostenposition: Netzanschluss

Am Standort Hegau ist ein engmaschig verlegtes Stromversorgungssystem mit Anschlusskästen in regelmäßigen Abständen vorhanden (Abbildung 120). Die verfügbare Anschlussleistung der bestehenden Infrastruktur muss für die Umsetzung noch im Detail überprüft und der genaue Anschlusspunkt zur lokalen Netzeinbindung geklärt werden. Für die Kostenberechnung wird davon ausgegangen, dass nur sehr kleine Grabungsarbeiten und Adaptierungen an den Anschlusskästen sowie keine wesentlichen Netzverstärkungsmaßnahmen notwendig sind.

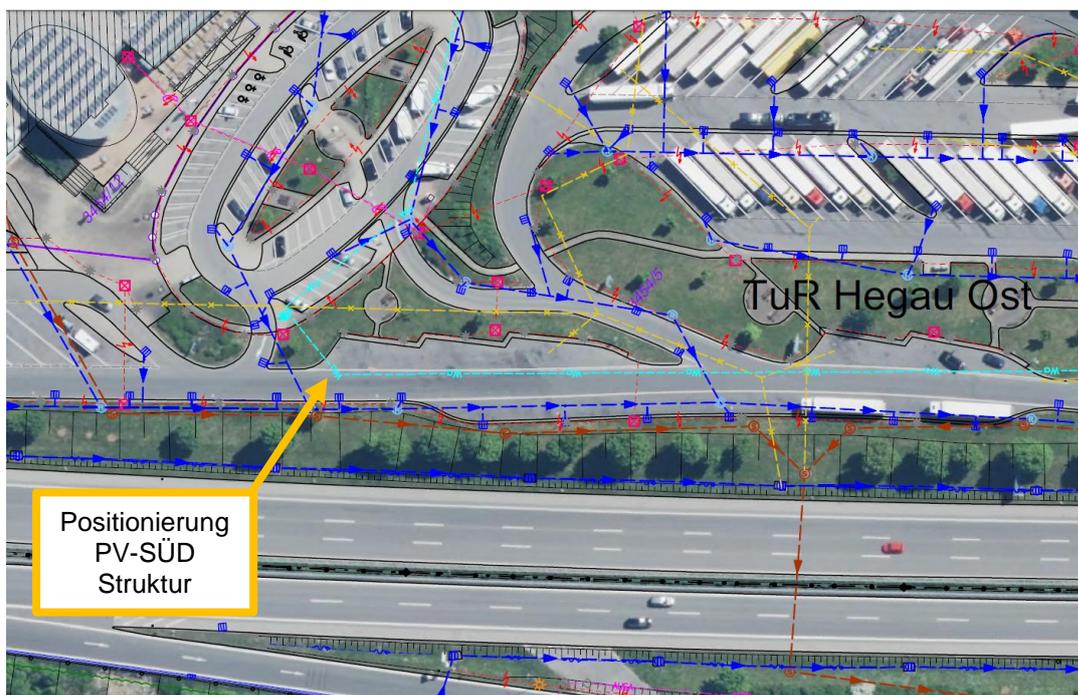


Abbildung 120: Bestandsübersicht Hegau mit Elektroinfrastruktur

Die Starkstromerleitungen sind in Rot gekennzeichnet. Details zur tatsächlichen Situation und Möglichkeit zur Netzeinbindung vor Ort werden im Zuge des Projektengineerings für den Demonstrator geklärt.

6.3.2 Skalierungseffekte

Bei der Ausrollung der konzipierten PV-SÜD-Überdachung in größerer Stückzahl sind entsprechende Skalierungseffekte und damit weitere Kostenreduktionen pro Modul zu erwarten. In Tabelle 18 sind die Kosten pro Modul bei höheren Stückzahlen (5 und 20 Module) im Vergleich zur Basiskalkulation mit einem Modul (siehe Tabelle 17) dargestellt.

Folgende Annahmen wurden für diese Berechnungen getroffen:

- Jedes PV-SÜD-Überdachungsmodul wird mit der gleichen PV-Systemtechnik realisiert (Strangwechselrichter),
- die PV-Module sowie die Unterkonstruktion (Click-On) werden bei Abnahme von höheren Stückzahlen günstiger (Herstellerangaben),
- bei größeren PV-Leistungen und längeren Leitungswegen steigen die Netzanschlusskosten linear mit
- die Module werden im Rahmen eines Projektes an einem Standort realisiert
- Die Kosten für Stahl und Beton sind keinem Skalierungseffekt unterworfen, und steigen linear mit der verwendeten Materialmenge

Tabelle 18: Grobkosten pro PV-SÜD Modul bei höheren Stückzahlen

Beschreibung	1 Modul	5 Module	20 Module	Einheit	Anmerkung
Wert für ein Modul bei Realisierung von					
Fläche	170	170	170	m ²	
Anzahl Module	120	120	120	Stk.	1680 x 990 mm
Leistung pro Modul	315	315	315	Wp	Solarwatt Vision Construct 60M
Leistung Anlage	37,8	37,8	37,8	kWp	
Kosten pro PV Modul	205	190	160	Euro	
PV Modulkosten Anlage	24.600	22.800	19.200	Euro	
DC Kabel Anlage + Stecker	700	700	700	Euro	2x2x25 + 2x2x35 10mm ² (insgesamt 4 unabhängige Stränge)

Wechselrichter	4.600	4.400	4.200	Euro	z.B. 2x Fronius Symo 17kW, á 2300 Euro
PV Unterkonstruktion Click-On	20.000	15.000	10.000	Euro	
Montagekosten Module gesamt	11.900	11.900	11.900	Euro	70 Euro/m ² (Ertex)
Netzanschlusskosten, AC Kabel (Verlegung und Material)	6.000	6.000	6.000	Euro	Ca. 10% der PV Anlagenkosten
Blitzschutz	2.500	2.500	2.500	Euro	
PV Kosten gesamt	70.300	63.300	54.500	Euro	Für 37,8 kWp
Spezifische Kosten (nur PV Anlage)	1.860	1.675	1.442	Euro/kWp	
Stahlbau, inkl. Gründung	97.000	97.000	97.000	Euro	
Transport	2.910	2.910	2.910	Euro	ca. 3 % vom Stahlbau
Engineering, Projektierung, Stahlmontage	14.550	14.550	14.550	Euro	ca. 15% vom Stahlbau
Monitoring	1.000	1.000	1.000	Euro	PV, Straße, IT und Komm.
Option: Messtechnik	14.000				
Option: Brandanstrich Stahl	10.000	10.000	10.000	Euro	
Gesamtkosten	185.760	178.760	169.960	Euro	(ohne Optionen)
Spezifische Kosten Gesamtanlage	4.914	4.729	4.496	Euro/kWp	

Die Kostenangaben beruhen auf Hersteller- und Lieferantenangaben, sowie eigenen Berechnungen und Kalkulationen (z.B. Stahlbau). Alle Angaben zu Kosten und Wirtschaftlichkeit sind netto, exkl. MwSt.

6.3.3 Kosteneffekte durch die Lebensdauerverlängerung der Fahrbahndecke

Die positiven Nebeneffekte der baulichen Struktur des PV-SÜD-Konzeptes auf die Instandhaltung und Lebensdauer der Fahrbahn wird in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt. Wie in Abschnitt 6.2.3 abgeschätzt kann durch die Verminderung der Einwirkungen auf die Fahrbahnoberfläche eine Erhöhung der Lebensdauer der Fahrbahndecke von maximal 30% erreicht werden. Im Folgenden werden daher Lebensdauerverlängerungen von 15% und 30% betrachtet.

Für eine 80 m lange PV-Überdachung auf einer Richtungsfahrbahn beträgt nach Tabelle 19 die geschützte Fläche auf 2 Fahrstreifen und 1 Pannestreifen (Breite 3,75 m + 3,75 m + 3 m = 10,5 m) 840 m². Für eine Kompletterneuerung des Oberbaus am Ende der Lebensdauer wurden für eine Asphaltdecke Kosten von 90 Euro/m² angesetzt, was für die betrachtete Überdachung Kosten von 75.600 Euro ergibt. Bei einer mittleren Lebensdauer von 20 Jahren für eine Asphaltdecke ergeben sich verlängerte Lebensdauern von 23 Jahren (+15%) und 26 Jahren (+30%). In der Wirtschaftlichkeitsrechnung wurden der Effekt der späteren Erneuerung als im Referenzfall (20 Jahre) als Ersparnis berücksichtigt, um die Größenordnung und Relevanz im Verhältnis zu den anderen Einflussfaktoren abschätzen zu können.

6.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die reinen Investitionskosten sind nur ein Teil der Wirtschaftlichkeitsrechnung. Die Wirtschaftlichkeit hängt auch davon ab, wie viele Jahren die Anlage betrieben werden muss, um durch die Stromkosteneinsparung (oder Stromeinspeisung) die Investitionskosten und laufenden Betriebskosten zu kompensieren.

Durch die Gegenüberstellung des Energieertrages der Photovoltaik und der Nutzungsart des Stromes (in diesem Fall vollständiger Eigenverbrauch) lässt sich die Wirtschaftlichkeit der Investition abschätzen. Dabei wurden die positiven Effekte der baulichen Struktur monetär bewertet und in der untenstehenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt.

Der Photovoltaik-Ertrag ist eine der entscheidenden Faktoren für eine mögliche Rentabilität der Investition in eine PV-Überdachung. Dem Ertrag gegenüber stehen die Anschaffungskosten, gegebenenfalls Finanzierungskosten, sowie die Kosten für Betrieb und Wartung der Anlage. Die Nutzung bzw. der Verkauf des erzeugten Stromes sind

entscheidend. Der jeweilige Netzanschlusspunkt und die Verbraucherstruktur an den Untersuchungsorten werden analysiert und mit einbezogen, sowie mögliche Einsparungen aufgrund von quantifizierbaren positiven Effekten auf die Straße und Straßenerhalt berücksichtigt.

Es wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Standort Hegau (DEU) mit Hilfe des Simulations- und Berechnungswerkzeuges PV*SOL durchgeführt und der Cashflow ermittelt.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung in PV*SOL beruht auf der Kapitalwertmethode. Für den Kapitalwert der Gesamtinvestition KW Gesamtinvestition gilt:

$$KW_{\text{Gesamtinvestition}} = \sum BW_{\text{dynamisch}} - i + f$$

- $\sum BW_{\text{dynamisch}}$ Summierter Barwert über T Jahre
- i ... Investitionen
- f ... Förderungen

Positive Kapitalwerte bedeuten betriebswirtschaftlich positiv zu bewertende Investitionen. Die Amortisationszeit ist der Zeitraum, den die Anlage laufen muss, um einen Kapitalwert der Gesamtinvestitionen von Null zu erbringen.

Für den Barwert $BW_{\text{dynamisch}}$ einer preisdynamischen Zahlungsfolge Z über T Jahre (Lebensdauer) gilt nach VDI 6025:

$$BW_{\text{dynamisch}} = Z_{\text{dynamisch}} \cdot b(T, q, r)$$

mit

$$b(T, q, r) = [1 - (r/q)^T] / [q - r] \quad \text{für } r \neq q$$

$$T/q \quad \text{für } r = q$$

- b ... Barwertfaktor
- q ... Kapitalzinsfaktor
- r ... Preisänderungsfaktor

und der preisdynamischen Zahlungsfolge $Z_t = Z \cdot r_t - 1$ als eine Folge von periodisch um den Preisänderungsfaktor r steigende Zahlungsfolge $Z \cdot r, Z \cdot r^2, \dots$ beginnend mit der ersten Zahlung.

Ist der Preisänderungsfaktor $r = 1$ kann die preisdynamische Zahlungsfolge in eine konstante Zahlungsfolge Z_{konstant} umgewandelt werden. Es gilt:

$$BW_{\text{konstant}} = Z_{\text{konstant}} / [a(q, T)]$$

$$a(q, T) = 1 / [b(T, q, r = 1)]$$

- $a(q, T)$...Annuitätsfaktor

Für die Stromgestehungskosten k gilt:

$$k = Z / E$$

- E ...Erzeugte Energie- bzw. Strommenge im Betrachtungszeitraum

Wirtschaftlichkeitsanalyse Standort Hegau Ost

Aufbauend auf den errechneten Energieerträgen (Pultdach, Orientierung der Dachfläche südlich – Kapitel 6.1), sowie den ermittelten Grobkosten für die Investition (Kapitel 6.3.1) ist in Tabelle 19 die Übersicht der Wirtschaftlichkeitsanalyse dargestellt.

Tabelle 19: Anlagendaten und Ausgangsdaten für die Wirtschaftlichkeitsanalyse

Netzeinspeisung im ersten Jahr (inkl. Moduldegradation)	39 379 kWh/Jahr
PV-Generatorleistung	37,8 kWp
Betrachtungszeitraum	25 Jahre
Wirtschaftliche Kenngrößen	
Kumulierter Cashflow	-67 782,10 €
Amortisationsdauer	Mehr als 24 Jahre
Stromgestehungskosten	0,19 €/kWh
Zahlungsübersicht	
spezifische Investitionskosten	4 914,29 €/kWp
Investitionskosten	185 760,00 €
Vergütung und Ersparnisse	
Gesamtvergütung im ersten Jahr (Ersparnis durch Eigenverbrauchsdeckung)	4 725,45 €/Jahr
Tarif Verbrauch (Wert der Eigenverbrauchsdeckung)	0,12 €/kWh
Ersparnis durch Eigenverbrauchsdeckung	4 725,45 €/Jahr

Es wird angenommen, dass der Energieertrag der PV Anlage vollständig zur Eigenbedarfsdeckung am Standort verwendet wird und es keine Überschusseinspeisung in

das Netz gibt. Demgemäß wird der Wert jeder erzeugten kWh der Anlage mit dem Strombezugspreis am Standort bemessen. In der Basisrechnung wird ein Strombezugspreis von 0,12 €/kWh (inkl. Energie- und Netzkosten, exkl. Steuern und Gebühren) angenommen. Die Ergebnisse der Barwertberechnung mit jährlichem und kumuliertem Cashflow über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren sind in Tabelle 20 numerisch und in Abbildung 121 graphisch dargestellt.

Tabelle 20: Tabellarische Darstellung der Barwertberechnung mit jährlichem und kumuliertem Cashflow über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahre

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5
Investitionen	-€ 185 760,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Einspeisevergütung	€ 4 617,97	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45
Jährlicher Cashflow	-€ 181 142,03	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45
Kumulierter Cashflow	-€ 181 142,03	-€ 176 416,58	-€ 171 691,14	-€ 166 965,69	-€ 162 240,25

	Jahr 6	Jahr 7	Jahr 8	Jahr 9	Jahr 10
Investitionen	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Einspeisevergütung	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45
Jährlicher Cashflow	€ 4 725,45				
Kumulierter Cashflow	-€ 157 514,80	-€ 152 789,35	-€ 148 063,91	-€ 143 338,46	-€ 138 613,01

	Jahr 11	Jahr 12	Jahr 13	Jahr 14	Jahr 15
Investitionen	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Einspeisevergütung	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45
Jährlicher Cashflow	€ 4 725,45				
Kumulierter Cashflow	-€ 133 887,57	-€ 129 162,12	-€ 124 436,67	-€ 119 711,23	-€ 114 985,78

	Jahr 16	Jahr 17	Jahr 18	Jahr 19	Jahr 20
Investitionen	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Einspeisevergütung	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45
Jährlicher Cashflow	€ 4 725,45				
Kumulierter Cashflow	-€ 110 260,33	-€ 105 534,89	-€ 100 809,44	-€ 96 084,00	-€ 91 358,55

	Jahr 21	Jahr 22	Jahr 23	Jahr 24	Jahr 25
Investitionen	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Einspeisevergütung	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 674,67
Jährlicher Cashflow	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 725,45	€ 4 674,67
Kumulierter Cashflow	-€ 86 633,10	-€ 81 907,66	-€ 77 182,21	-€ 72 456,76	-€ 67 782,10

Degradation- und Preissteigerungsraten werden monatlich über den gesamten Betrachtungszeitraum angewendet. Dies erfolgt bereits im ersten Jahr.

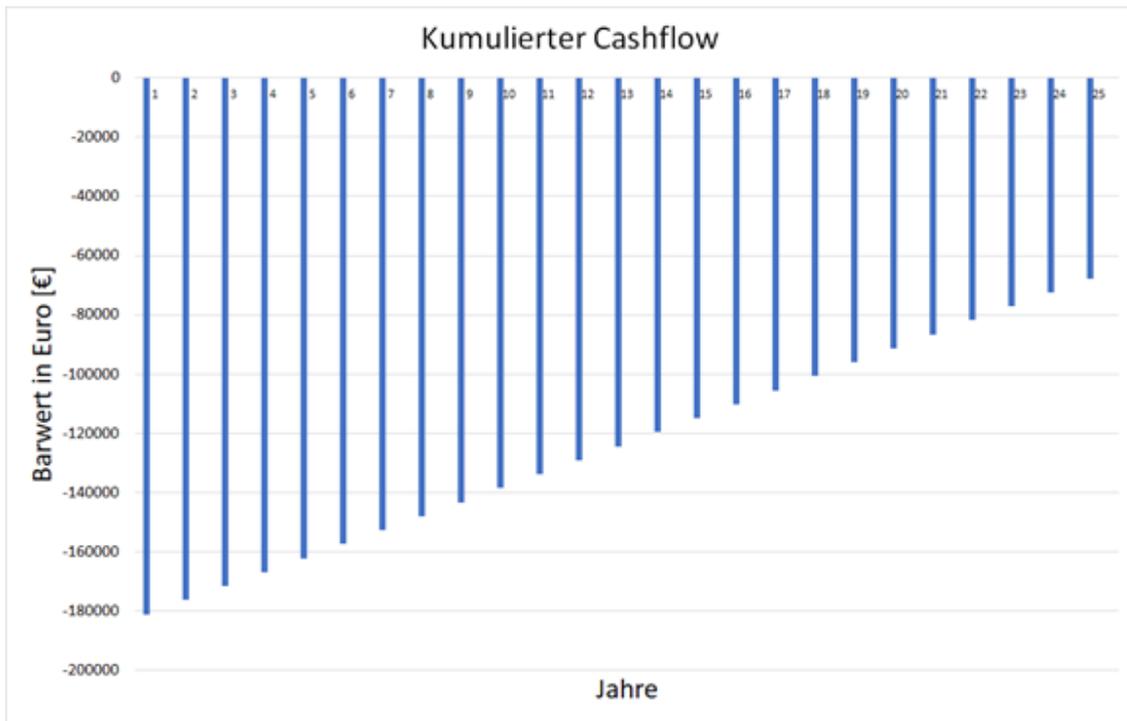


Abbildung 121: Kumulierter Cashflow bei 0,12 €/kWh Bezugstarif (Energie + Netzentgelte, exkl. USt.) und Verwendung des erzeugten Stromes zu 100% für den Eigenbedarf

Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten

Die in 6.3.2 beschriebenen veränderten Investitionskosten für jedes PV-SÜD-Grundmodul im Anbetracht von Skalierungseffekten wurden als Sensitivitäten für die Wirtschaftlichkeit der Anlage einberechnet und in **Abbildung 122** dargestellt.

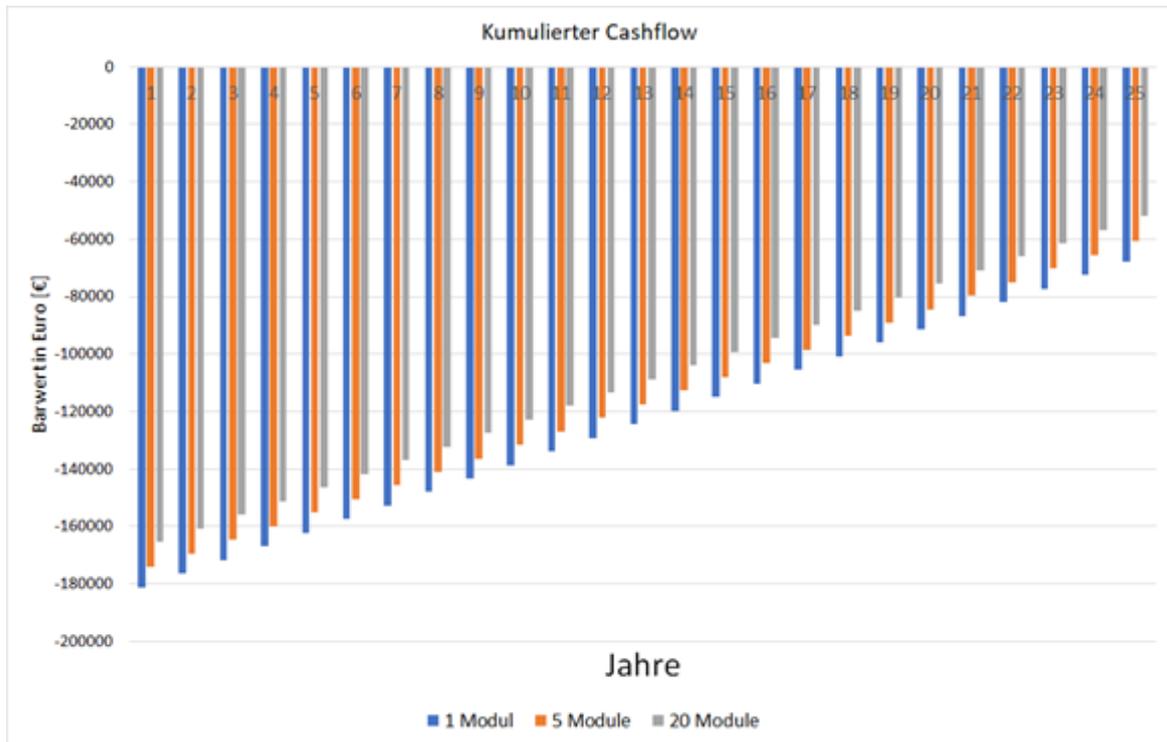


Abbildung 122: Sensitivitäten für die Wirtschaftlichkeit der Anlage hinsichtlich Skalierungseffekten

Berücksichtigung der positiven Effekte auf die Lebensdauer der Fahrbahndecke

Die in Abschnitt 6.3.3 gezeigten Berechnungen für die Lebensdauererlängerung des Straßenbelages wurden hier für eine wirtschaftliche Sensitivitätsanalyse herangezogen, wobei die Verlängerung der Lebensdauer des Asphalt Straßenbelags von 20 auf 23 Jahre (+15%) und 26 Jahre (+30%) betrachtet wurde.

Bei der Anlage in Hegau ergibt sich eine Ersparnis von 62 Euro/Jahr, wenn davon ausgegangen wird, dass der Straßenbelag alle 23 Jahren erneuert wird. Eine Ersparnis von 109 Euro/Jahr ergibt sich bei einer Erneuerung nach 26 Jahren. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung zeigt in Abbildung 123 einen geringen Einfluss durch diese Nebeneffekte der Überdachung auf die Infrastruktur.

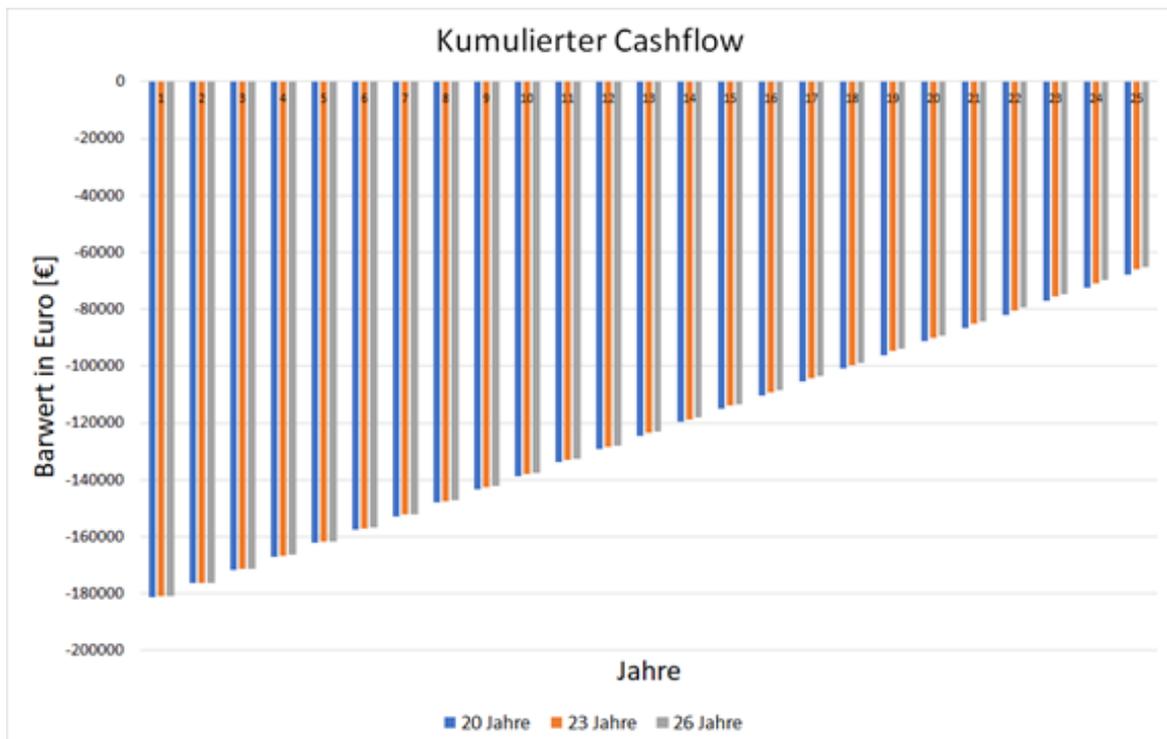


Abbildung 123: Sensitivität unter Berücksichtigung der positiven Effekte auf die Lebensdauer des Straßenbelages

Wirtschaftlichkeit für unterschiedliche Strombezugspreise

Die Sensitivitäten für unterschiedliche Strombezugspreise (0,2 €/kWh und 0,3 €/kWh) sind in Abbildung 124 gegenübergestellt. Hier wird deutlich, dass der aktuelle Strompreis eine wesentliche Einflussgröße für die Wirtschaftlichkeit einer PV Anlage zur Eigenbedarfsdeckung ist. Unter Annahme eines Strombezugspreises von 30 Cent/kWh kann eine Amortisierung innerhalb von 16 - 18 Jahren erreicht werden.

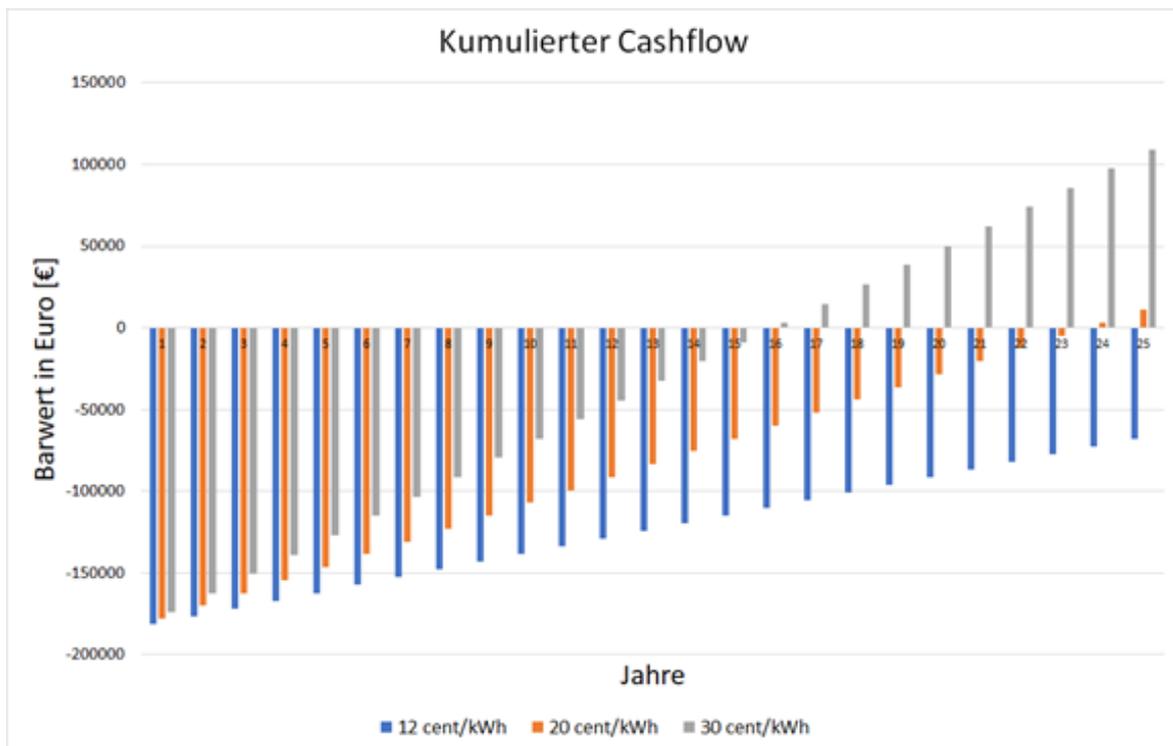


Abbildung 124: Sensitivitäten bei unterschiedlichen Bezugstarifen

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in diesem Projekt gezeigt wurde, dass die technische Machbarkeit einer PV-Überdachung im hochrangigen Straßennetz grundsätzlich gegeben ist und zur nachhaltigen Energieproduktion einen relevanten Beitrag leisten kann. Die diesbezüglich zu berücksichtigenden Randbedingungen und Herausforderungen eines Standortes im hochrangigen Straßennetz wurden eingehend untersucht, wobei auch einige noch nicht in Regelwerken festgelegte Sachverhalte analysiert werden mussten. Im Hinblick auf die solare Energieproduktion der Überdachung und das Design der Tragkonstruktion konnte ein robustes und nicht zu stark von speziellen Standorten abhängiges Konzept gefunden werden, das auch durchaus erhebliche solare Energieerträge auf bereits versiegelten Flächen verspricht. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit und den Zustand der Fahrbahnoberfläche weisen die vergleichenden Untersuchungen auf positive Effekte hin. Im Bereich Lärmschutz führt die Präsenz der Überdachung zu einem komplexeren Schallfeld mit zusätzlichen Reflexionen, sodass der Einsatz hier in Kombination mit den lokalen Bedingungen und der Lage relevanter Anrainer im Einzelfall geprüft werden sollte. Für die gesamte Wirtschaftlichkeit der Anlage erwies sich vor allem der anzusetzende Strombezugspreis als ausschlaggebender Faktor. Im Zuge der Ausführungsplanung und Erstellung sowie der messtechnischen und wissenschaftlichen Begleitung des geplanten Demonstrators können alle angesprochenen Themen vertieft untersucht und weiter konkretisiert werden.

Zukünftige technologische Entwicklungen wie autonomes Fahren, Stromabnahmesysteme für die Elektromobilität oder leistungsstarke Mobilfunknetze (5G, 6G) wurden bei der Konzeption des PV-SÜD Systems derzeit nicht explizit berücksichtigt. Durch die modulare und offene Bauweise der Überdachung ist eine Kombination mit den genannten Technologien denkbar und könnte in einem weiteren Schritt untersucht werden.

8 LITERATUR

- [1] ASB-ING: Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten, Teilsystem Bauwerksdaten. Sammlung Brücken- und Ingenieurbau – Erhaltung. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr 2013
- [2] IEC 61215-1:2021 Edition 2.0 (2021-02-23) Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements.
- [3] IEC 61215-2:2021 Edition 2.0 (2021-02-24) Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures
- [4] IEC 61730-1:2016 Edition 2.0 (2016-08-17) Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction
- [5] IEC 61730-2:2016 Edition 2.0 (2016-08-18) Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 2: Requirements for testing
- [6] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV): RVS 03.03.31 Querschnittselemente sowie Verkehrs- und Lichtraum von Freilandstraßen – Verbindlicherklärung. 01.08.2018
- [7] ÖNORM EN 1991-1-3:2016 01 15 Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten (konsolidierte Fassung)
- [8] A. Müller, M. Schiere, and S. Bonifacio, "Feuchtemonitoringsysteme auf Holzbrücken," *Brückenkolloquium*, vol. 4, no. 1, pp. 635–640, 2020, [Online]. Available: <https://elibrary.narr.digital/article/99.125005/kbr202010635>.
- [9] www.hora.gv.at - 16.02.2021
- [10] <https://www.dlubal.com/de/schnee-wind-erdbeben-lastzonen> -16.02.2021
- [11] <https://www.dibt.de/de/aktuelles/meldungen/nachricht-detail/meldung/aktualisiert-zuordnung-der-windlast-und-schneelastzonen-nach-verwaltungsgrenzen-> Stand August 2020.
- [12] DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04 Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten

- [13] ÖNORM EN 1991-1-4:2011 05 15 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten (konsolidierte Fassung)
- [14] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV): RVS 09.01.23 Innenausbau - Grundtext, 23.12.2010
- [15] Bundesanstalt für Straßenwesen. ZTV-ING Teil 5 Tunnelbau. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. ZTV-ING - Teil 5 Tunnelbau - Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise. Stand 2018/01
- [16] Bemessungsgrundlagen für Schilderbrücken unter aerodynamischer Anregung der Autobahndirektion Südbayern
- [17] ÖNORM EN 1991-2:2012 03 01 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken (konsolidierte Fassung)
- [18] ÖNORM B 1991-2:2018 08 01 Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-2 und nationale Ergänzungen
- [19] M. Bettin, R. Maurer, and A. Bach, "Anprall gegen Pfeiler von Bestandsbauwerken," *Brückenkolloquium*, vol. 4, no. 1, pp. 531–544, 2020, [Online]. Available: <https://elibrary.narr.digital/article/99.125005/kbr202010531>
- [20] Bundesamt für Straßen (Schweiz) Einwirkungen auf Tragwerke SIA 261/2014 D – Ergänzung zur Norm SIA 261 (2005); Anprall von Straßenfahrzeugen auf Bauwerksteile von Kunstbauten (2005).
- [21] Bundesanstalt für Straßenwesen BAST. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING Teil 9 Bauwerke Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken. Stand 04/2012
- [22] M. Keuser and T. Braml, "Anprallsockel für Verkehrszeichenbrücken: FE 15.0593/2013/ARB: Schlussbericht," 2019.
- [23] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV): RVS 05.02.11 Leiteinrichtungen, Verkehrszeichen und Ankündigungen, Anforderungen und Aufstellung, 07/2009.

- [24] ÖNORM EN 1991-1-7:2014 09 01 Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen (konsolidierte Fassung)
- [25] ÖNORM B 1991-1-7:2007 04 01 Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-7
- [26] DIN EN 1991-1-7/NA:2019-09 Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen
- [27] 2017R01EN, Design fire characteristics for road tunnels, Technical Committee 3.3
- [28] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen: RVS 09.03.11 Tunnel, im Bereich von Schnellstraßen und Autobahnen, Abänderung, Oktober 2019.
- [29] Pirringer S. „Brandberechnung von Stahlbetontunnels- Eine Gegenüberstellung“ Diplomarbeit TU Wien- Institut für Tragkonstruktionen 2008.
- [30] BF- Merkblatt 021/2017- Bundesverband Flachglas
- [31] Assmus, M.; Jack, S.; Weiß, Karl-Anders; Koehl, Michael (2011): Measurement and simulation of vibrations of PV-modules induced by dynamic mechanical loads. In Prog. Photovolt: Res. Appl. 19 (6), pp. 688–694. DOI: 10.1002/Pip.1087.
- [32] A. J. Beinert, P. Romer, M. Heinrich, M. Mittag, J. Aktaa and D. H. Neuhaus, "The Effect of Cell and Module Dimensions on Thermomechanical Stress in PV Modules," in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 10, no. 1, pp. 70-77, Jan. 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2949875
- [33] S. Lachinger, M. Reiterer, H. Kari: "Lärmschutzwände entlang von Hochgeschwindigkeitsstrecken: Normung - Berechnung - Messung"; Bauingenieur, 92. Jahrgang (2017), 92; S. 39 - 49.
- [34] Bergmeister, K.; Curbach, M.; Strauss, A. et al.: Sicherheit und Gefährdungspotenziale im Industrie- und Gewerbebau. In: Beton-Kalender 2006, S. 289
- [35] Hofmann J.: Sicherheit im Bauwesen von der Brücke bis zum Befestigungssystem. In: BAUINGENIEUR BD. 95 (2020) VDI-BAUTECHNIK S. 14-19.

- [36] D. A. Purser, (1989) *Modeling time to incapacitation and death from toxic and physical hazards in aircraft fires*, AGARD, Bd. 467, pp. 41/1-41/12,
- [37] ONR CEN/TS 1187:2012 04 01 Prüfverfahren zur Beanspruchung von Bedachungen durch Feuer von außen (CEN/TS 1187:2012)
- [38] ÖNORM EN 13501-5:2016 11 01 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 5: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus Prüfungen von Bedachungen bei Beanspruchung durch Feuer von außen
- [39] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV): RVS 09.02.31 Tunnel - Tunnelausrüstung - Belüftung - Grundlagen, Juni 2014
- [40] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV): RVS 09.03.11 Tunnel – Sicherheit - Tunnel-Risikoanalysemodell, April 2015
- [41] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV): RVS 13.01.16 Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken, November 2012
- [42] Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr (FSV): RVS 11.06.65 Griffigkeitsmessungen mit dem System RoadSTAR, November 2002
- [43] Prammer, D.; Vorwagner, A; Kwapisz, M.: *Messdatenbasierte Belastungsanalyse von Autobahn-Betonfahrbahndecken aus Fertigteilen - Dauermonitoring kombiniert mit nichtlinearen FEM-Zeitverlaufsanalysen*, Beton- und Stahlbetonbau, Ernst & Sohn, 2021 (unveröffentlicht)
- [44] Schindler, Kerstin: *Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung*. Braunschweig, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2008
- [45] Outcalt, S. I.: *A Numerical Surface Climate Simulator**. In: Geographical Analysis Bd. 3 (1971), Nr. 4, S. 379–393
- [46] Villaret S., Riwe A. (2014) *Berücksichtigung des Längsdehnungsverhalten von Betonfahrbahndecken*. Vortrag Forschungskolloquium „Betonstraßenbau“, Dresden

- [47] Weninger-Vycudil, A., Simanek, P., Haberl, P., Rohringer, T. (2009) *Straßenforschungsheft Nr. 584 Handbuch Pavement Management in Österreich 2009*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie BMVIT. Wien
- [48] Hinsch, K., Krause, G. u. Maerschalk, G., Rübensam, J. (2005) Katalogisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 915, BMVBW Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn 2005
- [49] ÖNORM EN 1793-3:1998 03 01 Lärmschutzeinrichtungen an Straßen - Prüfeigenschaften zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum
- [50] ÖNORM EN 1793-5:2019 02 15 Lärmschutzvorrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 5: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern

9 ANHÄNGE

Anhang 1: Brandkonzept: PV-SÜD-Brandfall unter Einhausung – Balda Engineering & Consulting im Auftrag von AIT.

Anhang 2: Entwürfe und Pläne und Zeichnungen der Tragkonstruktion, erstellt von der Firma Forster.

Anhang 3: Statische Vorbemessung – Konzept, Integral Ziviltechniker im Auftrag der Firma Forster.