

# PVwins Schlussbericht

Förderkennzeichen:

03EE1062A (Fraunhofer ISE)

03EE1062B (R. Kohlhauer GmbH)

03EE1062C (Igrapower GmbH)

## Danksagung

Das Forschungsprojekt PVwins wurde in der Zeit vom 01.04.2020 bis zum 30.06.2024 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE1062A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, und den Firmen R. Kohlhauer GmbH und Igrapower GmbH gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung aller Teilprojekte im Sinne eines Gesamtberichts. Dieser umfasst so auch die folgenden Teilprojekte:

Teilprojekt A: Fkz: 03EE1062A

Teilprojekt B: Fkz: 03EE1062B

Teilprojekt C: Fkz: 03EE1062C

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# PVwins

## Entwicklung von wandintegrierten PV-Elementen für den Lärmschutz

<b>Projektleitung:</b>	<b>Dr. Martin Heinrich, Dr. Jonas Huyeng, Jacob Forster,</b> Fraunhofer ISE
<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>03EE1062A,B,C</b>
<b>Forschungsrahmenprogramm:</b>	<b>7. Energieforschungsprogramm</b> „Innovationen für die Energiewende“
<b>Berichtszeitraum:</b>	<b>01.04.2020 – 30.06.2024 (inkl. Projektverlängerung)</b>

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

### Ansprechpartner Fraunhofer ISE:

Name: Jacob Forster  
Adresse: Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg  
Telefon: +49 (0) 761 / 4588 – 2282  
E-Mail: [jacob.forster@ise.fraunhofer.de](mailto:jacob.forster@ise.fraunhofer.de)



### Ansprechpartner R. Kohlhauer GmbH:

Name: Lukas Bäuerle  
Adresse: Draisstr. 2, D-76571 Gaggenau  
Telefon: +49 (0) 7225 / 9757 -28  
E-Mail: [lukas.baueuerle@kohlhauer.com](mailto:lukas.baueuerle@kohlhauer.com)



### Ansprechpartner Igrapower GmbH:

Name: Wolfgang Schwarz  
Adresse: Magdeburger Allee 199, D-99086 Erfurt  
Telefon: +49 (0) 361/ 26 27 13-13  
E-Mail: [schwarz@igrapower.com](mailto:schwarz@igrapower.com)



### Assoziierte Partner und Unterbeauftragungen:

Bundesanstalt für Straßenwesen



EGIS Energiegenossenschaft



Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsorschung  
beim Eisenbahn-Bundesamt



Megasol Energie AG



## Inhalt

1. Ausgangssituation des Vorhabens .....	7
1.1 Aufgabenstellung.....	7
1.2 Voraussetzungen .....	7
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens .....	10
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse .....	10
2.1.1 AP 1 Anforderungsanalyse .....	10
2.1.2 AP 2 PV-Modulentwicklung .....	12
MS 2.2 Kategorisierung von Modulkonzepten und Anwendungsfällen.....	13
Modulkonzepte .....	14
MS 2.1 FEM-Analysen.....	28
Vorbaulösungen .....	28
Aufsatzlösung .....	31
MS 2.3 und MS 2.4 Optimierung der Konzepte.....	32
MS 2.5 Laminationsverfahren für strukturierte Folien .....	33
MS 2.6 Auswahl von Aufbauten für weitere Tests .....	34
MS 2.7 Life Cycle Assessment.....	35
2.1.3 AP 3 PV-Modulherstellung .....	37
MS 3.1 Transformation Modulkonzepte auf industrielle Produktionsanlage .....	37
MS 3.2 Module für in-situ Testaufbau (Demonstrator) .....	37
Konzept 7 Kombinationslösung .....	38
Konzept 4 Mikroperforierte Absorber.....	39
Konzept 8 Integrierte Standardmodule für straßenabgewandte Seite.....	40
Konzept 9 Kassettenlösung .....	41
Konzept 6 Aufsatz mit Süd und Ost/West Ausrichtung.....	42
2.1.4 AP 4 PV-Modulprüfung.....	44
MS 4.1 Definition der Prüftests .....	44
MS 4.2 Stofftransportmodell.....	45
MS 4.3 Test zum Anprall von Steinen nach DIN EN 1791-1 .....	48
2.1.5 AP 5 Entwicklung Lärmschutzelemente und Befestigungssystem .....	52
MS 5.1 Konzepte für Nachrüstung und Umrüstung .....	53
MS 5.2 Aufbau- und Rahmensysteme .....	53

MS 5.3 Innovative Ansätze .....	53
2.1.6 AP 6 Elektrische Systemanbindung .....	54
MS 6.1 Elektrische Systemanbindung .....	55
FMEA .....	55
Vergleich Moduloptimierer und Modulwechselrichter: Sicherheit / Kosten.....	56
MS 6.2 Betriebsführungsstrategien.....	61
MS 6.3 Konzepte zur lokalen Nutzung der Energie .....	62
MS 6.4 Elektrische Anbindung des PV-Lärmschutzwandsystems .....	63
MS 6.5 Auswertungen der Ertragsmessungen .....	65
2.1.7 AP 7 Prototypenaufbau- und Erprobung.....	68
MS 7.1 Aufbau Demonstrator Lärmschutzwand .....	69
MS 7.2 Netzanbindung und Monitoring.....	70
MS 7.3 Auswertung der akustischen in-situ Messungen .....	72
2.1.8 AP 8 Kostenanalyse, Geschäftsmodelle und rechtliche Rahmenbedingungen.....	77
MS 8.1 Gesamtkostenanalyse und Wirtschaftlichkeit.....	78
Kostenentwicklungen von Solarmodulen und Lärmschutzwänden .....	78
Marktpotenzial .....	79
EEG-Einspeisevergütung.....	79
Direktvermarktung .....	80
Eigenverbrauch.....	81
MS 8.2 Geschäftsmodelle und Vermarktungsstrategien .....	81
Geschäftsmodelle PV-Lärmschutzwände an der Straße .....	82
Vermarktungsstrategien.....	83
MS 8.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Verbesserungsvorschläge .....	83
Verbesserungsvorschläge .....	83
2.2 Zahlenmäßiger Nachweis .....	85
2.3 Notwendigkeit der Arbeit.....	85
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	85
2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite .....	85
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen .....	86
3 Anlagen.....	87
3.1 Zusätzliche Fotos und Informationen.....	87
Kombinationslösung.....	87
Kassettenlösung .....	87
Mikroperforierte Absorber.....	88
Rückseite der Lärmschutzwand.....	88

Spezifikationen von Megasol zu MPA-Modulen (Konzept 4) mit M6 RearCon-Zellen.....	89
Spezifikationen von Megasol zu Kombinations-Modulen (Konzept 7) mit G1 HiR-Zellen .....	89
Spezifikationen von Kassetten-Modulen (Konzept 9) mit M6 RearCon-Zellen.....	90
3.2 Literaturverzeichnis .....	91
3.3 Erfolgskontrollbericht.....	92
3.4 Berichtsblatt .....	92

## 1. Ausgangssituation des Vorhabens

### 1.1 Aufgabenstellung

Im Forschungsprojekt PVwins ging es im Kern darum, verschiedene Varianten für Nachrüstung und Neubau von integrierten und außen montierten Photovoltaik-Elementen für Lärmschutzwände zu entwickeln und zu erproben. Im Fokus standen die Erarbeitung innovativer Konzepte, die sowohl die Anforderungen an die Schallabsorption als auch eine effiziente Solarenergieerzeugung in Lärmschutzwänden erfüllen. Darüber hinaus wurden elektrische Systemkonzepte entwickelt und die Kostenstrukturen, Geschäftsmodelle und technische, organisatorische und rechtliche Rahmenbedingungen untersucht.

### 1.2 Voraussetzungen

Das Projekt wurde während teilweise erschwerter Bedingungen durchgeführt, die zusammengenommen für die notwendige kostenneutrale Verlängerung gesorgt haben. Hier zu nennen ist zunächst die Covid-19 Gesundheitskrise, in deren Folge die persönliche Zusammenarbeit innerhalb der Unternehmen, aber auch mit den Projektpartnern phasenweise erschwert wurde, und zugleich Lieferketten gestört wurden und Materialkosten anstiegen. Unter anderem daraus resultierend konnten die Sondermodule für den Demonstrator nur deutlich verzögert produziert werden. Ebenfalls ist zu nennen, dass der anfangs angedachte Standort für den Demonstrators als unzureichend geeignet befunden wurde, und der Bau einer neuen Lärmschutzwand auf dem Testgelände des Fraunhofer ISE deutlich mehr Zeit und Ressourcen in Anspruch nahm. Als weitere erschwerende Bedingung führte beim Fraunhofer ISE die Einführung eines ERP-Systems von SAP zu erheblichen Verzögerungen durch anfangs fehlende oder langwierige Prozesse, z.B. bei Aufsetzung eines F&E-Vertrags mit dem Modulhersteller Megasol.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt begann am 01.04.2020 mit der Anforderungsanalyse, in der Anforderungen aus Normen und rechtlichen Rahmenbedingungen ausgearbeitet wurden. Danach erfolgten die Entwicklung und Herstellung von kleinformatigen Prototypen. Von einer größeren Anzahl an Konzepten wurden 5 Varianten zur technischen Detailentwicklung ausgewählt und für die Erprobung in einer Demonstrator Lärmschutzwand

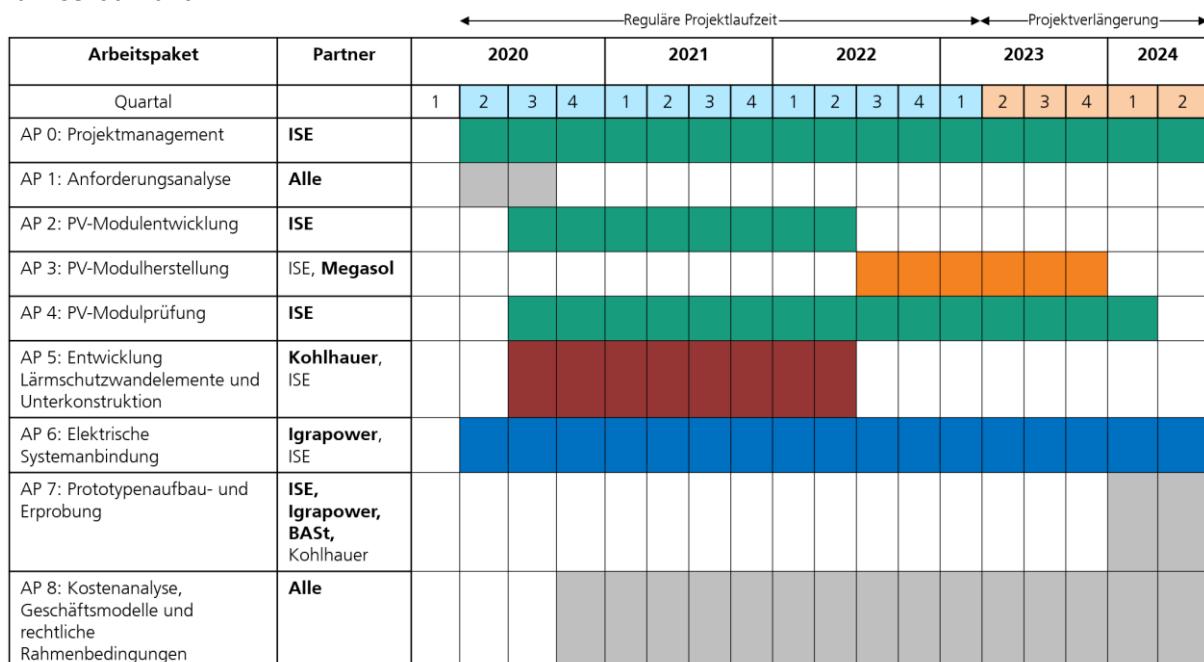


Abbildung 1: Zeitlicher Ablauf der Projektdurchführung

gebaut. Die Testphase umfasste akustische in-situ Messungen sowie die elektrische Systemanbindung zum Monitoring des Ertrags. Aufgrund in Kapitel 1.2 beschriebener erschwerender Voraussetzungen, wie Lieferverzögerungen von Komponenten und der Notwendigkeit, eine neue Demonstratorwand bauen zu lassen, wurde das Projekt vom 01.04.2023 bis zum 30.06.2024 kostenneutral verlängert (Abbildung 1).

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der aktuelle Stand der Technik zeigt, dass die Integration von Photovoltaik in Lärmschutzwände eine wichtige Rolle bei der integrierten Photovoltaik spielt, und bereits vor mehr als 30 Jahren als attraktives Flächenpotenzial erkannt wurden.



Abbildung 2: Zeitungsartikel von 1987 in der Schweizer Sonntagszeitung zu den ersten geplanten PV-Lärmschutzwänden, Bildquelle [1]

So wurde 1989 in der Schweiz die erste PV-Anlage auf einer Lärmschutzwand installiert [2] und es folgten diverse Pilotprojekte im deutschsprachigen Raum, bei denen sowohl angewinkelte Module, spezielle „Zick-Zack“-Konstruktionen mit bereits teilweise absorbierenden Flächen, und vertikale PV-Lärmschutzwände aufgebaut wurden. Einen großen Anteil an den frühen Entwicklungsarbeiten mit verschiedenen PV-Lärmschutzwandkonstruktionen hat die Schweizer TNC Consulting AG [3–5] und die Firma Kohlhauer. Einige neuere Projekte wie in den Niederlanden fokussierten sich auf bifazialen reflektierenden Lärmschutz [6].

Bisherige Entwicklungen und Tests von Konzepten hatten gezeigt, dass die Vereinigung der Funktionen von Schallschutz durch Schalldämmung, bei einigen Ansätzen auch mit Schallabsorption und Energieerzeugung durch Photovoltaik möglich ist, jedoch auch Herausforderungen in Bezug auf die primären Funktionen von Schallschutz bei zu erfüllender Sicherheit und Wirtschaftlichkeit mit sich bringt. Da sich sowohl die Solarmodule, als auch Anforderungen an Lärmschutzwände in der Zwischenzeit weiterentwickelt haben, war der Forschungsbedarf in Deutschland vorhanden, bestehende und neue Konzepte noch einmal aufzugreifen und weitergehender zu untersuchen. Durch das Projekt PVwins konnte ein differenzierteres Bild der Möglichkeiten und Schwierigkeiten gewonnen werden.

Auch in Zukunft sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich, um bestehende Konzepte in Bezug auf Kosten, Lärmschutz, Blendung, Sicherheit und Ästhetik zu verbessern, oder um neue Lösungen zu finden.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Dieses Projekt wurde als Verbundprojekt zwischen dem Fraunhofer ISE (Fkz: 03EE1062A), der Firma R. Kohlhauer GmbH (Fkz: 03EE1062B) und der Firma Igrapower GmbH (Fkz: 03EE1062C) durchgeführt.

Hauptsächliche Aufgaben und Bearbeitung von Arbeitspaketen lag bei den Verbundpartnern wie folgt.

Verbundprojektpartner	Aufgaben	Arbeitspakete
Fraunhofer ISE	Projektleitung, Überführung von Expertise aus Photovoltaik-Modultechnik ins Projekt, Anforderungsanalyse, Prototypenerstellung, Entwicklung spezielller PV-Module, LCA, Steinschlagtests, Akustiksimulationen, Planung und Aufbau der Lärmschutzwand, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Wissenschaftliche Verwertung	AP 0, AP 1, AP 2, AP 3, AP 4, AP 5, AP 6 teilweise, AP 7, AP 8
R. Kohlhauer GmbH	Überführung von Expertise aus Lärmschutzwandbranche ins Projekt, Anforderungsanalyse, Geschäftsmodelle, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Bau von Komponenten für die Prototypen, Mithilfe bei Planung der Demonstratorwand	AP 0, AP 1, AP 4 teilweise, AP 5, AP 7 teilweise, AP 8
Igrapower GmbH	Überführung von Expertise aus dem Systemdesign von speziellen Solarprojekten und der Elektrotechnik ins Projekt, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Geschäftsmodelle, elektrische Anbindung und Auswertung der Demonstratorlärmschutzwand	AP 0, AP 1, AP 6, AP 7, AP 8

Darüber hinaus waren folgende als assoziierte Partner und Unterbeauftragungen aktiv:

Rolle	Unternehmen	Aufgaben	Arbeitspakete
Assoziiert, Unterbeauftragt	Megasol Energie AG	Modulbau für Prüftests und großformatige Prototypen des Demonstrators	AP 3, AP 4, AP 8
Unterbeauftragt	Bundesanstalt für Straßenwesen	Beratung zu Anforderungen, Regelmäßige Teilnahme bei allen Treffen, Akustikmessungen und Auswertung	AP 1, AP 7, AP 8
Unterbeauftragt	EGIS Energiegenossenschaft Inn-Salzach eG	Beratung zu Geschäftsmodellen und eigener Erfahrung, rechtliche Rahmenbedingungen	AP 6, AP 8
Assoziiert	Deutsches Zentrum für Schienenforschung beim Eisenbahn Bundesamt	Beratung zur Situation für Lärmschutzwände bei der Bahn	AP 1

## 2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die Arbeitspakete zunächst vorgestellt und der Erfüllungsstand der Meilensteine tabellarisch dokumentiert. Jeweils anschließend werden die relevantesten Arbeitsergebnisse vorgestellt und dokumentiert. Durch die Strukturierung der Arbeitspakete sind verschiedene Arbeitsstände der entwickelten PV-Lärmschutzwandvarianten über den Bericht fortlaufend verteilt, insbesondere die Phasen Konzeptionierung, Detailplanung Module und Konstruktion der Modulanbindung und Aufbau- sowie Anschluss des Demonstrators.

#### 2.1.1 AP 1 Anforderungsanalyse

In AP 1 wurden Anforderungen an die zu entwickelnden PV-Module aus den Regelwerken und rechtlichen Rahmenbedingungen durch alle Verbundprojektpartner, die EGIS und die BASt ausgearbeitet. Hierbei wurden unterschiedliche Anwendungsfälle wie absorbierender und reflektierender Lärmschutz mit den Varianten Neubau und Nachrüstungen gemeinsam betrachtet.

Tabelle 1: Meilensteine AP 1

Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis
MS 1.1	Erarbeitung der Anforderungen an PV-Lärmschutzwände, Auswahl davon in Tabelle 2

Zum Beginn des Projekts wurde zwischen den Projektbeteiligten qualitativ ausgearbeitet, welche Aspekte harte „Muss-Kriterien“, welche Aspekte „Soll-Kriterien“ und welche Aspekte optional als „Kann-Kriterien“ gesehen werden, um eine Priorisierung und Richtungsvorgabe für die Anforderungen an die zu entwickelnden Konzepte im Projekt zu haben.

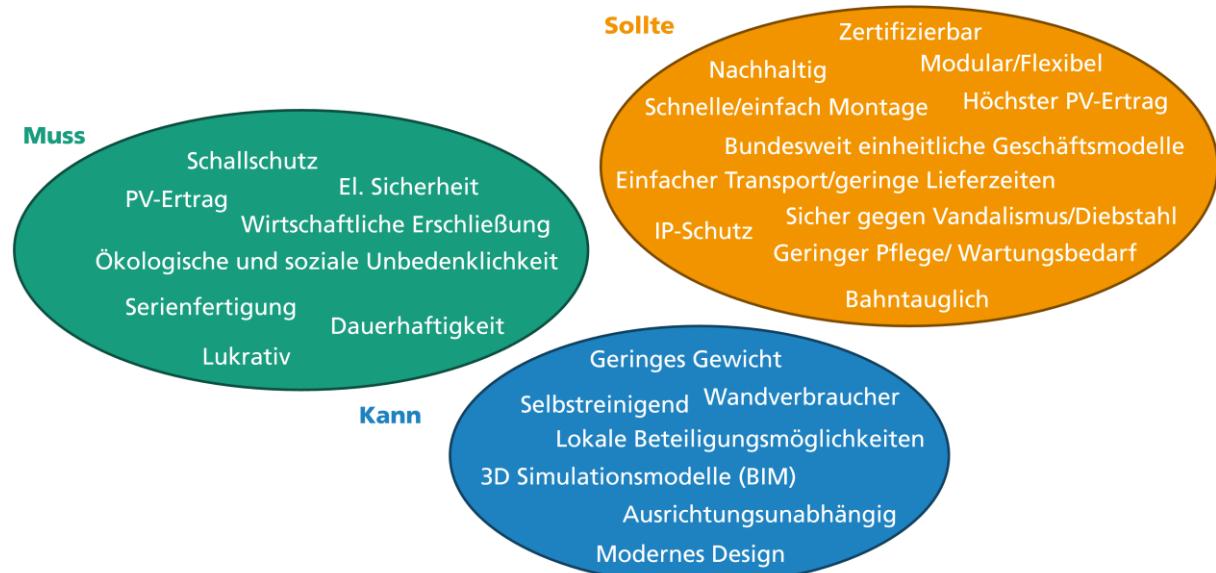


Abbildung 3: Qualitative Anforderungen eingeordnet nach "Muss", "Sollte", "Kann"

Generell müssen Lärmschutzwände eine Reihe von Normen erfüllen, welche sich im Falle von PV-Lärmschutzwänden um die Normen zu PV-Modulen und elektrischen Sicherheitsbestimmungen ergänzen. Eine Auswahl wichtiger Normen für Lärmschutzwände an der Straße ist in Tabelle 2 gezeigt. Detailliertere Auflistungen weiterer Normen zu Detailthemen rund um Ingenieursbauten, Materialien, Konstruktionsvorgaben, Ausschreibung und weiterer Aspekte sind in ZTV Lsw 22 im Anhang aufgelistet [7].

Tabelle 2: Auswahl relevanter Normen, Technischer Zusatzbestimmungen und Hinweispapiere

Kategorie	Norm	Nummer	Beschreibung
Lärmschutzwand	DIN EN	1793	Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften
Lärmschutzwand	DIN EN	1793 -1	Teil 1: Produktspezifische Merkmale der Schallabsorption in diffusen Schallfeldern
		-2	Teil 2: Produktspezifische Merkmale der Luftschalldämmung in diffusen Schallfeldern
		-3	Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum
		-4	Teil 4: Produktspezifische Merkmale – In-situ-Werte der Schallbeugung
		-5	Teil 5: Produktspezifische Merkmale – In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern
		-6	Teil 6: Produktspezifische Merkmale – In-situ-Werte der Luftschalldämmung in gerichteten Schallfeldern
Lärmschutzwand	DIN EN	1794	Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Nichtakustische Eigenschaften
		1794 -1	Teil 1: Mechanische Eigenschaften und Anforderungen an die Standsicherheit
		-2	Teil 2: Allgemeine Sicherheits- und Umweltanforderungen
		-3	Teil 3: Brandverhalten – Brennverhalten von Lärmschutzvorrichtungen und Klassifizierung
Lärmschutzwand	DIN EN	14388	Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Vorschriften
Lärmschutzwand	DIN EN	14389	Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Verfahren zur Bewertung der Langzeitwirksamkeit
		14389 -1	Teil 1: Akustische Eigenschaften
		-2	Teil 2: Nichtakustische Eigenschaften
Lärmschutzwand	DIN EN	17383	Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Nachhaltigkeitsbewertung – Deklaration der Leistungsindikatoren
Lärmschutzwand	ZTV Lsw	22	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Ausführung von Lärmschutzwänden an Straßen
Lärmschutzwand	RLS	90	Richtlinien für Lärmschutz an Straßen
Lärmschutzwand	RLS	19	Richtlinien für Lärmschutz an Straßen
Ingenieurbauten	RE-ING		Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten
Ingenieurbauten	ZTV-ING		Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten
Photovoltaik	IEC	61215	Terrestrische Photovoltaik(PV)-Module – Bauartegnung und Bauartzulassung
Photovoltaik	IEC	61730	Photovoltaik(PV)-Module – Sicherheitsqualifikation
Photovoltaik	IEC	61701	Photovoltaik (PV)-Module - Salznebel-Korrosionsprüfung
Blendung	LAI		Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen

Für Lärmschutzwände an der Bahn gibt es noch eine Reihe weiterer Normen wie die DIN EN 16272 und die DIN EN 16727. Da die Anforderungen und der finanzielle Aufwand einer Produktzertifizierung für die Bahn gegenüber Lärmschutzwänden an der Straße deutlich höher ist, wurde zu Beginn des Projekts entschieden, den Fokus von PVwins auf Lärmschutzwände an der Straße zu richten.

## 2.1.2 AP 2 PV-Modulentwicklung

In diesem Arbeitspaket wurden Modulaufbauten und Modulkonzepte für die Anwendung in Lärmschutzwänden entwickelt. Hierzu wurden nachfolgend aufgeführte Unterarbeitspakete bearbeitet, um schließlich die in Tabelle 3 aufgeführten Meilensteine zu erreichen. Die Hauptarbeiten lagen hierbei beim Fraunhofer ISE, unterstützt bei der Ideensammlung und Probenbereitstellung durch die R. Kohlhauer GmbH und durch die BASt.

### AP 2.1 FEM-Modellentwicklung

Entwicklung eines FEM-Modells zur Simulation der unterschiedlichen physikalischen Einflüsse eines PV-Moduls an einer Lärmschutzwand.

### AP 2.2 Modulkonzeptentwicklung

Für jeden Anwendungsfall wurden Konzepte entwickelt.

### AP 2.3 Leistungsoptimierung

Optimierung hinsichtlich je nach Konzept erstrebenswerten technischen Attributen, z.B. Absorption oder Gewicht.

### AP 2.4 Prototypenherstellung

Die in AP2.2 entwickelten Konzepte und die in AP2.3 vorgeschlagenen Designs wurden in diesem AP begleitend hergestellt und für Funktionsprüfungen anhand von Kleinproben in AP 4 zur Verfügung gestellt.

### AP 2.5 LCA-Analyse und Nachhaltigkeit

Die entwickelten Modulkonzepte werden in diesem AP auf ihre Nachhaltigkeit und CO<sub>2</sub> Verbrauch während der Herstellung und des Betriebes analysiert.

Tabelle 3: Meilensteine AP 2

Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis
<b>MS 2.1</b> FEM-Modell entwickelt	Die in AP 2.4 hergestellten Prototypen zum Einbau im Demonstrator wurden teils in einer mechanischen und akustischen FEM-Simulation analysiert und verbessert.
<b>MS 2.2</b> Pro Anwendungsfall 3 Modulkonzepte vorgeschlagen	Erfüllt
<b>MS 2.3</b> Modelle für jedes Modulkonzept in einer Optimierungssoftware angepasst	Es wurden je nach Optimierungsziel verschiedene Parameter in einer CAD-Software optimiert.
<b>MS 2.4</b> Optimierte Layouts, Materialien und Designs entwickelt	Es wurden je nach Optimierungsziel verschiedene Parameter in einer CAD-Software optimiert.
<b>MS 2.5</b> Laminationsverfahren für strukturierte Folien entwickelt	Erfüllt
<b>MS 2.6</b> Pro Anwendungsfall 3 Modulaufbauten für weitere Tests definiert	Erfüllt
<b>MS 2.7</b> LCA-Analyse der PV-Lärmschutzwände erstellt	Erfüllt

## MS 2.2 Kategorisierung von Modulkonzepten und Anwendungsfällen

Es wurden drei wesentliche Anwendungsfälle identifiziert, um eine Richtungsvorgabe für eine Produktentwicklung vorzugeben. Diese sind in Abbildung 4 eingeordnet. Für jeden dieser Anwendungsfälle wurden zunächst drei Konzepte entwickelt (MS 2.6) und teilweise durch Kleinproben und einfache Tests geprüft. Von diesen Konzepten wurden jeweils mindestens eines zur technischen Weiterentwicklung, Bau für die Demonstratorwand und großformatigen Tests (MS 3.2, MS 4.3, MS 5.1-5.3, MS 6.4, MS 6.5, MS 7.1 – 7.3) beim Projekttreffen in Neuötting am 28.04.2022 ausgewählt. Die Auswahl fiel dabei auf die Konzepte, die den Projektbeteiligten am aussichtsreichsten erschienen.

	Nachrüstlösung	Kombinationslösung	„Voll“-Lösung
Charakteristik	Zusätzlicher Aufbau von PV-Modulen auf bestehende Schallschutzwand	Überwiegend Reflektierende/ oder leicht Dämmende PV-Module in Kombination mit schallabsorbierenden Wandelementen	Überwiegend Absorbierende PV-Module als Hauptbestandteil einer Schallschutzwand
Anwendungsfall	Nachrüstung bereits vorh. Schallschutzwände	Neubau/Austausch von Schallschutzwänden	Neubau/Austausch von Schallschutzwänden
Modul	Anangepasster Standard	(Anangepasster) Standard	Absorbierende Module (Neu-Entwicklung)
Herausforderungen	Kosten, Statik, Leistung	Wandsystem, Modulbau	Modul-Schallschutz

Abbildung 4: Kategorisierung Anwendungsfälle für Lärmschutzwandkonzepte

Neben diesen gibt es noch weitere Kategorien, welche eine wichtige Unterscheidungsbasis für die Einbindung von PV an bestehende oder neue Lärmschutzwände sein können und bei einer Einzelfallbetrachtung als technologische Unterscheidungsmerkmale genutzt werden können:

Ausrichtung	Straßenkontext	Material	Integriert vs. außen montiert
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vertikal / Angewinkelt</li> <li>• Süd / Ost-West</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autobahn</li> <li>• Bundesstraße</li> <li>• Gemeindestraße</li> <li>• Brücke</li> <li>• Sonderfall Bahn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluminium</li> <li>• Holz</li> <li>• Beton</li> <li>• Steingabionen</li> <li>• Transparentes Acryl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elemente zum Einsetzen zwischen Pfosten</li> <li>• Aufsätze zur Montage über der Wand</li> <li>• Montagesysteme vor der Wand</li> </ul>

## Modulkonzepte

In der Konzeptphase wurden zunächst zu den drei Kategorien Ideen gesammelt und teils mit einfachen Proof-of-Principle Tests verfolgt. Einige der Konzepte zielten vor allem auf Absorption (bzw. Reflexionsminderung), andere nur auf Schalldämmung und wieder andere nur auf die Art der Montage ab. In der Konzeptphase war zunächst nicht der primäre Anspruch, direkt die perfekte Lösung zu finden, die in akustischer, solarer, bauwerkstechnischer, nachhaltiger und langlebig robuster Hinsicht alle Wünsche und Anforderungen erfüllt. Im Folgenden wird eine Auswahl der Konzepte als Steckbriefe vorgestellt und zusätzlich herausgefundene Informationen oder Ergebnisse jeweils nachfolgend erläutert.

Konzept	1
Benennung	Strukturierte Moduloberflächen
Schallschutz	Schalldiffusion
Beschreibung	<p>Einsatz von transparentem, strukturiertem Material wie Glas oder Polymer auf der Modulvorderseite. Durch die Oberfläche soll der Schall diffus anstatt gerichtet reflektieren und zugleich die Gefahr durch optische Blendung der Verkehrsteilnehmer reduziert werden. Ausreichend dicke Module erreichen zudem hohe Schalldämmung. Nachteile sind verschlechterte Lichttransmission zu den Solarzellen, Verschmutzung, erhöhte Kosten, und keine nennenswert wirksame Schallabsorption.</p>  <p>Abbildung 5: Beispiel eines Testmoduls mit strukturiertem Vorderseitenglas</p>

Konzept 1 wurde im Projekt nicht tiefgehender weiterverfolgt, da die Erfolgsaussichten gegenüber den aufgeführten Nachteilen nicht ausreichend entgegenstanden.

Konzept	2
Benennung	Schalltransparente teilperforierte Solarmodule
Schallschutz	Schalltransmission zu Absorbermedium
Beschreibung	Durch Perforation des Vorderseitenmaterials (z.B. Glas, Polymer wie ETFE oder PET) zwischen den Zellen wird teilflächig der Schall auf ein akustisch absorbierendes Medium (z.B. Steinwolle) durchgelassen.

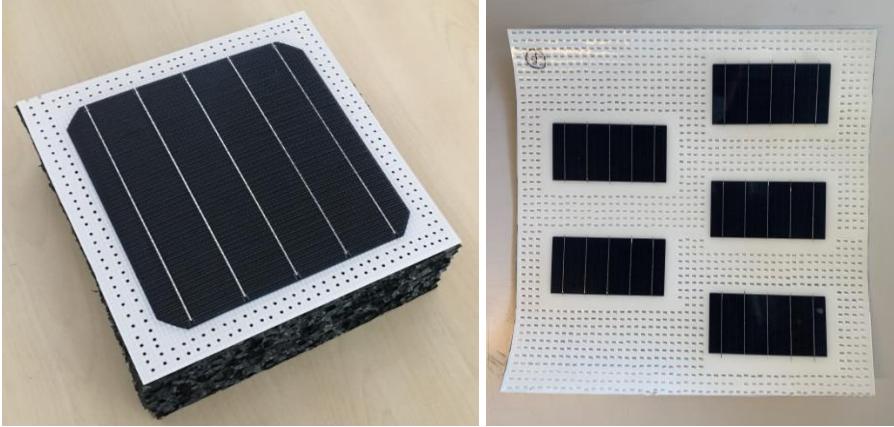


Abbildung 6: Testmodule eines teilperforierten Solarmoduls mit Schaumstoffabsorber

Für Konzept 2 wurde am Fraunhofer ISE ein Edelstahlrahmen gefertigt, um schallabsorbierendes Material und ein PV-Modul mit Polymermaterial und Perforation zwischen den vereinzelt einlaminierten Zellen (siehe Abbildung 7) einzufassen. Dieses Testmodul wurde während einer Messserie bei der Firma Müller BBM in einer Hallkabine akustisch auf die Absorptionseigenschaften vermessen. Hierbei wurde ebenfalls eine Variation der Absorberwollen aus PES und Steinwolle mit verschiedenen spezifischen Gewichten getestet.

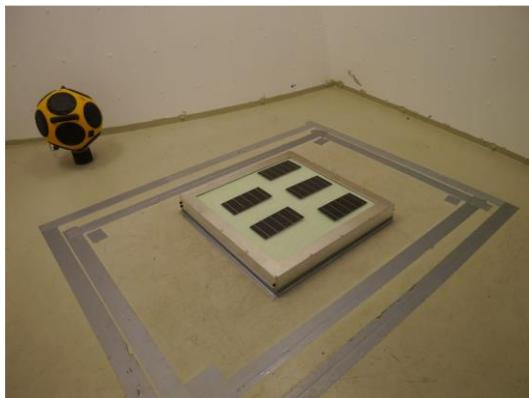


Abbildung 7: Konzept 2 Schalltransparentes teilperforiertes Solarmodul in Hallkabine

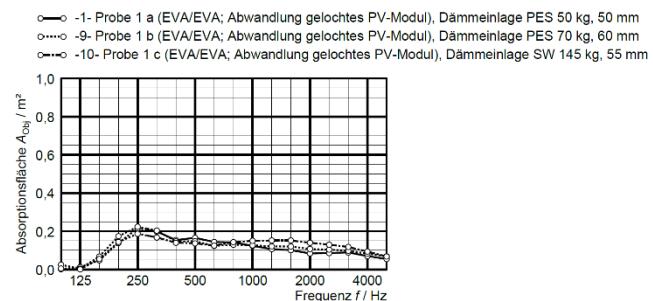
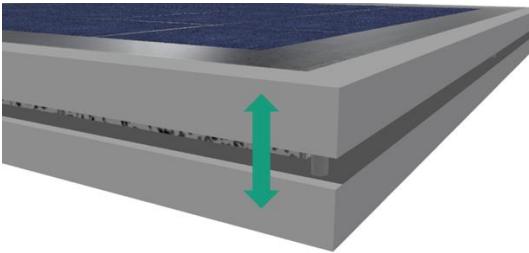


Abbildung 8: Ergebnisse Absorptionsmessungen zu Konzept 2 mit drei Varianten von schallabsorbierender Wolle

Die Messung des auf die Messfläche normierten Schallabsorptionsgrads in Abbildung 8 zeigt, dass die erzielte Schallabsorption zwar breitbandig deutlich zu erkennen ist, jedoch deutlich hinter der Schallabsorption herkömmlicher perforierter Aluminiumabsorber mit Steinwollefüllung zurückbleibt. Aus einer Kosten-Nutzen-Abschätzung wurde dieses Konzept daher nicht weiter verfolgt, da die Perforation des Moduls eine große Abweichung zu konventionellen Solarmodulen mit erheblichen Mehrkosten und möglichen Degradationsrisiken durch etwa Wasser- und Sauerstoffdiffusion zu den Zellen bedeuten würde. Zudem liegt ein Zielkonflikt beim Flächenverhältnis PV zur perforierten Fläche vor. Wird eine größere Fläche mit Solarzellen belegt, bleibt weniger Fläche für die absorbierenden Zwischenräume.

Konzept	3
Benennung	Schwingende ultraleichte Solarmodule im Verbundplattenresonanzabsorber
Schallschutz	Schalltransmission zu Absorbermedium
Beschreibung	<p>Der Ansatz von Konzept 3 liegt darin, ein Solarmodul darauf zu optimieren, dass es vom Schall im Verkehrslärmspektrum in den Eigenfrequenzen angeregt wird und die Schwingung auf ein Feder-Masse-System dahinter überträgt, um die Schallenergie zu dämpfen. Dieses System kann entweder ein Luftspalt zu einer schallharten Rückplatte sein, oder Schaumstoff wie PU.</p>  <p>Abbildung 9: Prinzipdarstellung Verbundplattenresonanzabsorber</p>

Für Konzept 3 wurden FEM-Simulationen zur Bestimmung der Eigenfrequenzen von Glas mit 1m x 1m und Variation der Dicke und damit des Flächengewichts durchgeführt, um zu verstehen, welches Flächengewicht und welche Parameter des Feder-Masse Systems die Zielgröße für dieses Konzept darstellen. Da die Eigenfrequenzen abhängig von Material, Gewicht, Steifigkeit und Geometrie sind, ist dies mit Aufwand verbunden und wurde nur stark vereinfacht für den fiktiven Fall betrachtet. Die Rückseite des Moduls (Luftspalt oder PU) wurde als Federkonstante angenommen, welche aus der Dicke des PU-Materials oder des Luftspaltabstands berechnet wurde.

Als Zielwert für die akustischen Optimierungen der Absorption wurde im Projekt betrachtet, für welche Frequenzen der berechnete Einzahlwert  $D_{L_{\alpha, NRD}}$  der Absorption in dB nach dem Standardverkehrslärmspektrum in DIN EN 1793-3 [8] den höchsten Effekt hat. Durch die Gewichtungsfaktoren  $L_i$  wird hier bei 1000 Hz der größte Effekt auf den Einzahlwert der Absorption bewirkt. Daher wurde bei den Konzeptentwicklungen versucht, das Absorptionsmaximum auf 1000 Hz zu optimieren.

In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass bei einer Eigenfrequenz von 1000 Hz die Flächenmasse bei etwa 0,3 kg/m<sup>2</sup> sein sollte. Im Vergleich dazu steht ein übliches Modulgewicht von Glas/Backsheet Modulen von etwa 10 bis 12 kg/m<sup>2</sup>. Um das Funktionsprinzip in der Hallkabine von Müller BBM zu testen, wurde ein Rahmen in 50 cm x 50 cm Größe hergestellt, in welchen verschiedene Absorberfüllungen eingebracht und Leichtbaumodule vorgelagert fixiert werden können (siehe Abbildung 11).

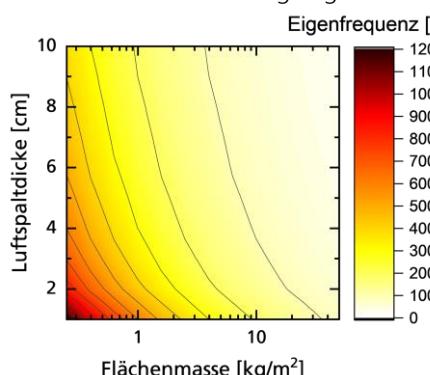


Abbildung 10: Contourplot Eigenfrequenzen Verbundplattenresonanzabsorber mit Luftspalt

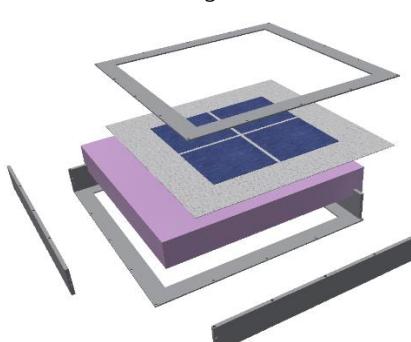


Abbildung 11: Explosionsskizze des Verbundplattenresonanzabsorbers

Tabelle 4: Materialvariation der BOM für Verbundplattenresonanzabsorber

Nr.	Materialien	Gewicht	Absorberfüllung
1	EVA / EVA	1,52 kg/m <sup>2</sup>	
2	ETFE / ETFE	1,14 kg/m <sup>2</sup>	
3	BS / BS	1,69 kg/m <sup>2</sup>	
4	ETFE / GFK	3,29 kg/m <sup>2</sup>	a)
5	Glas / BS 0,2	1,81 kg/m <sup>2</sup>	b)
6	Glas / BS 0,5	2,49 kg/m <sup>2</sup>	c)
7	Glas / Glas 0,2	1,97 kg/m <sup>2</sup>	
8	Glas / Glas 0,5	3,33 kg/m <sup>2</sup>	

a) PES 50kg/50mm, b) PES 70kg/60mm, c) Steinwolle 145kg/55mm

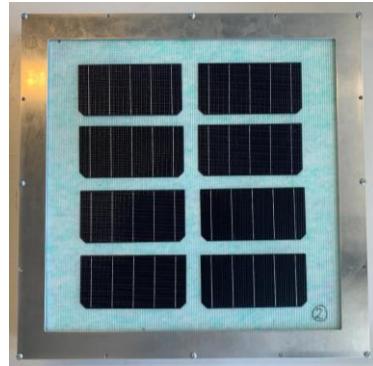


Abbildung 12: Beispielbild mit BOM 2

Für die Messungen wurde die PES Absorberfüllung mit 50 mm Stärke und 50 kg/m<sup>3</sup> Dichte verwendet. Wie im Graphen 1 in Abbildung 13 zu erkennen ist, liegt die auf die Messfläche normierte Absorptionskurve des teilperforierten Solarmoduls (Konzept 2) deutlich höher als die der Resonanzabsorbermodule. Dennoch ist der höchste Absorptionswert nur 0,2. Das Absorptionspeak liegt sehr niederfrequent bei ca. 250 Hz und weit weg von dem für die Erzielung eines hohen Einzahlwerts optimalen Bereich von 1000 Hz. Da die Messtechnik nur für Frequenzen ab 250 Hz ausgelegt ist, sind die Absorptionswerte zwischen 125 – 250 Hz mit hoher Unsicherheit zu betrachten und daher gestrichelt gekennzeichnet. Der berechnete Einzahlwert lag bei 0,68 dB und damit weit unter den 4 dB für die Klassifizierung als absorbierende Lärmschutzwand.

Es wurden PV-Leichtbaumodule mit Einkapselung aus EVA/EVA, ETFE/ETFE, Backsheet/Backsheet und Variationen mit 0,2 mm und 0,5 mm Ultra-Dünnglas beidseitig und als Variante mit Backsheet getestet. Wie im rechten Diagramm in Abbildung 9 gezeigt wird, liegen die berechneten Einzahlwerte der Leichtbaumodule für den Resonanzabsorber noch deutlich geringer als beim gelochten Folienmodul zwischen 0,05 und 0,11 dB.

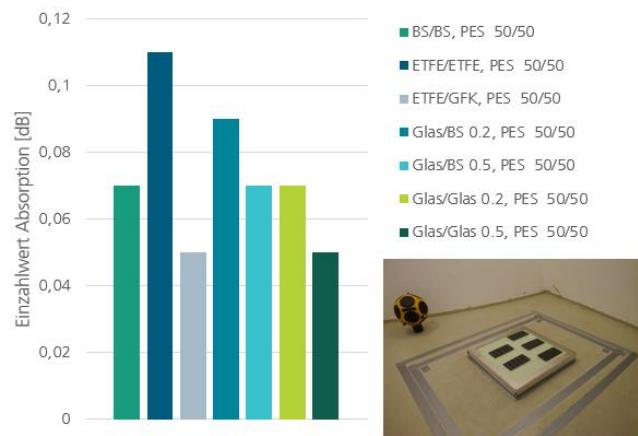
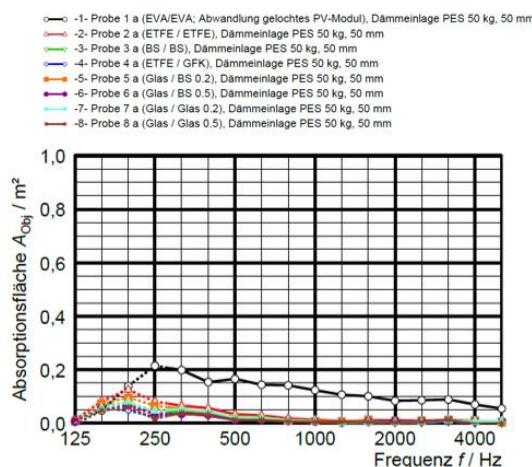
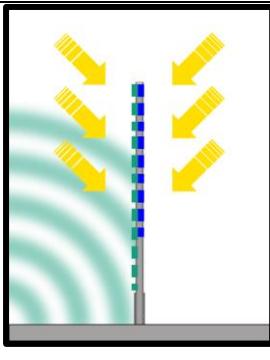


Abbildung 13: links: Graph 1: Absorptionsmessung gelochtes Folienmodul (Konzept 2), Graph 2-8: Resonanzplattenabsorber mit verschiedenen Leichtbau-PV-Modulen (Konzept 3). Rechts: Berechnete Einzahlwerte der Resonanzabsorberproben

Es konnte gezeigt werden, dass die beiden Ansätze geringfügige absorbierende Eigenschaften haben und damit besser absorbieren als ein schweres schallreflektierendes PV-Modul oder Glas. Jedoch wurde aufgrund der geringen Absorption und mechanischen Empfindlichkeit der Leichtbaumodule davon abgesehen, diese Ansätze mit weiterem Aufwand zu verfolgen.

Konzept	4
Benennung	Transparente Mikroperforierte Absorber (MPA)
Schallschutz	Schallabsorption durch transparenten Helmholtzresonator
Beschreibung	<p>(1) hole diameter  (2) distance between holes  (3) plate thickness  (4) air gap distance</p> <p>Konzept 4 basiert auf der Nutzung eines aus der Raumakustik in der Innenarchitektur bekannten Schallabsorptionsprinzips, des mikroperforierten Absorbers. Für den Einsatz vor dem PV-Modul wurde er transparent ausgewählt. Er besteht aus einer transparenten Acrylplatte mit einer Mikroperforation von 40.000 Löchern pro Quadratmeter, die durch Abstandshalter mit einem Luftspalt zur schallreflektierenden Glasoberfläche der PV-Module gehalten wird. Die getesteten Lochdurchmesser lagen zwischen 0,6 und 0,8 mm. Dabei sind die Funktionen Schallabsorption und Energiegewinnung seriell integriert und nicht wie bei der Kombinationslösung parallelisiert. Die Schallabsorption funktioniert nach dem Prinzip eines Helmholtz-Resonators. Die Schallwellen propagieren durch die Löcher, werden an der Glasoberfläche des PV-Moduls reflektiert und es entsteht ein resonierendes Masse-Dämpfer-System [9]. Die Löcher lassen nicht nur den Schalldruck in dieses Resonanzsystem eindringen, sondern verursachen auch Reibung an der sich bewegenden Luftmasse, wodurch ein Teil der Schallenergie in Wärme umgewandelt wird. Der mikroperforierte Absorber (MPA) hat vier Hauptparameter, die das Systemverhalten stark beeinflussen und zur Einstellung der Absorption in Abhängigkeit von der Frequenz verwendet werden können. Wie in Abbildung 14 dargestellt, handelt es sich dabei um den Lochdurchmesser, den Abstand zwischen den Löchern, die Dicke der Platte und den Luftspaltabstand.</p> <p>Abbildung 14: Parameter zur Beeinflussung des Absorptionsverhaltens von MPA</p>  

Zur Durchführung akustischer Messungen von Absorbermaterialproben wurde durch Investmittel für PVwins ein Kundt'sches Impedanzrohr (siehe Abbildung 15) beschafft. Dieses wurde unter anderem zur Optimierung des Konzepts einer PV-Lärmschutzwand mit vorgelagerter MPA-Acrylplatte genutzt (Konzept 4). Das Impedanzrohr besteht aus einem geschlossenen länglichen Edelstahlgehäuse mit quadratischem

Querschnitt, in welchem ein Lautsprecher auf dem linken Ende Frequenzen durchswept zur Anregung von Proben, die auf dem rechten Ende eingebracht werden. Ein vor der Probe angebrachtes Mikrofonarray nimmt den reflektierten Schall auf. Die Bediensoftware rechnet daraus verschiedene Messkurven, wie z.B. die Impedanz, die Reflexion oder die Absorption über die Frequenzen.

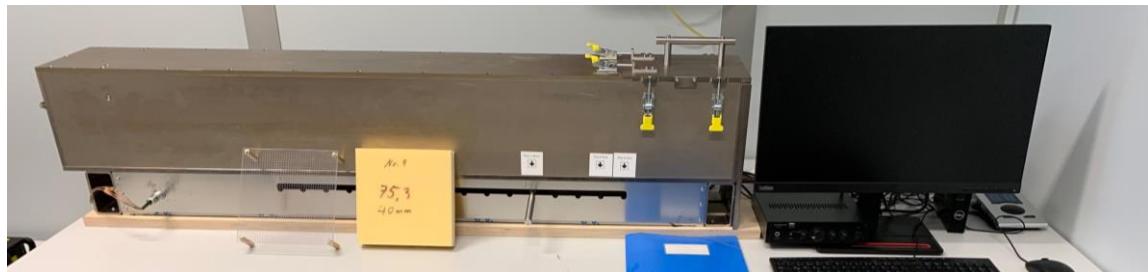


Abbildung 15: Kundt'sches Impedanzmessrohr am Fraunhofer ISE

Konzept	5
Benennung	Schallisolierende Einkapselungsfolien
Schallschutz	Erhöhte Schallisolation durch optimierte Einkapselungsfolien
Beschreibung	Konventionelle „Standardsolarmodule“ werden am häufigsten mit 3,2mm Vorderseitenglas und Rückseitenfolie gebaut, oder mit 2mm Glas auf Vorder- und Rückseite. Um gute schallisolierende Eigenschaften zu erreichen, werden transparente Lärmschutzwände mit Acrylelementen häufig mit Acrylplatten zwischen 15 und 20 mm Dicke ausgestattet. Für Solarmodule mit einer ähnlichen Gesamtdicke würde dies erhebliche Mehrkosten und Sondermodulbau bedeuten. Zudem können nicht viele Hersteller derartig massive Module verarbeiten. In der Architektur und Glasindustrie liegt auch bei Glasfassaden der Anreiz, Schallisolation mit geringer Gesamtmasse herzustellen. Hier wurden daher von verschiedenen Herstellern speziell optimierte Folien mit verringelter Schalltransmission z.B. aus PVB entwickelt, um bei gleichbleibender Dicke eine verbesserte Schallisolation von bis zu 3 dB zu erzielen.

Für Konzept 5 wurden Testmodule gebaut, um die Lamination solcher Einkapselungsmaterialien zu erproben. Hierzu wurde Trosifol SC Monolayer PVB des Herstellers Kuraray verwendet. Die Laminationsparameter konnten ohne Probleme angepasst werden. Es stand jedoch keine Möglichkeit zur Verfügung, die Schallisolation im Vergleich zu üblicherweise verwendetem PVB, EVA oder POE zu testen. Die im späteren Projektverlauf für den Demonstrator gefertigten Module durch die Firma Megasol waren durch die Verwendung von 2x 6mm Glas ohnehin gut isolierend und hier wäre ein unerprobtes, neuartiges Einkapselungsmaterial zu riskant gewesen. Um eine Abschätzung der zu erwartenden Schallisolation zu bekommen, kann ein Kalkulationstool des Herstellers Kuraray namens SoundLab AI verwendet werden, erreichbar unter <https://soundcalculator.trosifol.com/predict/metric/en>. Als Beispiel wurde in SoundLab AI ein Aufbau mit 2x 2mm Glas und 0,76mm Einkapselungsmaterial (entspricht in etwa der Gesamtdicke der zwei Lagen Einkapselungsmaterial bei Solarmodulen) mit Vergleich zwischen Trosifol SC Monolayer und Trosifol Clear betrachtet. Nach der Schalldämmungsnorm DIN EN ISO 717-1 in Gebäuden ergab die berechnete Schalldämmung für Trosifol SC Monolayer einen Wert von 31,9 dB gegenüber 28,7 dB für Trosifol Clear. Damit kann die Schalldämmung in der Theorie bei gleicher Dicke um 3,2 dB absolut gesteigert werden. Sofern es Kostenvorteile bringt, könnte der Einsatz einer solchen angepassten PVB-Folie eine Möglichkeit sein, die notwendige Glasdicke zu reduzieren und damit für ein nachhaltigeres Produkt zu sorgen, das einfacher handzuhaben ist.

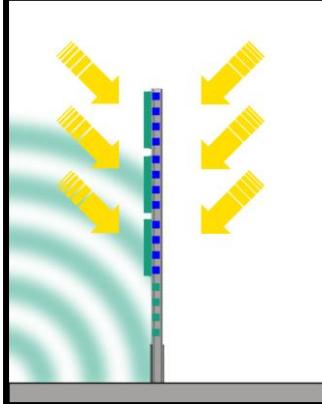
Konzept	6
Benennung	Aufsätze für Lärmschutzwände
Schallschutz	Vertikale absorbierende Flächen der Lärmschutzwand werden freigehalten, Schallbeugungseigenschaften können verbessert werden.
Beschreibung	Montagesystem, um Standardsolarmodule oberhalb von Lärmschutzwänden mit variabler Ausrichtung, z.B. horizontal, südgeneigt, Ost/West zu montieren. Dabei bleibt die vertikale absorbierende Fläche einer Lärmschutzwand frei und die Aufsätze können unabhängig vom Hersteller der Lärmschutzelemente angebracht werden. Statische Resttragfähigkeit muss im Einzelfall geprüft werden. Das durch die Firma R. Kohlhauer GmbH entwickelte Konzept richtet sich durch sein Design nicht nur an neue Lärmschutzwandinstallationen, sondern bietet sich auch als simpel gestaltete Nachrüstlösung bestehender Lärmschutzwände an, da zur Montage keine Löcher in bestehende H-Pfosten gebohrt werden müssen. Die Unterkonstruktion klemmt sich über ein schräges Langloch bereits durch ihr Eigengewicht an den H-Pfosten und wird durch Schrauben angeklemmt. Das Gewicht stützt sich zudem auf der Mittelsehne des H-Pfostens ab.

Während des Projekts entwickelte Kohlhauer in mehreren Iterationen eine kostengünstige, mechanisch flexible und robuste Unterkonstruktion. Die erste Installation eines Prototyps setzte Kohlhauer auf einer Testlärmschutzwand des werkseigenen Parkplatzes auf dem Firmensitz in Gaggenau um, um das Konzept zu erproben und zu verbessern. Die erzeugte Energie wird dabei gespeichert und für die abendliche

Parkplatzbeleuchtung genutzt. Die elektrische Anbindung und das Konzept für das Energiemanagement für diese Anwendung wurde dabei durch Igrapower erledigt. Eine weiterentwickelte Version wurde für den Demonstrator umgesetzt, hierzu mehr Details in Kapitel 1.3.

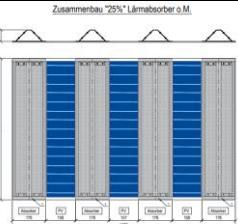
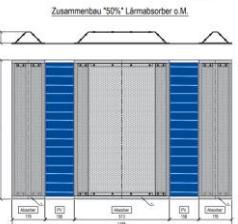
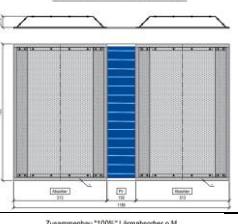
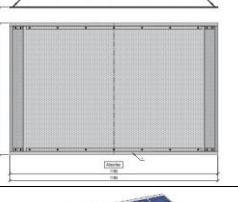


Abbildung 16: Links: PV-Aufsätze Kohlhauser Parkplatz Gaggenau, Rechts: Detailfoto einer Aufsatzvariante mit schalldichtem akustisch absorbierendem Aufsatz

Konzept	7
Benennung	Kombinationslösung
Schallschutz	Vollflächige Schallisolation, teilflächige Absorption
Beschreibung	Akustisch absorbierende Flächen und reflektierende Solarflächen werden nebeneinander kombiniert. Die Absorption ist vereinfacht dargestellt von den Flächenanteilen abhängig. Die Schallisolation geschieht vollflächig, indem ein ausreichend dicker Aufbau gewählt wird. Für dieses Konzept wurden verschiedene Prototypen für akustische Messungen gebaut, ein Patent durch das Fraunhofer ISE beantragt (DE 10 2022 207 970 A1) und für die spätere Umsetzung im Demonstrator ein Spezial-PV-Modul entwickelt. Letzteres wurde in ein Rahmensystem der R. Kohlhauser GmbH integriert (siehe MS 5.2).
	

Zum Test verschiedener Flächenanteile von Solarfläche gegenüber absorbierender Fläche für Konzept 7 wurden 6 PV-Module mit  $0,89 \text{ m}^2$  Gesamtfläche am Fraunhofer ISE hergestellt. Die verschiedenen großen Absorberelemente wurden von Kohlhauser gefertigt (siehe Tabelle 5). Die Akustikmessungen wurden in der Hallakabine der Firma Müller BBM durchgeführt, um die Schallabsorption im Frequenzspektrum von 315 bis 5000 Hz zu messen. Ziel der Messungen war es, für eine Variation der PV-Flächenanteile (als 1 bis 3 PV-aktive Streifen auf der Gesamtfläche) die Schallabsorption herauszufinden und ein attraktives Verhältnis zwischen PV-Fläche und Absorptionsfläche zu finden.

Tabelle 5: Übersicht über die 6 PV Module und Absorberelemente für die Hallraum-Messungen

Proben-ID	Zeichnung	Bezeichnung	Technische Details
14344		4 kleine Absorber	<ul style="list-style-type: none"> <li>PV-Leistung: 71,5 Wp</li> <li>PV-Flächenanteil: 40%</li> <li>Absorberflächen inkl. Seitenflanken: 0,68 m<sup>2</sup></li> </ul>
14345		2 kleine + 1 mittlerer Absorber	<ul style="list-style-type: none"> <li>PV-Leistung: 47,7 Wp</li> <li>PV-Flächenanteil: 26,7%</li> <li>Absorberflächen inkl. Seitenflanken: 0,76 m<sup>2</sup></li> </ul>
14346		2 mittlere Absorber	<ul style="list-style-type: none"> <li>PV-Leistung: 23,8 Wp</li> <li>PV-Flächenanteil: 13,4 %</li> <li>Absorberflächen inkl. Seitenflanken: 0,84 m<sup>2</sup></li> </ul>
14347		1 großer Absorber	<ul style="list-style-type: none"> <li>PV-Leistung: 0 Wp</li> <li>PV-Flächenanteil: 0%</li> <li>Absorberflächen inkl. Seitenflanken: 0,93 m<sup>2</sup></li> </ul>
14348		Kein Absorber	<ul style="list-style-type: none"> <li>PV-Leistung: 71,5 Wp</li> <li>PV-Flächenanteil: 100%</li> <li>Absorberflächen inkl. Seitenflanken: 0 m<sup>2</sup></li> </ul>
14349		Kein Absorber, Schall-dämmende Trosifol Folie im PV-Modul	<ul style="list-style-type: none"> <li>PV-Leistung: 71,5 Wp</li> <li>PV-Flächenanteil: 100%</li> <li>Absorberflächen inkl. Seitenflanken: 0 m<sup>2</sup></li> </ul>

Es wurden PERC Solarzellen mit 21,7 % Wirkungsgrad verwendet. Um die Verschattung der 61,5 mm dicken Absorberelementen auf die Solarzellen gering zu halten, wurden die Absorberelemente mit trapezförmigem Querschnitt an den langen Kanten mit 45° angeschrägten Seitenflächen gebaut. Hierdurch wird zugleich die wirksame Absorberoberfläche erhöht und es wird von akustischen Vorteilen durch zusätzliche Kantenbrechungen ausgegangen. Zum Vergleich verschiedener Absorberfüllungen wurde mit Steinwolle und mit PET-Wolle gefüllte Elemente verglichen. PV-Modul 14349 hat zusätzlich eine „Trosifol“-Folie der Firma Kuraray integriert, welche zur zusätzlichen Schalldämmung in Fassaden eingesetzt wird.

Aus den Messergebnissen in des Schallabsorptionsgrad in Abbildung 17 wurde nach DIN 1793-1 die Einzahlwerte in Dezibel berechnet. Diese sind in Abbildung 18 als Gegenüberstellung der Füllmaterialien dargestellt und in Abbildung 19 über die verfügbare PV-Modulleistung aufgetragen.

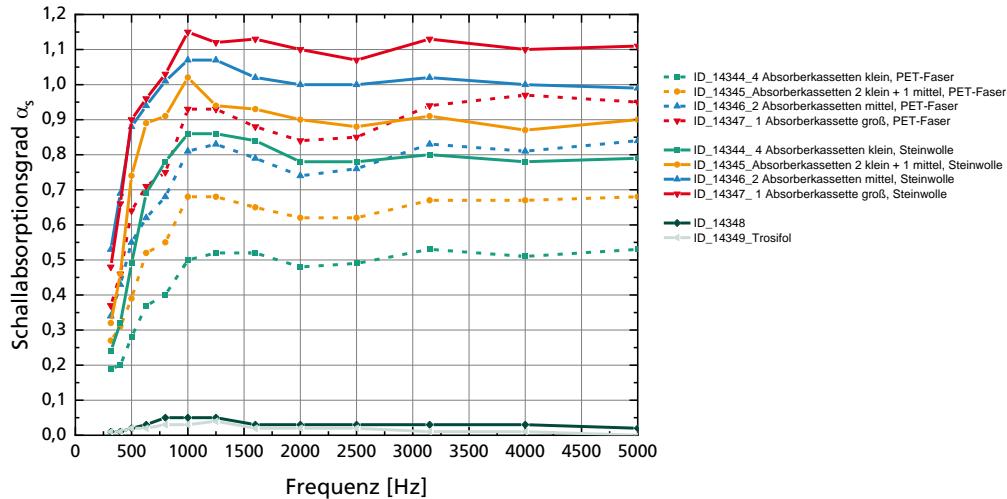


Abbildung 17: Schallabsorptionsgrad zwischen 315 bis 5000 Hz der Proben, gemessen bei Müller BBM

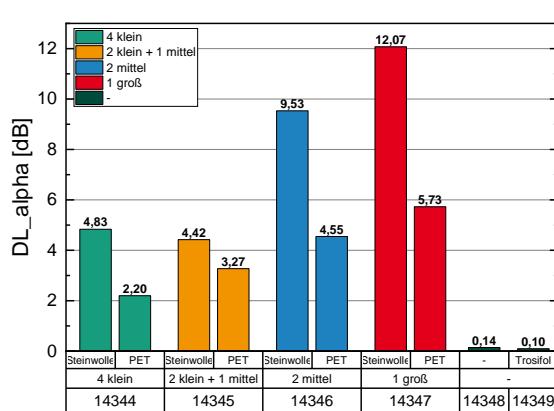


Abbildung 18: Einzahlwerte nach DIN 1793-1

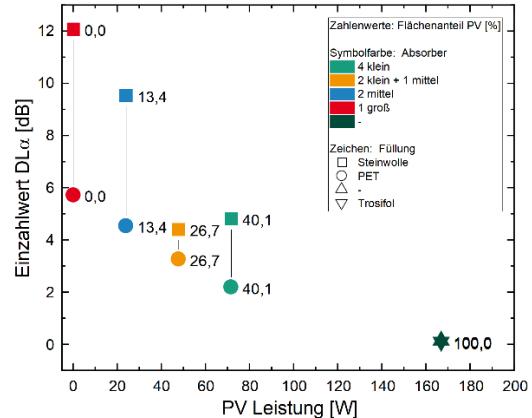
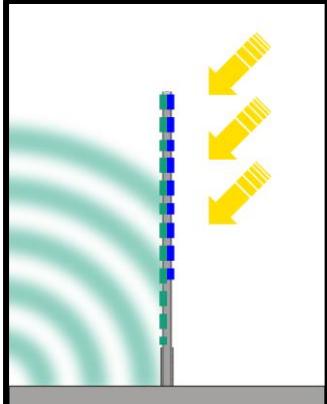


Abbildung 19: Einzahlwerte über die PV-Leistung und PV-Flächenanteil (Zahlenbeschriftungen)

Es zeigt sich, dass die Steinwollefüllung deutlich höher absorbiert als die Füllung mit PET-Wolle. Für zukünftige Tests könnte PET-Wolle mit höherer Dichte diesen Unterschied ausgleichen. Wie erwartet, ist die Absorption der Module ohne Absorberelemente sehr gering, da diese durch ihre Glasoberfläche nahezu vollständig schallhart reflektieren. Auch das Modul mit schalldämmender Trosifol-Folie (ID 14349) machte hier keinen Unterschied. Von den verglichenen Variationen ist der Aufbau mit vier schmalen Absorberstreifen (ID 14344) besonders attraktiv und stellt einen guten Kompromiss zwischen Absorption (mit Steinwolle: 4,83 dB) und PV-Flächenanteil von immerhin 40% dar. Ähnliche Versuche wurden zu einem späteren Zeitpunkt im Verlaufe der Projektlaufzeit durch das Fraunhofer IPB im Projekt „Klimaneutraler Lärmschutz“ (gefördert durch das Ministerium für Verkehr in Baden-Württemberg) im Hallraum anstatt Hallkabine unternommen. Hier wurde bei einem Flächenanteil von 35% noch 4 dB für die Absorption gemessen [10, p. 27]. Dieser Wert ist etwas schlechter, könnte aber mit dem Unterschied des Hallraums als Messumgebung zusammenhängen, der Wahl eines anderen Absorbermaterials und der grobteiligeren Geometrie des Aufbaus beim Fraunhofer IPB.

Konzept	8
Benennung	Straßenabgewandt integrierte Standardmodule
Schallschutz	Zur Straße vollflächig absorbierend, strassenabgewandt die reflektierende Modulfläche.
Beschreibung	Für den Anwendungsfall, dass die Südseite der Lärmschutzwand strassenabgewandt orientiert ist. In diesem Fall lassen sich Akustik und andere Anforderungen wie Steinschlagresilienz gut entkoppeln. Konzept 8 zielt auf die Verwendung von kostengünstigen Standardmodulen bei der Integration in ein Rahmensystem mit zusätzlich isolierenden Schichten ab.
	

Konzept 8 ist dem Produkt „Volta“ der Firma Kohlauer ähnlich. Ziel war jedoch, im Rahmen einer Abschlussarbeit den Fokus auf die Verwendung von Standardmodulen und die Anwendung strassenabgewandt zu legen und gegenüber dem Volta System die Anpassung auf neue Modulgrößen zu erleichtern. Im Rahmen der Abschlussarbeit wurde ein Rahmensystem und Montagebleche entwickelt. Dabei wurden FEM-Simulationen zur mechanischen Beurteilung bei Wind- und Eigenlasten durchgeführt. Die Einzelteile wurden von Kohlauer hergestellt und am Fraunhofer ISE zu einem PV-Lärmschutzwandelement zusammengebaut, um es im Demonstrator einzubauen.

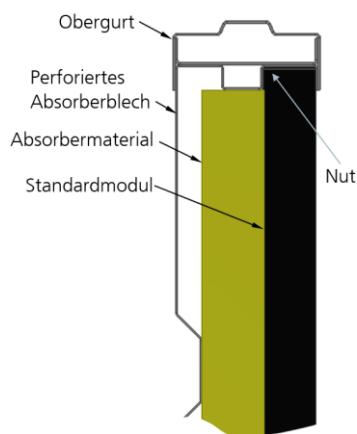
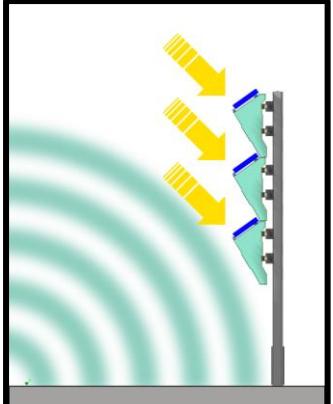


Abbildung 20: Schematischer Querschnitt Konzept 8

Konzept	9
Benennung	Dreieckskassetten
Schallschutz	Zur Straße geneigte Absorber, zur Sonne angewinkelte Solarmodule
Beschreibung	Die Kassettenlösung zielt darauf ab, die Funktionen des absorbierenden Lärmschutzes durch Absorber und Energiegeneration durch Solarmodule über eine optimierte Ausrichtung der jeweiligen Flächen nebeneinander zu integrieren. Für Konzept 9 wurden dazu vor die Lärmschutzwand hängbare Kassetten mit dreieckigem Querschnitt entwickelt. Auf die Oberseite werden auf die geringe Breite angepasste Solarmodule mit 35° Winkel zur Sonne montiert. Die untere Seite ist zur Straße gerichtet und ist mit perforiertem Aluminiumblech und innen liegender Steinwolle absorbierend ausgelegt. Als Abgrenzung zu früheren Projekten mit ähnlichem Prinzip, wie Projekten der Firma etway aus Italien oder der 1998 am Ammersee errichteten Lärmschutzwand von Fabrisolar, wurde bei PVwins auf eine vor die Wand nachrüstbare Variante gesetzt. Damit können z.B. auch reflektierende Beton-Lärmschutzwände nachgerüstet werden.
	 

Zunächst wurden verschiedene Formfaktoren und Dimensionen für die Dreieckskassetten konzeptioniert und in verschiedenen Analysen gegenübergestellt (siehe Abbildung 21). Dazu wurden Verschattungsanalysen durchgeführt, akustische FEM-Analysen durchgeführt (siehe MS 2.1) und verschiedene Modullayouts bezüglich Zellverschaltung entwickelt und verglichen.

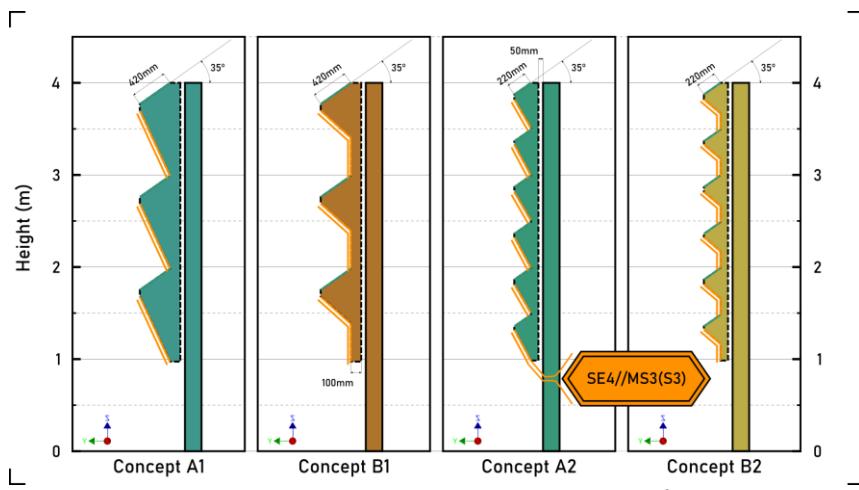


Abbildung 21: Dreieckskassetten mit verschiedenen Formfaktoren

Zur Verschattungsanalyse wurden die Einstrahlwinkel des jährlichen Sonnenverlaufs auf die nach Süden gerichtete Lärmschutzwand mit den Varianten A1, B1, A2, B2 betrachtet und wie in Abbildung 22 zu sehen für die Jahreszeitenwechsel gegenübergestellt.

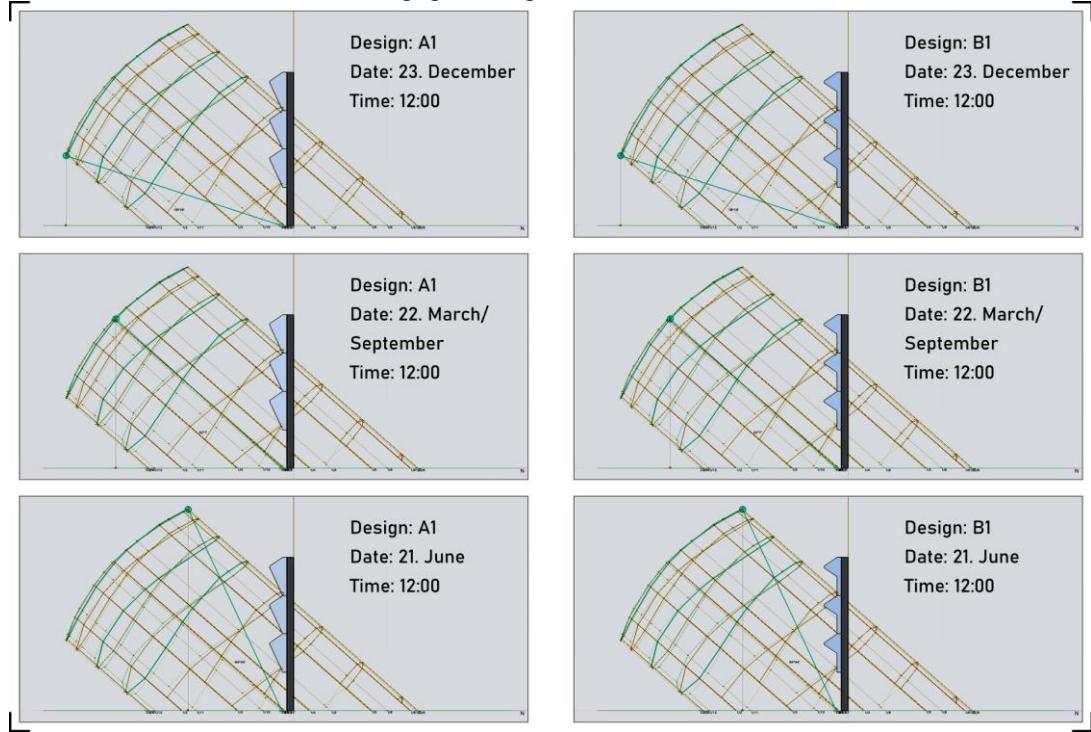


Abbildung 22: Verschattungsanalysen im Vergleich der Designs A1 und B1

Als Favorit für die Umsetzung im Demonstrator fiel schließlich die Entscheidung auf Variante A1, da sich diese bezüglich Eigenverschattung, akustischer Absorption und Aufwand der Fertigung am besten geeignet hervortat.

Neben diesen Formanalysen wurden verschiedene Versionen einer Befestigungsklammer entwickelt, um die Dreieckskassetten vor eine bestehende Lärmschutzwand zu montieren, ohne dabei Montagelöcher in die H-Pfosten nachträglich bohren zu müssen. Für eine mögliche Nachrüstbarkeit ist damit gewährleistet, dass eine bestehende Wand nicht aufwändig modifiziert werden muss und durch neue Bohrungen Korrosionsprobleme oder ähnliches auftreten können.

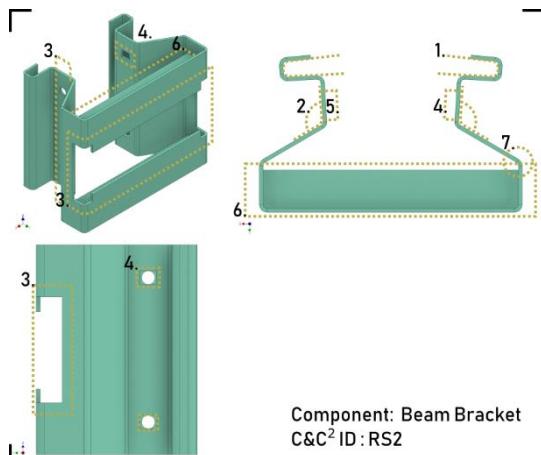


Abbildung 23: Erste Version der Montageklammer (Funktionen durchnummieriert in nachfolgender Tabelle beschrieben)

Nº	Elements of Embodiment	Function
1.	2° Tapered sides	Guaranteed contact with HEB Beam
2.	132° angle	Allows positioning of the bracket before tightening
3.	Cut-out for aluminium profile	For form-locking connection with aluminium profile
4.	Rectangular holes for DIN 603 M10 Screw	Simple installation (Limits rotational degree of freedom); Longer horizontal dimension allows alignment of the screw
5.	Washer/Nut press surface with circular cut-out for screw	Flat surface for transmission of force
6.	Welded reinforcement strips	Increased rigidity of frontal surface
7.	Bending radius	Optimization for Manufacturing

Nach einigen Designiterationen wurde schließlich eine aus mehr Einzelteilen bestehende Klemmbefestigung gewählt, um diese für den Demonstrator zu nutzen (siehe Abbildung 24 rechts).



Abbildung 24: Einteilige Montageklammer (links) und mehrteilige Montageklammer (rechts)

Konzept	10
Benennung	Schallabsorbierender Modulrahmen
Schallschutz	Schallabsorption im Modulrahmen, Schallisolation über die Modulfläche.
Beschreibung	Der Rahmen der vertikal integrierten semitransparenten PV-Module ist aus perforiertem Aluminium und mit schallabsorbierender Steinwolle gefüllt.

Konzept 10 ist ein vielversprechender Ansatz um auch die Flächen der Rahmen, die normalerweise reflektierend wirkend, mit absorbierenden Eigenschaften auszuführen. Je nach Rahmendicke kann die Schallabsorption erhöht werden. Für eine hochabsorbierende Klassifizierung reicht dieses Konzept jedoch nicht aus.



Abbildung 25: Messe-Exponat der R. Kohlhauer GmbH eines vertikal integrierten PV-Moduls mit schallabsorbierenden Rahmen

### MS 2.1 FEM-Analysen

Für die akustischen FEM-Analysen wurde die Software COMSOL Multiphysics mit dem Zusatzmodul „Acoustics Module“ verwendet. Aufgrund der im Verhältnis zu den simulierten Wellenlängen großen Geometrie und der damit einhergehenden sehr feinen Vernetzung wurde für die Simulationen ein 2D-Modell des Querschnitts der Lärmschutzwand genutzt. Zusätzlich wurde eine stationäre Lösung für einen zeitlich langen Schallimpuls genutzt. Simuliert wurden hierbei Konzept 6: „Aufsatzlösung“, Konzept 9: „Dreieckskassettenlösung“ und Konzept 7: „Kombinationslösung“. Je nach Bedarf und Anwendungsfall wurde der in der DIN EN 1793 [11, 12] definierte Einzahlwert für die Beugung  $DL_{ADL}$  oder für die Absorption  $DL_{aLSW}$  bestimmt.

Bei der Bestimmung des Einzahlwertes der Beugung wurde der Schalldruckpegel mit Aufsatz mit dem Pegel ohne Aufsatz verglichen, um die zusätzliche Reduktion durch den Aufsatz zu erfassen. Bei der Bestimmung des Einzahlwerts der Absorption wurde die Lärmschutzwand mit Absorbern und PV-Modulen mit einer perfekt reflektierenden Wand verglichen.

Die PV-Module, sowie die Rückseite der Lärmschutzwand wurden für die Simulation als schallharte Wände approximiert. Für die Absorber wurde ein Delany-Bazley-Miki Modell mit einem Strömungswiderstand von 30000 Pa\*s/m<sup>2</sup> angenommen.

### Vorbaulösungen

Für unterschiedliche Vorbaulösungen (Kombinationslösung, Dreieckskassettenlösung) wurde für unterschiedliche Geometrien der Absorptionswert bestimmt und miteinander verglichen. Beispielhaft soll hier die Variation der Kassettenbreite bei einer Kombinationslösung (Abbildung 26, links) gezeigt werden. Hierbei wurde der Flächenanteil des Absorbers im Verhältnis zur PV variiert.

Der Schalldruck, sowie das Schalldrucklevel sind exemplarisch für eine Frequenz von 1000 Hz und einen Absorber zu Modulanteil von 150 % in Abbildung 27 gezeigt. Der berechnete Wert der Einzahlangabe der Schallabsorption nach DIN EN 1793 – 3 im Verhältnis zum Flächenanteil des Absorbers ist in Abbildung 26, rechts dargestellt. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen der Einzahlangabe der Absorption und dem Absorberanteil nicht linear ist, sondern mit größer werdendem Absorber in eine Sättigung übergeht. Das genaue Verhältnis kann schließlich anhand der Anforderungen an die Lärmschutzwand gewählt werden.

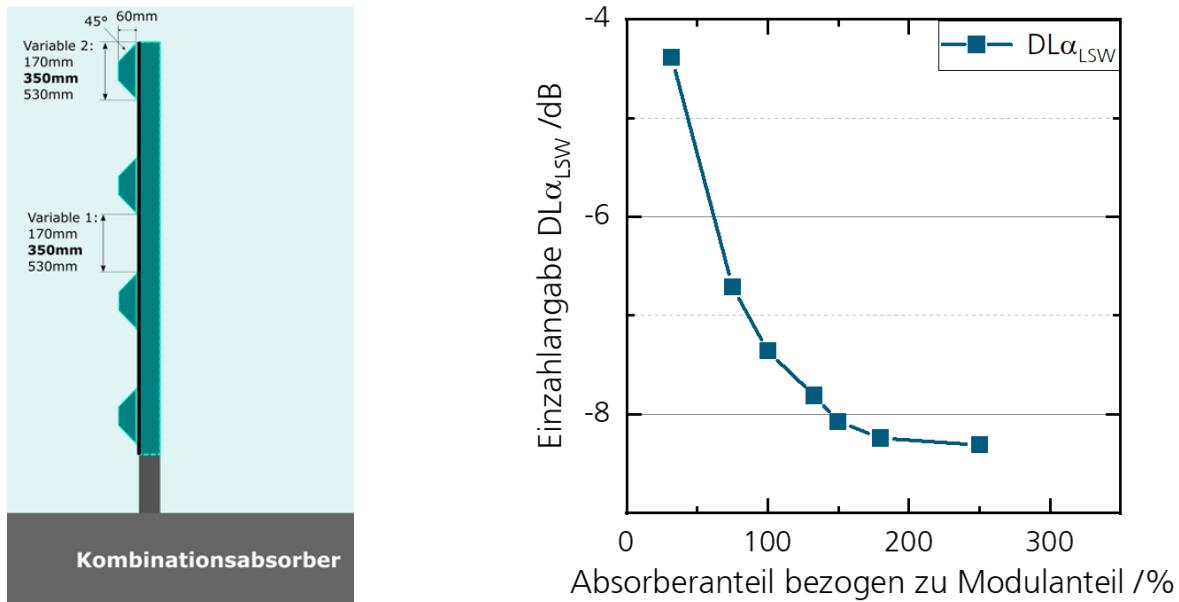


Abbildung 26: Geometrie des simulierten Kombinationsabsorbers (links) sowie die berechnete Einzahlangabe der Absorption (rechts) für verschiedene Absorberanteile.

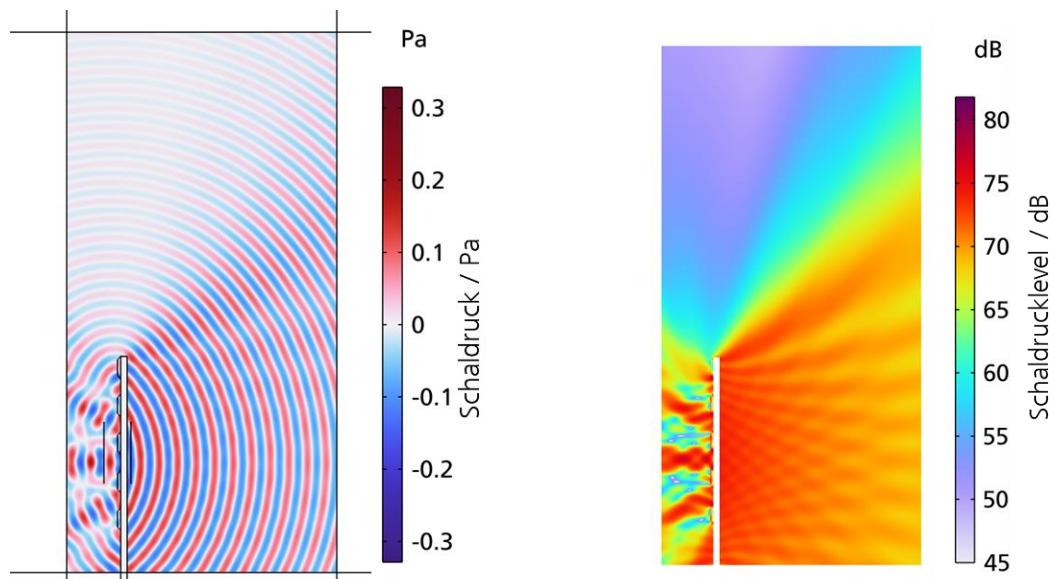


Abbildung 27: Exemplarische Abbildung des Schalldrucks (links) sowie des Schalldrucklevels (rechts) bei einem Absorber zu Modul-Anteil von 150 % und einer Schallfrequenz von 1000 Hz.

Für die Kassettenlösung (Konzept 9) wurden ebenfalls für die Auswahl der Geometrie FEM Simulationen durchgeführt. In Abbildung 26

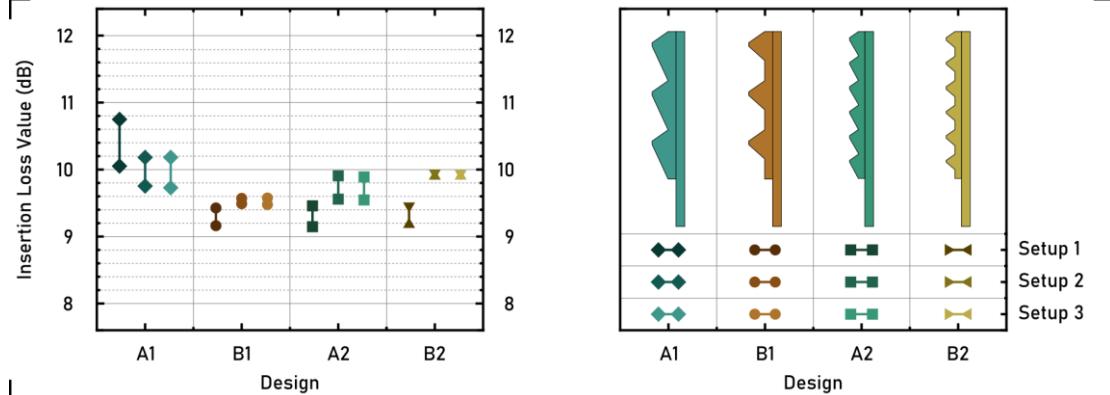


Abbildung 28 ist die Schallminderung durch Absorption gegenüber einer reflektierenden Wand für die Varianten A1, B1, A2 und B2 aufgetragen. Daraus wird deutlich, dass die Variante A1 die höchste Schallminderung verursacht, weshalb die Entscheidung auf diese Variante zur technischen Weiterentwicklung fiel.

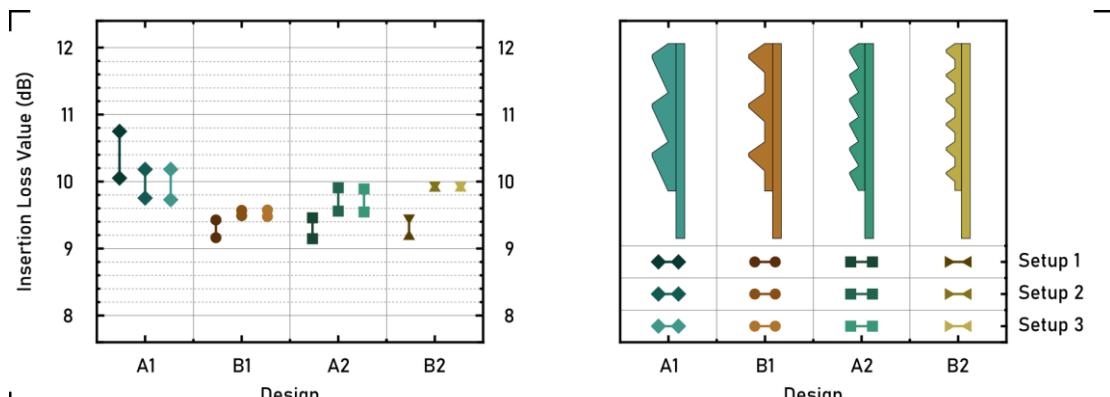


Abbildung 28: Ergebnisse der Schallminderung verschiedener Varianten gegenüber reflektierender Wand

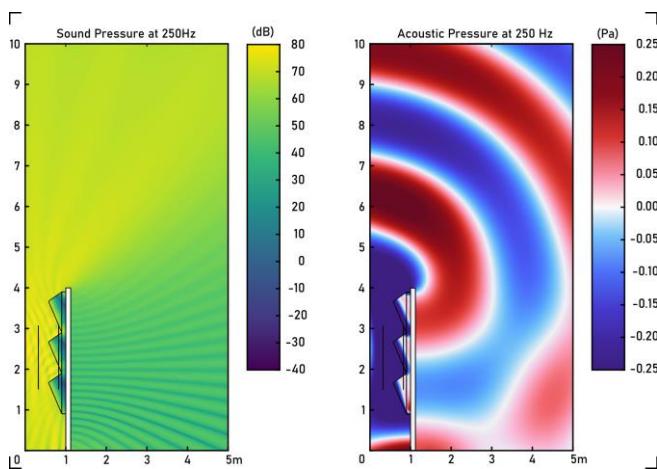


Abbildung 29: Beispiel FEM Schalldruck in dB und Pa bei 250 Hz

## Aufsatzlösung

In den Simulationen zur Aufsatzlösung wurden drei mögliche Geometrien (mittig montiertes PV-Modul ohne Absorber, Außenliegend montiertes PV-Modul mit Absorber und mittig montiertes PV-Modul mit Absorber) miteinander verglichen, vgl. Abbildung 30. Es zeigt sich, dass aufgrund der größten Wegverlängerung das außenliegende PV Modul mit Absorber die größte Reduzierung des Schallbeugungsindex um -3.38 dB zur Folge hat.

Ähnlich wie die Anbringung eines PV-Moduls an der Oberseite der Lärmschutzwand kann auch die geschickte Montage eines Kabelkanals zu einer Reduktion des Schallbeugungsindex führen. Hierzu wurden simulativ 4 unterschiedliche Montagen eines Kabelkanals miteinander verglichen (siehe Abbildung 31). Mit den gewählten Geometrien kann eine Reduktion des Schallbeugungsindex von bis zu -2.19 dB erreicht werden. Die Simulationsergebnisse sind jedoch nicht durch reale Messungen validiert.

S

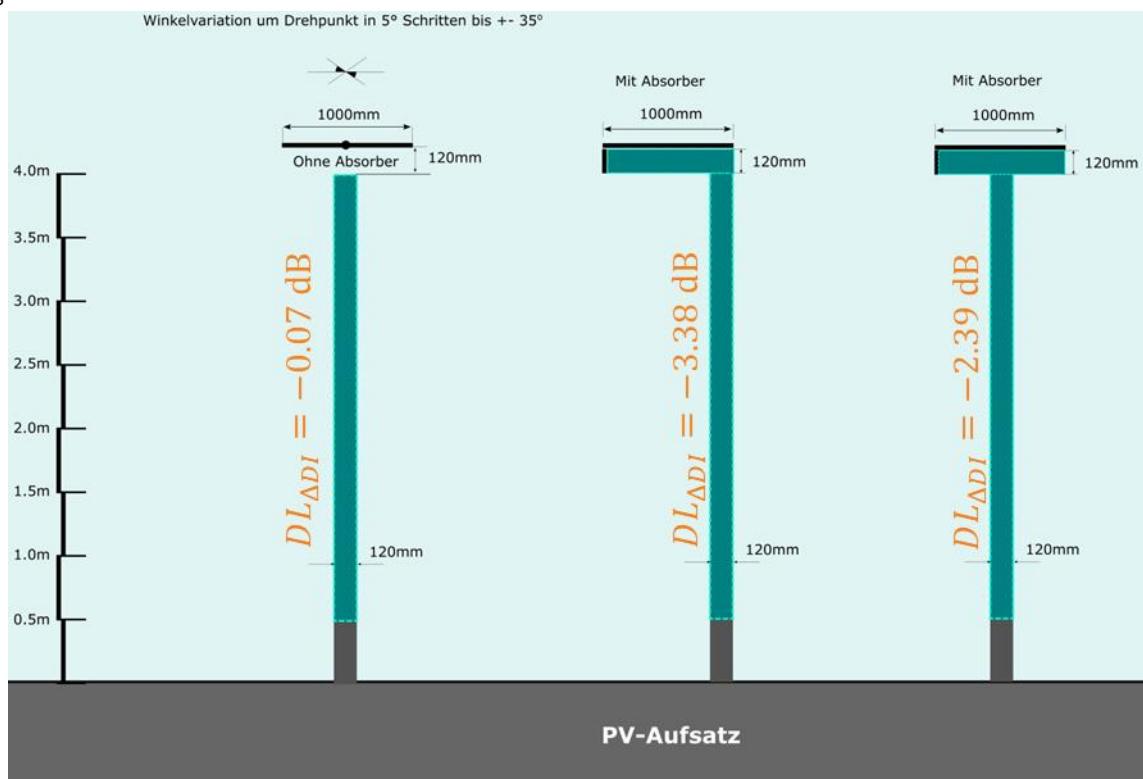


Abbildung 30: Vergleich der Einzahlangabe der Beugung bei Aufsatzlösungen eines mittigen angebrachten PV-Moduls ohne Absorber (links), eines außenliegend montierten PV-Moduls mit Absorber (Mitte) und eines mittig montierten PV-Moduls mit Absorber (rechts).

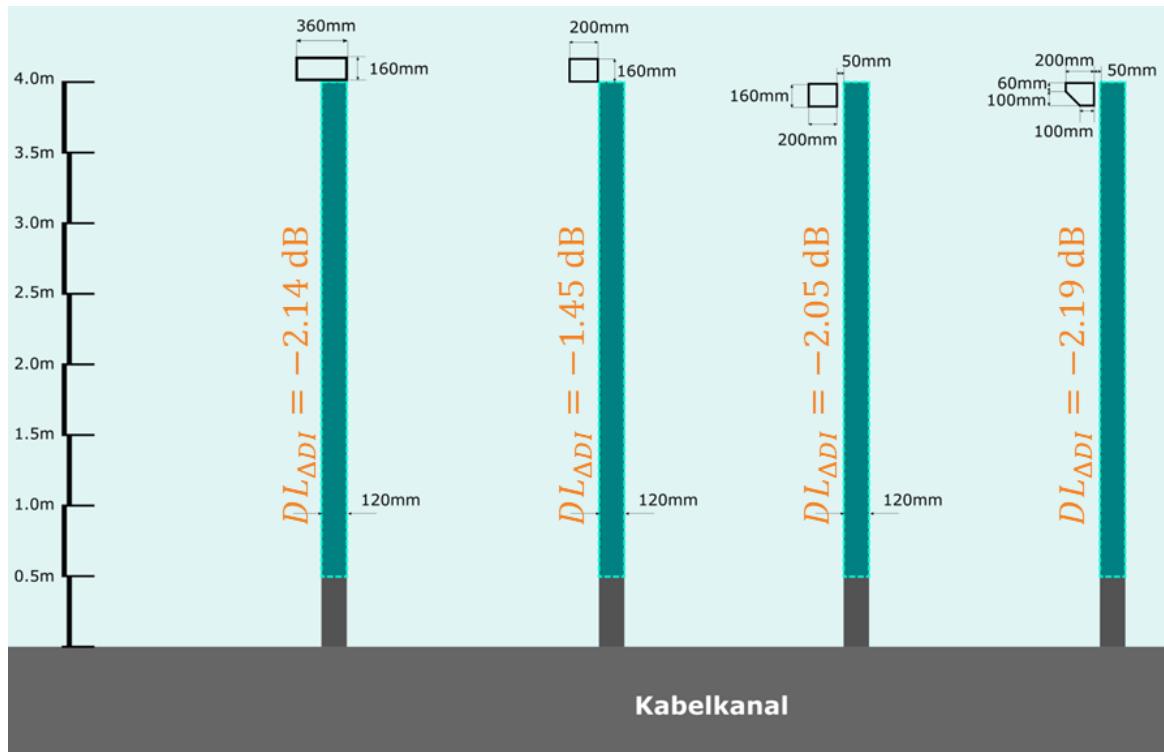


Abbildung 31: Vergleich der Einzahlangabe der Beugung für unterschiedlich montierte Kabelkanäle.

### MS 2.3 und MS 2.4 Optimierung der Konzepte

Wie bereits in vorangehenden Abschnitten und Kapiteln beschrieben, wurden die verschiedenen Konzepte nach verschiedenen Attributen und Optimierungszielen in Designiterationen optimiert. Die dabei betrachteten Attribute waren akustisch die Schallabsorption und Schallbeugung, in optischer Hinsicht eine gute Lichttransmission, mechanische Verbesserungen für ausreichende Stabilität und beim Modullayout die beste Belegung mit verfügbaren Zellgrößen.

#### Optimierung der mikroperforierten Absorber (Konzept 4)

Für die technische Weiterentwicklung von Konzept 4 mussten verschiedene Optimierungsziele vereint werden. Während eine hohe und breitbandige Schallabsorption die wichtigste Funktion darstellte, sollte die perforierte Acrylplatte auch mechanisch ausreichend stabil und optisch transparent sein. Aus einer Beurteilung von Plattenstärken zwischen 2 mm und 5 mm fiel die Wahl auf 4 mm Dicke. Ebenfalls wurde die optische Transmission für verschiedene Plattenstärken und Einstrahlwinkel beurteilt. Hier ergaben sich die Transmissionsverluste insbesondere bei seitlicher Beleuchtung durch die Perforation, mit zunehmend geringerer Transmission je dicker die Platte ist. Mit der Auswahl der Plattenstärke von 4 mm wurde die verfügbare Nutubreite im Aluminiumrahmen von Kohlhauer geprüft. Es stellte sich heraus, dass die Gesamtdicke des Verbunds bestehend aus Solarmodul, Abstandhalter für die Luftkammer und die 4 mm Acrylplatte minimiert werden musste (siehe auch Kapitel 1.5 AP 5, MS 5.2). Um einen möglichst hohen Einzahlwert der Absorption mit dem Standardverkehrslärmspektrum nach DIN EN 1793-3 zu erzielen, wurde die Optimierung des Abstands auf ein Absorptionspeak bei 1000 Hz vorgenommen, da bei 1000 Hz die Gewichtung für den Einzahlwert am höchsten zum Tragen kommt. Hierzu wurden im Impedanzrohr (Abbildung 15) Proben mit 4 mm und verschiedenen Lochmustern bezüglich des Abstands zur reflektierenden Rückwand variiert. Die Varianten des Lochdurchmessers der Perforation waren dabei 0,8 mm, 0,6 mm und 0,6 mm + 0,8 mm im Wechsel. Das Lochraster wurde auf 5mm gelegt. Die finale Auswahl fiel auf die Perforation mit gemischten Lochraster von 0,6 mm und 0,8 mm zwecks breiterem Absorptionspektrum. Der für die Umsetzung gewählte Abstand wurde auf 8 mm festgelegt, da hier das Absorptionspeak auf 1000 Hz liegt, siehe Abbildung 32 orangene Kurve.

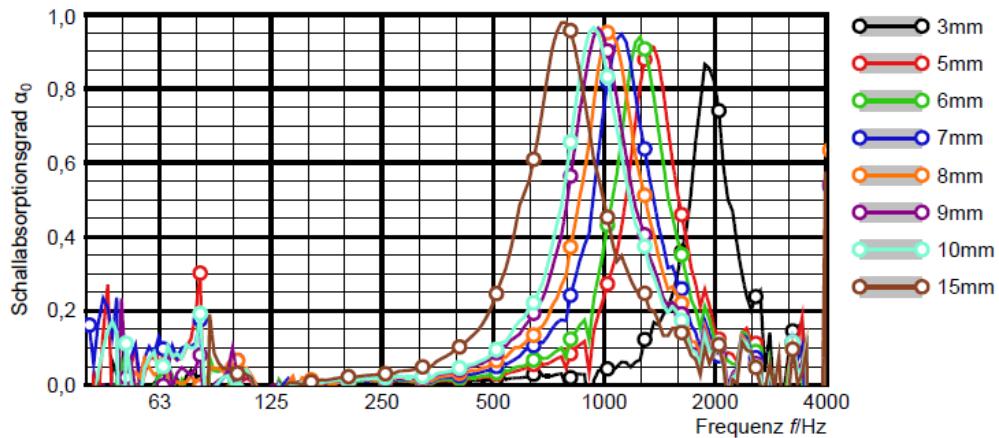


Abbildung 32: Optimierung des Abstands der 4 mm dicken MPA-Platte zur schallharten Oberfläche auf 1000 Hz

### MS 2.5 Laminationsverfahren für strukturierte Folien

Ein Ansatz zur Aktivierung der Moduloberfläche in schallschutztechnischer Weise war in der Konzeptphase, die Moduloberfläche zu strukturieren. Zur Erfüllung von MS 2.5 wurde ein Verfahren zur Einprägung von Strukturen in eine Polymerfolie als Vorderseitenmaterial (z.B. ETFE) entwickelt. Hierzu wird eine Gewebematte auf die Vorderseite des Moduls vor der Lamination gelegt, welche sich im Laminator durch Druck und Temperatur einprägt. Die strukturgebende Gewebematte kann dabei wiederverwendet werden. Beispiel eines Mini-Testmoduls mit solcher Oberfläche für eine Messung im Kundt'schen Rohr ist in Abbildung 33 gezeigt.



Abbildung 33: Beispiel Testmodul mit strukturierter Vorderseitenfolie



(a)

(b)

Abbildung 34: (a) Handmuster eines löchrigen PV-Moduls zur Schallabsorption, (b) Muster eines Moduls mit großen Glasstrukturen auf der Vorderseite.

## MS 2.6 Auswahl von Aufbauten für weitere Tests

Beim Projekttreffen in Neuötting am 28.04.2022 wurde festgelegt, welche Konzepte im Detail technisch weiterentwickelt werden sollen für die Demonstratorwand und großformatigen Tests (MS 3.2, MS 4.3, MS 5.1-5.3, MS 6.4, MS 6.5, MS 7.1 – 7.3).

Die Wahl fiel dabei auf:

- Konzept 6: Aufsatz mit Süd und Ost/West Ausrichtung (Lead: Kohlhauer)
- Konzept 9: Kassetten (Nachrüstung, Austausch) (Lead ISE, Support Kohlhauer)
- Konzept 7: PV-Modul (Bifazial) in Kombination mit Lochblechkassetten (Lead ISE, Support Kohlhauer)
- Konzept 4: MPA mit Bifazial PV-Modul (Lead ISE, Support Kohlhauer)
- Konzept 8: Integriertes Modul für straßenabgewandte Seite (Lead ISE, Support Kohlhauer)

Details zur Entwicklung und Herstellung von Konzeptphase zur Umsetzung werden in Kapitel 1.3 zu AP 3 und Kapitel 1.7 zu AP 7 fortgeführt.

## MS 2.7 Life Cycle Assessment

Life Cycle Assessments (LCA) oder Lebenszyklusanalysen dienen der Untersuchung wesentlicher Emissionen wie im Besonderen der Treibhausgase, Ressourcenverbrauch und Umwelteinflüsse bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung / Recycling eines Produkts. So können verschiedene Produktvarianten und Herstellungsprozesse verglichen werden und der CO<sub>2</sub> Footprint erfasst werden. Damit bietet ein LCA wichtige Bewertungsanalysen für die Nachhaltigkeit von Produkten. Die wissenschaftliche Vorgehensweise für den Untersuchungsrahmen und die Methodik bietet dabei die ISO 14040-4. Für die Nachhaltigkeitsbewertung von Lärmschutzwänden im Speziellen gibt es die DIN EN 17383.

Im Rahmen von PVwins wurde eine vereinfachte Lebenszyklusanalyse mit Reduktion auf den KSPI Treibhausgas gelegt. Die Hauptarbeiten wurden durch das Fraunhofer ISE durchgeführt, unterstützt bei der Datensammlung durch Kohlhauer. Die Systemgrenze wurde auf Cradle-to-Gate gelegt, d.h. nur die Herstellung der Komponenten liegt in der betrachteten Systemgrenze. CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zusammenhang mit Aufbau, Betrieb, Abbau und Entsorgung/Recycling einer Lärmschutzwand sind nicht betrachtet. Bei einigen Materialien sind aus der Datenbank ecoinvent jedoch übliche materielle Recyclingquoten für die Rohmaterialien berücksichtigt, z.B. Aluminium. Um einen Vergleich der Varianten des Demonstrators im Umfang der möglichen Arbeiten im Projekt durchzuführen, mussten einige Vereinfachungen gegenüber einer ausgiebigen LCA nach den oben genannten Normen gemacht werden. Um zwischen den Projektpartnern einen guten Austausch der Daten ohne Bedarf spezieller LCA-Software zu ermöglichen, wurden zunächst alle wesentlichen Komponenten über eine Excelliste gesammelt, deren Herstellungsweise, Ursprungsland notiert und die jeweils am einfachsten anwendbare funktionelle Einheit (z.B. kg, m<sup>2</sup> oder m<sup>3</sup>) gewählt. Zu diesen Einzelkomponenten wurden aus der Software ecoinvent und eigenen Datensätzen zu PV-Modulherstellung die äquivalenten CO<sub>2</sub> Emissionen einer funktionellen Einheit in die Exceltabelle aufgenommen. Die Modellierung der Lärmschutzwand erfolgte nicht in einer LCA-Software wie SimaPro, sondern in Excel.

In der Komponentendatenbank in Excel wurde für jede der fünf Lärmschutzwandvarianten eine Zusammenstellung der Komponenten mit zugehörigen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten aller relevanten Komponenten und Prozessschritte pro Komponente gemacht. Auch die Herkunftsländer und übliche Transportemissionen von Rohmaterialien wurden berücksichtigt. Aus der Liste wurde zunächst eine Zusammenstellung in Baugruppen fortgeführt, um z.B. ein MPA-Modul mit allen damit bezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu sammeln. Im nächsten Schritt kann so rechnerisch eine Lärmschutzwand aus den Einzelbaugruppen zusammengestellt werden. Laut DIN EN 17383 ist als funktionelle Einheit 1 m Länge eines repräsentativen Abschnitts Lärmschutzwand zu wählen. Hierfür wurde zunächst eine 100 m lange Lärmschutzwand zusammengestellt, und die Werte dann durch 100 geteilt um, auf 1 m Länge zu kommen und die Anteile aller Komponenten auf einen Meter im Mittel zu berechnen.

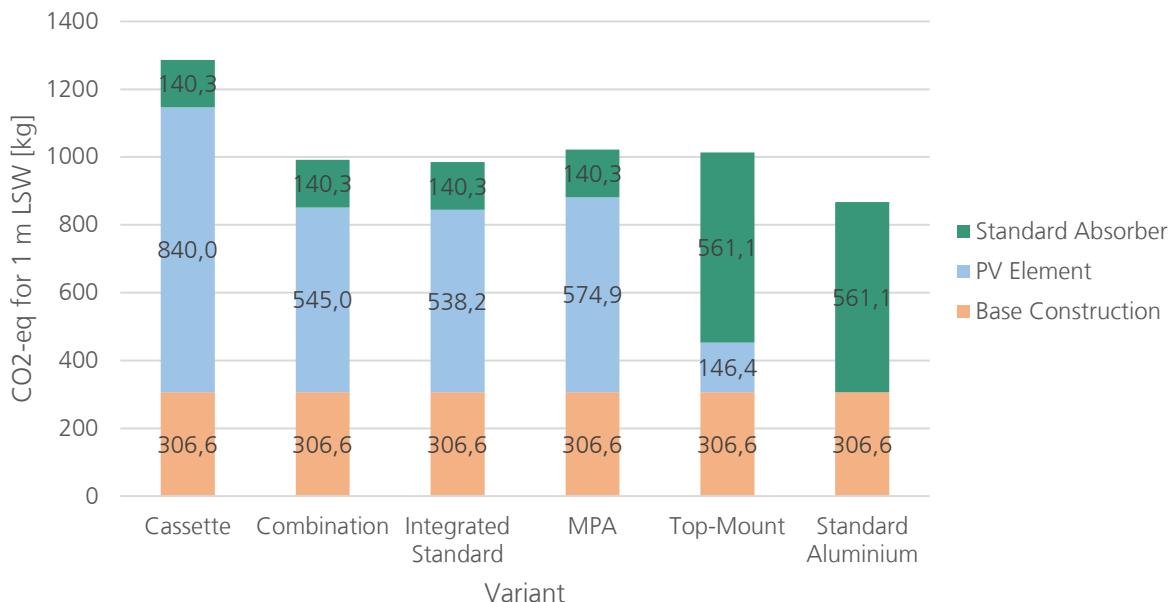


Abbildung 35: CO<sub>2</sub>-eq pro 1m LSW (4m hoch) der Varianten nach Komponentengruppierung

In Abbildung 35 sind die CO<sub>2</sub>-eq Emissionen pro Stück von 1 m Lärmschutzwand jeder Variante mit einer Höhe von 4 m über die Komponentenkategorien „Standard Absorber“, „Base Construction“ (Fundament, Betonsockel, Betonpfosten), und „PV Element“ aufgeführt. Zu „PV Element“ gehören alle Komponenten der Solarmodule und Unterkonstruktion. Die Verkabelung zwischen den Modulen und der Wechselrichter wurden nicht mit betrachtet. Da die PV-Elemente bei allen PV-Lärmschutzwandvarianten außer der Aufsatzlösung akustische Absorberelemente substituierten, ist der Anteil der CO<sub>2</sub> Emissionen bei den PV-Elementen deutlich größer als die Emissionen für die Standard Absorber Elemente, welche bei den vier Varianten noch für den unteren Meter angenommen wurden. In Tabelle 6 zeigt die vierte Spalte von links, um wieviel Prozent die CO<sub>2</sub>-Emissionen der PV-Varianten höher als die Referenz mit Standardaluminiumabsorber ohne Photovoltaikmodule ist.

Mit Ausnahme der Dreieckskassetten liegen die Werte hier zwischen 14,3 % und 17,8 % höher. Bei den Dreieckskassetten liegen die Emissionen um 48,3 % höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Konstruktion mehr Aluminiumblech eingesetzt wurde, die Montage auf Aluminiumextrusionsprofile basiert und der Prototyp hier noch nicht mit Fokus auf Ressourceneffizienz konstruiert wurde.

Für alle PV-Varianten gilt, dass sie zwar bei der Herstellung etwas höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen als eine Standard Aluminium Lärmschutzwand haben, aber jede erzeugte Kilowattstunde dann CO<sub>2</sub>-neutral eine Kilowattstunde mit dem jeweils zeitlich aktuellen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des Strommix ersetzt. Laut Umweltbundesamt lag der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des Strommix in 2021 bei 407 g/kWh, in 2023 bei 380 g/kWh (dieser Wert ist noch eine Prognose) [13, p. 12]. Tendenziell wird durch den Zubau der erneuerbaren Energien der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des Strommix immer geringer, mit dem Ziel der Bundesregierung bis 2045 klimaneutral zu sein.

Da der tatsächliche CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des Strommix für die nächsten Jahre von der tatsächlichen Entwicklung der Energiewende abhängig ist, stellen LCA-Analysen eine Momentaufnahme dar, und stützen sich auf die aktuell verfügbaren Daten. Durch einen zunehmend CO<sub>2</sub> geminderten Energiemix in vielen Ländern, werden die Emissionen aller Komponenten sinken. Für die Solarmodule liegen die wesentlichen CO<sub>2</sub> Beiträge bei der Waferherstellung. Werden diese in einem Land wie Norwegen mit viel Erneuerbaren Energien hergestellt, sieht der Footprint deutlich geringer aus, als wenn der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des chinesischen Strommix angenommen werden muss.

Tabelle 6: CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Länge und bezogen auf Leistung

Name	CO <sub>2</sub> für 100m [kg]	CO <sub>2</sub> für 1m [kg]	% höher als Referenz	Wp/m	kWh/kWp/a	kWh/m/a	CO <sub>2</sub> /kWp	kWp/100m	CO <sub>2</sub> /kWp/m
Kombination	99186	991,9	14,3	439,5	520	228,54	2256,8	43,95	5135
Kassetten	128687	1286,9	48,3	180	1110	199,8	7149,3	18	39718
Integriert	98503	985,0	13,5	675	780	526,5	1459,3	67,5	2162
MPA	102174	1021,7	17,8	444	800	355,2	2301,2	44,4	5183
Aufsatz	101403	1014,0	16,9	210	930	195,3	4828,7	21	22994
Alumna Referenz	86766	867,7	0,0	-	-	-	-	-	

### 2.1.3 AP 3 PV-Modulherstellung

In diesem Arbeitspaket wurden die entwickelten Prototypen aus AP 2 hinsichtlich ihrer Herstellbarkeit und Umsetzung mit der bestehenden Modulproduktionslinie evaluiert und großformatige Module für die nachfolgenden Tests und Umsetzung in der Demonstrator Lärmschutzwand hergestellt.

Tabelle 7: Meilensteine AP 3

Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis
<b>MS 3.1</b> Modulkonzepte auf industrielle Produktionsanlage transferiert	Modulprototypen für Tests und Demonstrator wurden auf industriellen Anlagen produziert, jedoch aufgrund geringer Stückzahl nicht voll automatisiert.
<b>MS 3.2</b> Module für in-situ Testaufbau hergestellt	Module für in-situ Testaufbau (Demonstrator) wurden hergestellt am Fraunhofer ISE und bei Megasol.
<b>MS 3.3</b> Herstellungskostenanalyse erstellt	Es wurden während der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auch Herstellungskosten analysiert, jedoch aufgrund starker Preisschwankungen von Materialien und Modulen ohne dauerhafte Aussagefähigkeit. Die Zuarbeit für skalierte Herstellungskosten durch Megasol musste aufgrund gestiegener Kosten bei der Produktion der Sondermodule und Kapazitätsengpässe auf ein Minimum reduziert werden.

#### MS 3.1 Transformation Modulkonzepte auf industrielle Produktionsanlage

Die Solarmodule der Prototypen wurden am Fraunhofer ISE auf einem industriellen Zellstringer von teamtechnik und dem Laminator Bürkle Ypsator hergestellt. Die Transformation auf industrielle Fertigungsumgebung wurde durch die Kooperation mit der Firma Megasol ermöglicht. Hierzu wurde ein F&E-Vertrag mit Megasol abgeschlossen, welcher die gemeinsame Entwicklung und Herstellung der Module für die Konzepte 4, 7 und 9 beinhaltete. Die Konzepte und Anforderungen wurden hierbei vom Fraunhofer ISE entwickelt, die Fertigungspläne und Herstellung lagen bei Megasol.

#### MS 3.2 Module für in-situ Testaufbau (Demonstrator)

Wie bereits in AP 2 PV-Modulentwicklung beschrieben, wurden einige Konzepte ausgewählt zur technischen Weiterentwicklung und Umsetzung im Demonstrator. Diese sind Konzept 4, 6, 7, 8 und 9. Von diesen Konzepten sind einige darauf angelegt, preisgünstige Standardmodule vom Markt zu verwenden (in diesem Bericht daher nicht näher thematisiert). Bei anderen war eine eigene Modulentwicklung notwendig. Standardmodule wurden verwendet in Konzept 6 und 8, Sondermodule in Konzept 4, 7 und 9.

Mit den Projektpartnern wurde nach Entscheidung für die auszuführenden Varianten im Demonstrator entschieden, die Solarmodule als „one-piece“ Module zu fertigen, also Solarmodule zu entwickeln, welche die komplette Länge von ca. 4m zwischen zwei Pfosten abdecken. Damit sollte der Aufwand an Modifikationen der mechanischen Konstruktion zur Einbindung mehrerer Module in stabiler, schalldichter Weise geringer gehalten werden und die Elemente besser als Ein-Stück-Lösung einsetzbar werden, mit zugleich verbesserter Flächenausnutzung und Ästhetik. Die Kehrseite dieser Entscheidung war, dass sich damit die verfügbaren Modulhersteller für diese Modulmaße auf sehr wenige reduzieren und die Kosten pro Stück, sowie der Aufwand für das Handling überproportional zur Fläche erhöhen. Auch die notwendige Projektverlängerung ist unter anderem auf diese Entscheidung zurückzuführen.

Nachfolgend werden nähere Details zu den Modulentwicklungen seitens Fraunhofer ISE und Megasol beschrieben.

## Konzept 7 Kombinationslösung

Angelehnt an die akustischen Absorptionsmessungen von PV-Modulen mit teilflächigen Absorberstreifen und variierenden Flächenanteilen (Konzept 7) wurde ein spezielles PV-Modul entwickelt, um Absorberstreifen und das Solarmodul im Kohlhauer Rahmen Scorsa VS-L zu integrieren. Designziel sollte ein PV-Element sein, welches nach ZTV-Lsw 22 als Gruppe A2 „absorbierend“ eingestuft werden kann.

Das Modul-Layout ist speziell angepasst, sodass die Zellstrings mit Absorberverdeckung als elektrisch getrennte Submodule verschaltet sind und die beidseitig transparenten PV-Flächen zwischen den Absorbern mit einem bifazialen Submodul umgesetzt sind. Dadurch ergibt sich ein Element mit 2-in-1 Solarmodulen und vier elektrischen Anschlüssen zur bestmöglichen Energieausbeute über den Tag. In Abbildung 36 ist zu sehen, dass dadurch die Rückseite vollständig mit Zellstrings gefüllt ist.



Abbildung 36 Renderings der Kombinationslösung mit Straßenansicht und von der Rückseite

In Abbildung 37 ist eine Zeichnung dieses Modullayouts dargestellt, wobei die Pfeile die Stromflussrichtung der zwei Submodule farblich voneinander verdeutlichen sollen. Die Absorberstreifen werden durch Klemmung zusammen mit dem PV-Modul in der EPDM-Nut des Rahmens gehalten. Die Entwicklung von Konzept 7 wurde durch das Fraunhofer ISE patentiert (Patentnummer: DE 10 2022 207 970 A1). Die vorderseitigen Strings haben eine Nennleistung von 320 Wp, die rückseitigen Zellstrings von 266 Wp. Weitere elektrische Spezifikationen aus der STC Messung von Megasol befinden sich im Anhang.

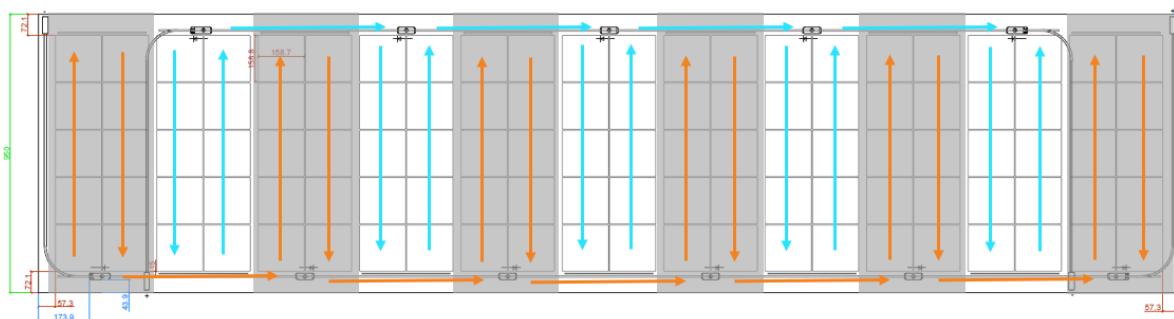


Abbildung 37: Modul-Layout mit Position der Absorber (grau) und eingezeichneten Stromflussrichtungen der zwei Submodule

Die Herstellbarkeit war aufgrund der Größe von 3900 x 936 mm<sup>2</sup> und der Verwendung von 2x 6mm Glas herausfordernd. Nur wenige Unternehmen haben das notwendige Equipment, um diese Maße zu laminieren. Megasol hatte dadurch ein Alleinstellungsmerkmal. Auch die Beschaffung der Gläser gestaltete sich dabei für Megasol als schwierig, da die Lieferbarkeit dieser Sondermaße noch aufgrund der Covid-Krise mit langen Wartezeiten verbunden war. Für das Vorderseitenglas wurden satinierte Gläser gewählt, um den Effekt von stark entblendeten Moduloberflächen zu testen. In der Projektverlängerung konnten die Module schließlich hergestellt und ans ISE geliefert werden, wo sie noch mit den Absorberstreifen und dem Rahmen von Kohlhauer zusammengebaut wurden. Das Gewicht von ca. 150

kg pro Modul erschwerte dabei das Handling und machte die Verwendung eines Gabelstaplers notwendig.



Abbildung 38: Kombinationslösung beim Zusammenbau von Modulen mit Absorberstreifen und Rahmen

#### Konzept 4 Mikroperforierte Absorber

Für die mikroperforierten transparenten Absorber (Konzept 4) wurden Acrylplatten mit Mikroperforation von abwechselnd 0,6mm und 0,8mm Durchmesser durch die Firma Heinz Fritz GmbH hergestellt. Um den zuvor optimierten Abstand zum Solarmodul zu realisieren, wurden transparente Abstandhalter aus Acryl entwickelt, die wie Puzzleteile zusammengesteckt werden können. Diese liegen an den äußeren Kanten und zwischen den Zellstrings auf, um die Lichttransmission zu den Zellen möglichst wenig zu behindern. Die Zellstrings wurden dabei bewusst mit etwas Abstand zueinander gelegt, um genug Fläche für die Abstandshalter zu bieten.

Laut STC-Messung von Megasol liegt die Nennleistung eines Moduls (ohne MPA) bei 592 Wp. Weitere elektrische Spezifikationen befinden sich im Anhang.

Der Zusammenbau und das Handling erfolgten ähnlich wie bei Konzept 7 beim Fraunhofer ISE. Hier wurden die Module von Megasol, die Acrylteile von Heinz Fritz und die Rahmenteile von Kohlhauer endmontiert (siehe Abbildung 39).

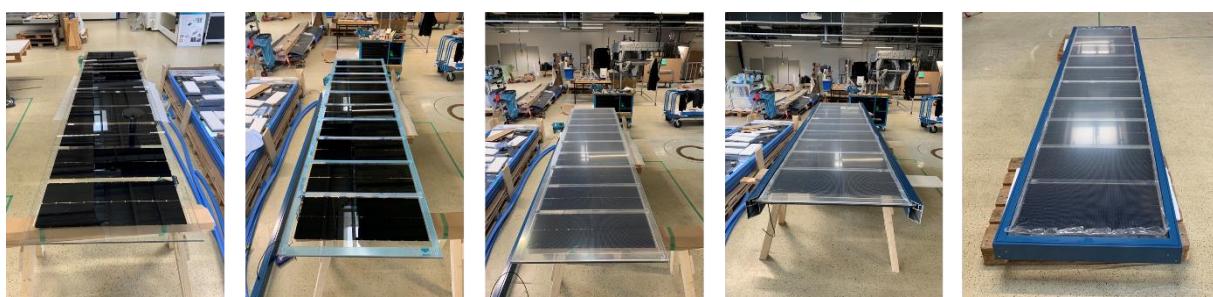


Abbildung 39: Schritte des Zusammenbaus von links nach rechts: Glas auflegen und säubern, Acrylstege auflegen, MPA-Platten auflegen, Rahmenteile außen anbringen.

### Konzept 8 Integrierte Standardmodule für straßenabgewandte Seite

Für die Entwicklung von Konzept 8 wurde zu Beginn ein Workshop bei Kohlhauer abgehalten, um sich über das aktuelle Design des Kohlhauer Produkts „Volta“ auszutauschen und einige Designalternativen zu überlegen. Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurde schließlich in enger Abstimmung mit Kohlhauer ein mechanisches Design entwickelt (siehe Beschreibung vorangegangen unter MS 2.2 Modulkonzepte). Hierzu gehörten auch Lastberechnungen mithilfe einer FEM-Software. Aus Gründen des Fertigungsaufwands und zur Kosteneinhaltung musste Konzept 8 für den ersten Prototypen so umkonstruiert werden, dass keine neuen Strangpressprofile hergestellt werden mussten. Mit einigen Vereinfachungen stellte Kohlhauer die Bleche und Komponenten bereit. Die Teile wurden am Fraunhofer ISE zusammengebaut. Das Rückseitenblech musste dabei aus vier Einzelstücken vernietet werden, um eine aufwändige Bestellung mit Mindestabnahmemenge noch größerer Bleche zu umgehen.



Abbildung 40: Zusammenbau der Bleche, Steinwolle, Seitenteile und Solarmodule von Konzept 8

Für den Demonstrator wurde nur ein PV-Element von Konzept 8 gebaut.

### Konzept 9 Kassettenlösung

Aus den vorhergehenden Analysen und Designvarianten, sowie Montageentwicklungen von Konzept 9 wurde in enger Zusammenarbeit und mehreren Iterationsrunden zwischen Kohlhauer und ISE eine Kassette aus Aluminiumblech entwickelt, die in dreifacher Ausführung für den Demonstrator von Kohlhauer produziert wurde. Die Kassette ist aus verschiedenen Einzelblechen vernietet und beinhaltet auf der zur Straße gerichteten Dreiecksseite Steinwolle als Absorbermaterial (siehe Abbildung 41). Das Blech vor der Steinwolle ist entsprechend perforiert.

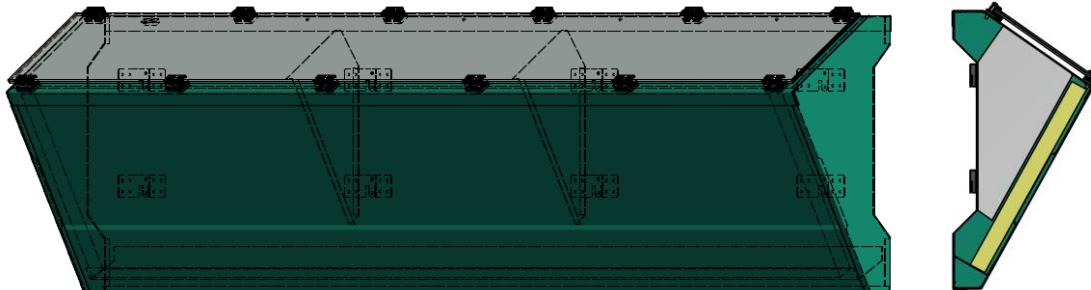


Abbildung 41: Schematische CAD-Darstellung der schließlich gefertigten Kassettenversion mit Modulklemmen und Solarmodul

Die zugehörigen Solarmodule wurden vom ISE mit Megasol entwickelt und auf dem Testfeld durch das ISE montiert und installiert. Für das Oberfläche des Vorderseitenglas der Solarmodule wurde satiniertes Glas gewählt, um ebenfalls zu bewerten, wie stark sich Module entblenden lassen, wenn Blendgefahr für den Verkehr möglich ist. Ein Modul hat einen Nennleistung nach STC von 240 Wp (mehr Details im Anhang).



Abbildung 42: Fertige Kassetten bei der Endmontage der Solarmodule auf dem Testfeld

## Konzept 6 Aufsatz mit Süd und Ost/West Ausrichtung

Im Rahmen des Projekts wurde die mögliche Nachrüstung von PV-Modulen an bestehenden Lärmschutzwänden untersucht. Aufgrund von Beschränkungen hinsichtlich der Verschraubungen an Pfosten, um Beschädigungen der Anti-Korrosion-Beschichtung zu vermeiden, fiel die Entscheidung auf eine Befestigung mittels Klemmkonstruktionen. Die nachrüstbare Aufsatzunterkonstruktion ist eine Entwicklung von Kohlhauer, die während der Projektlaufzeit in mehreren Versionen verbessert wurde. Eine erste Baureihe installierte Kohlhauer auf einer Demonstrationslärmschutzwand auf dem firmeneigenen Parkplatzgelände in Gaggenau.

Ab Februar 2021 wurde ein Vorentwurf für Pfostenaufsätze aus gelaserten Winkelprofilen erstellt, die mithilfe von Klemmwinkeln an den Pfosten gepresst werden. Die Winkelprofile werden zudem miteinander verschraubt. Zum Schutz der bestehenden Pfosten und zur zusätzlichen Anpressung wurden die Kontaktflächen mit einseitig klebendem EPDM-Gummi ( $t=1\text{mm}$ ) versehen. Die Herstellung der Pfostenaufsätze erfolgt aus Aluminium oder Edelstahl (VA), um die Teile selbst zu produzieren.

Ein Vorschlag zur Ausführung der Tragkonstruktion zwischen den Posten umfasst Kantprofile der Firma Schrag. Diese sind mit einer Zink-Aluminium-Magnesium-Legierung (Magnelis®) beschichtet, was die Möglichkeit bietet, Bohrungen in den Profilen ohne zusätzlichen Korrosionsschutz herzustellen.

Im März 2021 wurde eine weitere Idee zur Anordnung der PV-Module entwickelt, die eine Aufständerung auf den tragenden Stahlprofilen vorsieht. Hierbei wird die Möglichkeit berücksichtigt, die Neigung zur optimalen Anpassung an die einfallende Sonneneinstrahlung zu verändern, wobei potenziell auch automatische Anpassungen in Betracht gezogen werden könnten.

Im Mai 2021 wurde eine Musterwand in Gaggenau als erster Test mit vier Feldern errichtet. Der VA-Aufsatz hat eine Breite von 650 mm. Anstelle von Z-Pfetten wurden C-Riegel als Längsträger verwendet, was den Vorteil eines geringeren Profilquerschnitts bei gleicher Stabilität bietet. Zudem kann dieser möglicherweise auch als Kabelkanal genutzt werden und kippt weniger, wenn er bei der Montage noch lose auf den Kragarmen liegt. Als zusätzliche Maßnahme zur Erhöhung der Gesamtabsorption können hochabsorbierende Aluminium-Absorber horizontal unter der PV-Konstruktion angebracht werden.

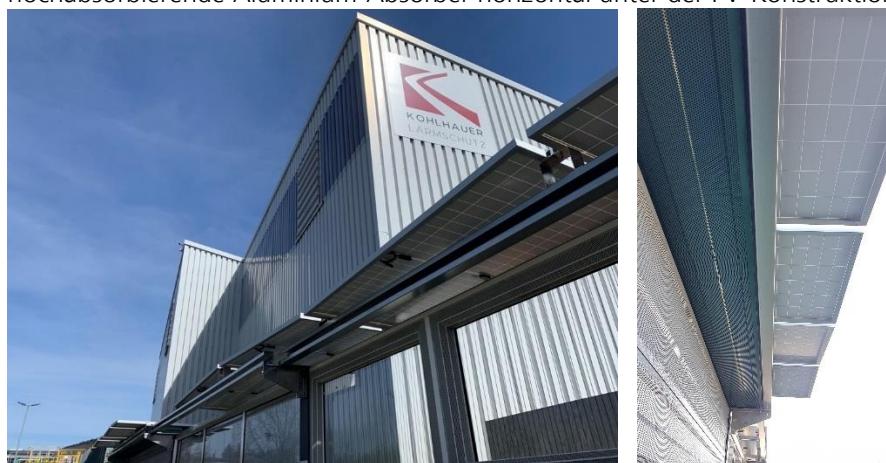


Abbildung 43: Aufsätze der Musterwand in Gaggenau, rechts: Akustischer Absorber unter den PV-Modulen

Für die Lärmschutzwand in Merdingen wurden einige Aspekte konstruktiv verbessert und neben der Ost/West Variante noch eine Südvariante entwickelt, die sogar im Anstellwinkel durch mehrere Schraubpunkte angepasst werden kann (siehe Abbildung 44).

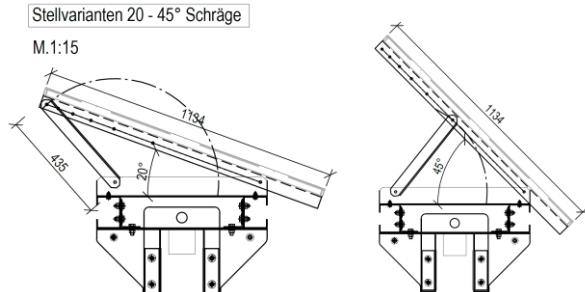


Abbildung 44: Prinzipskizze des Aufsatzes mit einstellbarer Südneigung

Fotos der Fertigung sind in Abbildung 45 und Abbildung 46 gezeigt. Die Aufsätze wurden mit einem Teleskoplader über der Lärmschutzwand eingehängt durch das Fraunhofer ISE. Die Montage lief dabei zügig, da alle Teile bereits am Boden vormontiert werden können, und über den Pfosten nur noch einige Schrauben angezogen werden müssen.

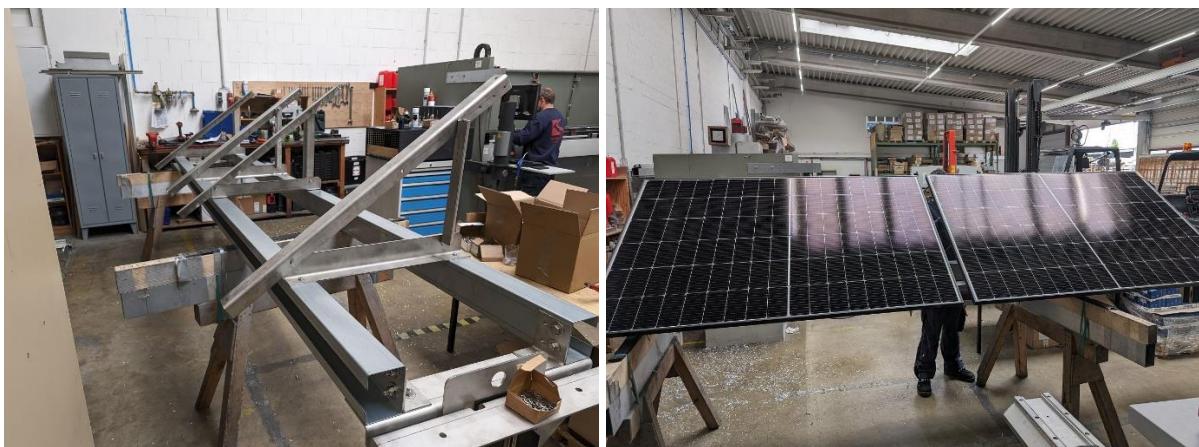


Abbildung 45: Fotos des Aufsatzes mit Südausrichtung während der Fertigung bei Kohlhauer



Abbildung 46: Aufsatz mit Ost/West Ausrichtung

## 2.1.4 AP 4 PV-Modulprüfung

In diesem Arbeitspaket wurden die in AP 2 entwickelten und in AP 3 hergestellten großformatigen Modulprototypen hinsichtlich ihrer akustischen, mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften getestet und bewertet. Dafür wurden Prüfverfahren angepasst und entwickelt (AP 4.1). In AP 4.3 und AP 4.4 wurden Test- und Prüfverfahren durchgeführt, um bereits erste Erkenntnisse an kleinformatigen Prototypen gewinnen zu können. In AP 4.5 wurden Gebrauchs-, Funktions- und Sicherheitsprüfungen angelehnt an normierte Testverfahren durchgeführt.

### AP 4.1: Definition der Prüfverfahren

Durch die unterschiedlichen Anforderungen an ein PV-Modul an Schallschutzwänden (Steinschlag, Blendung, Windbelastung etc.) wurden durch mögliche Prüfverfahren ergänzt. Dafür wurden, aufbauend auf der Erfahrung des akkreditierten Prüflabors Test Lab PV am Fraunhofer ISE und in Zusammenarbeit mit der BASt, Kohlhauer und weiteren Prüflaboren, notwendige Tests definiert und Testverfahren entwickelt.

### AP 4.2: Aufstellung der Prüfmodelle

Basierend auf dem Anforderungskatalog für Materialien aus AP 2 und den definierten Prüfverfahren, wurden Prüfmodelle für Prototypen erstellt, welche die Materialwahl und den Entwurf des Modulaufbaus in AP 2 unterstützten.

### AP 4.3: Begleitende Test und Prüfverfahren für PV spezifische Komponenten

Zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Module aufgrund der gewählten Materialien und Modulkomponenten wurden Prototypen an vorhandenen Anlagen und aufgebauten Experimentanlagen getestet.

### AP 4.4: Begleitende Test und Prüfverfahren auf die Schallschutzwirkung der Komponenten

In diesem AP wurden Tests an Komponenten auf die Schallschutzwirkung durchgeführt.

### AP 4.5: Durchführung Gebrauchs-, Funktions- und Sicherheitsprüfungen

Abgesehen von den in AP 4.3 aufgeführten Anlagen, wurden großflächige Prototypmodule weiteren Prüfungen unterzogen.

Tabelle 8: Meilensteine AP 4

Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis
<b>MS 4.1</b> Definition der Prüftests	Es wurden bestehende Prüfungen nach den gängigen Normen gesammelt und für Solarmodule zusätzlich sinnvoll erscheinende Prüftests diskutiert.
<b>MS 4.2</b> Erstellung der Prüfmodelle und eines Stofftransportmodells	Erledigt
<b>MS 4.3</b> Test und Analyse der großflächigen Prototypen	Es wurden einzelne IEC-Tests je nach Forschungsfrage durchgeführt und ein Steinschlag Teststand aufgebaut.

### MS 4.1 Definition der Prüftests

Es wurden notwendige Tests für Solarmodule in Lärmschutzwänden definiert. Dabei wurde zwischen Nachrüstlösungen, Kombinations- und Voll-Lösungen unterschieden.

Bei Nachrüstlösungen sind die Module nicht Teil der Lärmschutzfunktion, sondern werden nachträglich an die Lärmschutzwand angebracht. Daher sind für dieses Konzept keine erweiterten Modulprüfungen erforderlich, die über die IEC 61730 [14] und IEC 61215 [15] hinaus gehen. Das Gesamtsystem sollte jedoch hinsichtlich der statischen Sicherheit geprüft werden (insbesondere bei Zug- und Sog-Lasten).

Bei Kombinations- und Volllösungen sollten die Module zusätzlich zu den Modulanforderungen nach IEC 61730 und IEC 61215 ebenfalls Schallschutzfunktionen übernehmen und sind den Belastungen von

Schallschutzwänden ausgesetzt. Dafür ist ein Nachweis des Gesamtsystems durch Messung der Schalldämmung nach DIN EN 1793-2 und die Schallabsorption nach DIN EN 1793-1 vorzuweisen. Eine Einzelmessung von Elementen ist laut Norm nicht vorgesehen, das Konsortium spricht sich aber für eine Einzelmessung im Hallraum und in-situ aus.

Als ein besonders wichtiger Test für Module in Kombinations- und Volllösungen wurde der Test zum Anprall von Steinen nach DIN EN 1794-1 [16] bewertet. Hierbei handelt es sich um einen Test für Lärmschutzvorrichtungen an Straßen, die dem Anprall von Steinen, die von der Straßenoberfläche hochgeschleudert werden, ausgesetzt sind. Als weiterer relevanter Test wurde die Lichtreflexion nach DIN EN 1794-2 identifiziert. Ein gesonderter Nachweis der Feuerresistenz ist nicht erforderlich, da PV-Module bereits nach der IEC 61730 auf Entflammbarkeit geprüft werden und dieser Nachweis den Anforderungen aus der ZTV-Lsw 06 entsprechen.

## MS 4.2 Stofftransportmodell

Zur Modellierung des Wassertransports in Photovoltaikmodule während gängigen Zuverlässigkeitstests aus der Norm IEC 61215 wurden Umgebungsbedingungen als Input für die Prüfungen „Feuchte-Wärme“ (1000 h Exposition bei 85 °C und 85 % rel. Feuchte), „Temperatur-Wechsel“ (200 Temperaturzyklen zwischen +85 °C und -40 °C), sowie „Feuchte-Frost“ (10 Zyklen zwischen 85 °C / 85 % rel. Feuchte und -40 °C) generiert. Hierzu mussten zunächst aus den Umweltbedingungen in der Klimakammer auf die Bedingungen im Mikroklima der PV-Module geschlossen werden. Im Fall der Feuchte-Wärme-Prüfung sind die Bedingungen in der Klimakammer nach Beendigung des Einregelvorgangs konstant. Die Sollbedingungen 85 °C und 85 % rel. Feuchte entsprechen daher in guter Annäherung dem Mikroklima der geprüften Module und können in dem Stofftransportmodell als konstant angenommen werden.

Im Fall der Temperatur-Wechsel-Prüfung und der Feuchte-Frost-Prüfung unterscheidet sich die Modultemperatur, v.a. während Änderungen der klimatischen Bedingungen, aufgrund der Wärmekapazität der PV-Module von der Lufttemperatur. Unter der Annahme, dass der Wasserdampfpartialdruck  $p_D$  an der Moduloberfläche dem Wert der Umgebungsluft entspricht, wurde die relative Feuchte im Mikroklima der Module ( $rF_{Modul}$ ) aus der Lufttemperatur, der relativen Feuchte in der Klimakammer sowie der Modultemperatur unter Verwendung der Antoine-Gleichung bestimmt (Abbildung 10 und Abbildung 11). Aus den berechneten Werten wurden die Import-Parameter für das Stofftransportmodell generiert.

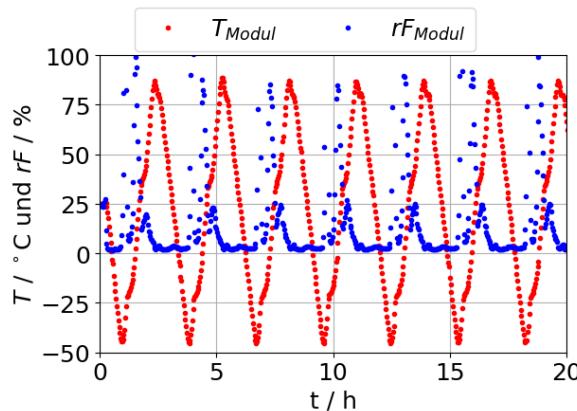


Abbildung 47: Aus realen Klimakammerdaten bestimmte Werte für das Mikroklima eines Moduls während Exposition in der Temperatur-Wechsel-Prüfung

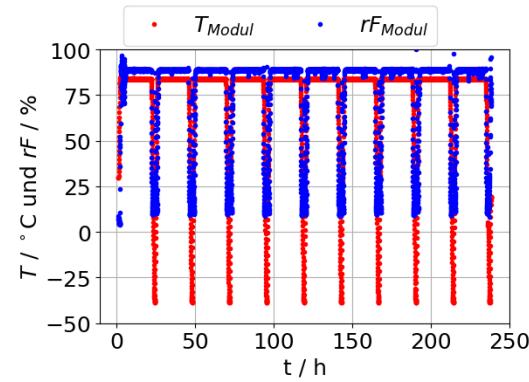


Abbildung 48: Aus realen Klimakammerdaten bestimmte Werte für das Mikroklima eines Moduls während Exposition in der Temperatur-Wechsel-Prüfung Feuchte-Frost-Prüfung.

Aufbauend auf frühere Arbeiten und Modelle am Fraunhofer ISE<sup>1</sup> wurde der Feuchteintrag während Klimakammerprüfungen in zwei unterschiedlich aufgebaute PV-Module (in COMSOL Multiphysics simuliert und verglichen. Bei dem ersten Aufbau handelt es sich um ein Glas-Glas-Modul, bestehend aus Frontglas, Rückseitenglas, sowie den in Ethylenvinylacetat (EVA) eingekapselten Solarzellen. Das zweite Modul besitzt statt einer Glasrückseite eine polymere Rückseitenfolie („Back Sheet“ = BS). Im Fall des Glas-Folie-Moduls wurde nach Aufarbeitung des Status Quo vergangener Arbeiten am Fraunhofer ISE ein bereits vorhandenes Modell an die gewünschten Parameter angepasst. Je nach Modulaufbau dominieren unterschiedliche Pfade den Stofftransport. Während bei Glas-Glas-Modulen die Feuchtigkeit nur durch die äußeren Kanten in das Modul eindringen kann, dominiert bei Glas-Folie-Modulen der Pfad durch die Rückseitenfolie. Die Wasserkonzentration in der Grenzschicht zwischen EVA, bzw. Rückseitenfolie, und der Umgebungsluft ergibt sich aus der Löslichkeit von Wasser in dem Material (S) bei den Umgebungsbedingungen (T, rh). Unter Verwendung temperaturabhängiger Diffusionskoeffizienten für BS und EVA wird schließlich die zeitabhängige Konzentrationsverteilung von Wasser im Modul berechnet.

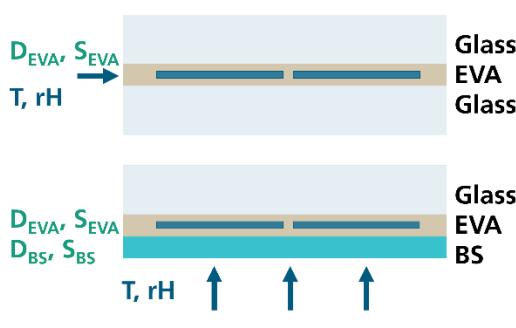


Abbildung 49: Schematischer Aufbau eines Glas-Glas-Modules (oben) und eines Glas-Folien-Modules (unten).

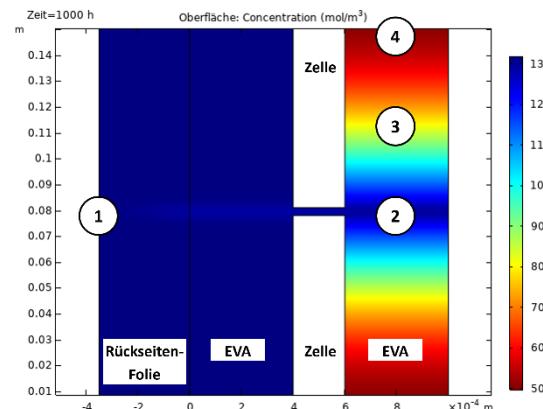


Abbildung 50: Berechnete Konzentrationsverteilung in einem Glas-Folie-Modul (Querschnitt) nach DH1000

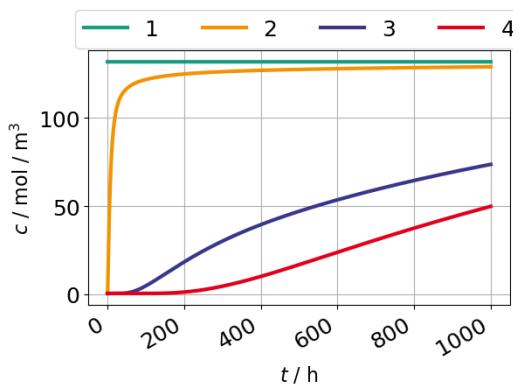


Abbildung 51: Berechnete Feuchtekonzentration in den Punkten 1-4 des Glas-Folie-Moduls während DH1000

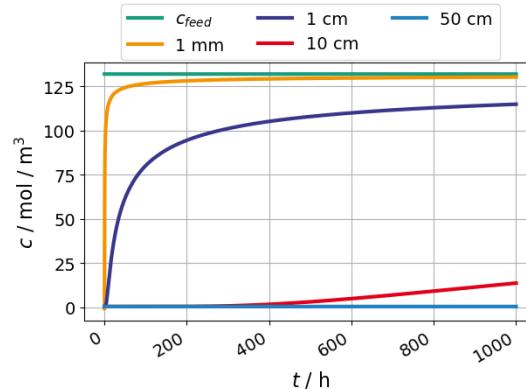


Abbildung 52: Berechnete Feuchtekonzentration in Punkten mit verschiedenen Abständen zum Modulrand des Glas-Glas-Moduls während DH1000.

Die berechnete Verteilung der Feuchtekonzentration in den Polymeren des Glas-Folie-Modules nach 1000 h Feuchte-Wärme-Prüfung (DH1000) ist in Abbildung 13 dargestellt. Im EVA hinter den Zellen sowie in

<sup>1</sup> P. Hülsmann (2016): Characterization and simulation of water vapor ingress into PV-modules. Dissertation. Universität Linz. Fraunhofer ISE.

Punkt 2, welcher oberhalb des Spalts zwischen zwei Zellen und unterhalb des Frontglases liegt, ist die Sättigungskonzentration nahezu erreicht. In Punkt 4, welcher der Zellmitte entspricht, beträgt die Feuchtekonzentration nach DH1000 ca. 38 % der Sättigungskonzentration. Die berechneten Konzentrationsläufe des Glas-Folie-Moduls in den Punkten 1-4, und die Verläufe des Glas-Glas-Moduls in Punkten mit unterschiedlichen Abständen zum Modulrand sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt. Bereits bei einem Abstand von 10 cm zum Modulrand ist die erwartete Feuchtigkeitskonzentration im Glas-Glas-Modul nach DH1000 deutlich geringer als vor der Zellmitte einer Zelle in dem Glas-Folien-Modul. Durch Realisierung einer Kantenisolierung könnte der Feuchteintrag im Glas-Glas-Modul noch weiter verringert werden.

### MS 4.3 Test zum Anprall von Steinen nach DIN EN 1791-1

Im Rahmen des Projekts wurde am Fraunhofer ISE ein Teststand zum Prüfen von Solarmodulen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit gegen den Anprall von Steinen errichtet, mit dem der Test in Anlehnung an DIN EN 1794-1 [16] durchgeführt werden kann. Hierbei handelt es sich um einen Test für Lärmschutzvorrichtungen an Straßen. Diese sind dem Anprall von Steinen, die von der Straßenoberfläche hochgeschleudert werden, ausgesetzt.



Abbildung 53: Teststand zur Prüfung von Solarmodulen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit gegenüber dem Anprall von Steinen nach DIN EN 1794-1.

Abbildung 54: Solarmodul im Kohlhauer Rahmen Scorsa VS-L nach Durchführung des Tests. A, B, C: Im Test untersuchte Aufprallpositionen nach DIN EN 1794-1.

Für den Teststand wurde ein Stahlbolzen (Abbildung 53) mit einer Masse von 2,02 kg angefertigt, dessen abgerundete Oberfläche auf der Aufprallseite den Vorgaben aus DIN EN 1794-1 entspricht. Der Teststand besitzt ein Fallrohr, durch welches das Projektil aus variablen Höhen vertikal auf das Modul fallen gelassen wird. Hierbei kann die Aufprallenergie von 1 Nm bis 30 Nm durch die Fallhöhe variiert werden (siehe Abbildung 53). Die nach DIN EN 1794-1 geforderte Aufprallenergie beträgt 30 Nm und soll an drei Positionen innerhalb der Prüffläche aufgebracht werden (Abbildung 54): Position A befindet sich in der Nähe der Mitte der Prüffläche (des Solarmoduls). Position B befindet sich in der Nähe einer Ecke der Prüffläche (Abstand zu beiden Rändern: 125 mm). Position C kann nach dem Zufallsprinzip oder beliebig gewählt werden.

In einer ersten Testreihe wurden 18 gerahmte Solarmodule mit Frontglas und Rückseitenfolie mit unterschiedlichen Abfolgen von Belastungen zwischen 6,78 Nm und 30 Nm an verschiedenen Aufprallpositionen getestet (siehe Zwischenbericht 06). Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten deutlich, dass die Steinschlagprüfung nach DIN EN 1794-1 für "Lärmschutz-Vorrichtungen an Straßen" für ein herkömmliches Solarmodul mit Glas-Folie-Aufbau eine sehr hohe Belastung darstellt. Es wurde geschlussfolgert, dass die meisten herkömmlichen Solarmodule diesen Test mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht bestehen würden.

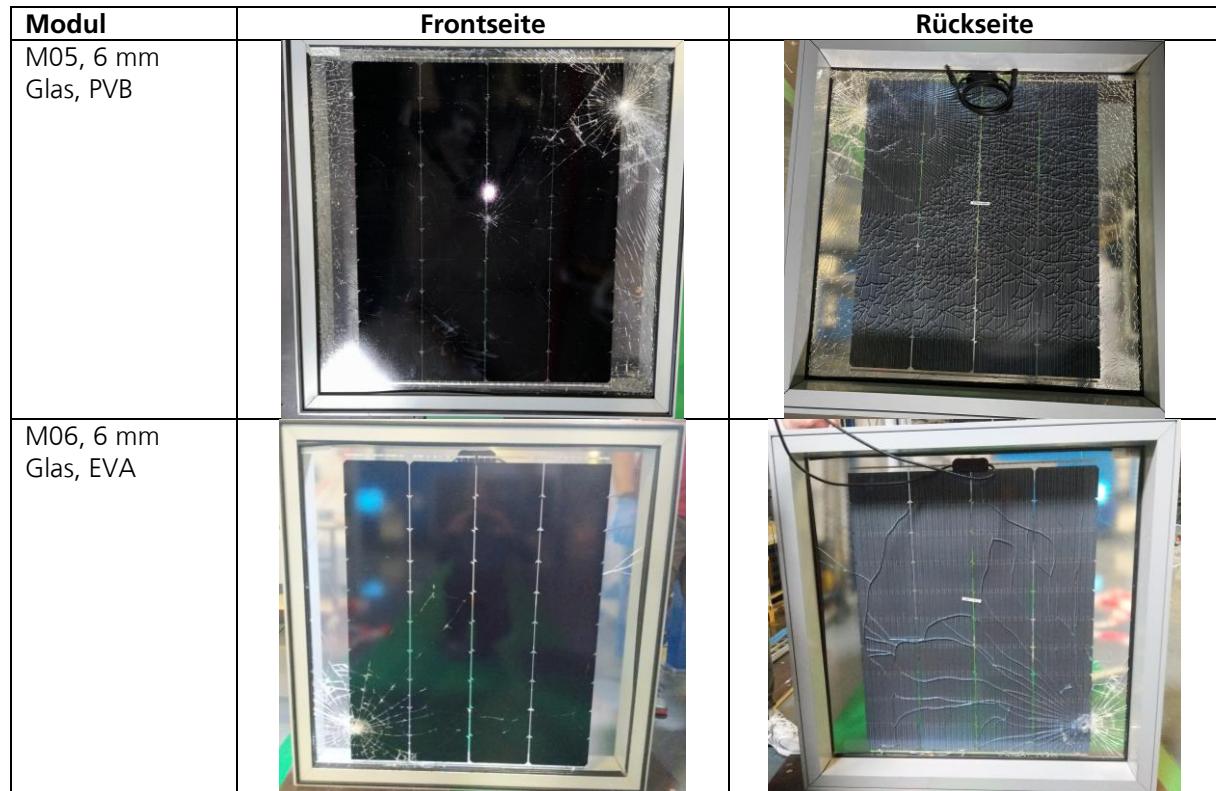
Im weiteren Projektverlauf wurde die Steinschlagprüfung in Anlehnung an DIN EN 1794-1 an Glas-Glas-Modulen im Format 1 m x 1 m mit unterschiedlichen Glasdicken und Einkapselungsmaterialien durchgeführt, die von Megasol zu diesem Zweck hergestellt worden waren. Für den Test wurden die Module in passende Rahmen des Projektpartners Kohlhauer (Scorsa VS-L) montiert. Eine Übersicht über

die getesteten Module sowie über die Ergebnisse ist in Tabelle 9 dargestellt. Tabelle 10 zeigt beispielhaft die Bruchbilder der Module M05 und M06 nach dem Test.

Tabelle 9: Übersicht über die Module von Megasol und Ergebnisse in der Steinschlagprüfung.

Modul	Einkapselung	Glasdicke	Glasbruch Position A?	Glasbruch Position B?	Glasbruch Position C?	Accessibility Test (MST11)
M01	PVB	2 x 2 mm	Front- und Rückglas	Front- und Rückglas	-	Pass
M02	EVA	2 x 2 mm	Front- und Rückglas	Front- und Rückglas, Wölbung	-	Fail
M03	PVB	2 x 4 mm	Nur Frontglas	Front- und Rückglas	Front- und Rückglas	Pass
M04	EVA	2 x 4 mm	Nur Frontglas	Front- und Rückglas	-	Pass
M05	PVB	2 x 6 mm	Nur Frontglas	Front- und Rückglas, RS: TVG/ESG	-	Pass
M06	EVA	2 x 6 mm	nein	Front- und Rückglas	-	Pass

Tabelle 10: Bruchbilder an den Modulen mit 6mm Gläsern nach Aufschlägen mit 30 Nm an den Positionen A und B.



Die Ergebnisse zeigen einen klaren Einfluss der Glasdicke auf die Widerstandsfähigkeit der Module gegen Steinschlag. Während bei den Modulen mit 2 x 2 mm Glas bereits beim ersten Aufschlag in Position A Glasbruch an Front- und Rückseite verursacht wurde, brach bei den Modulen mit 2 x 4 mm Glas beim

ersten Aufschlag nur das Frontglas. An einem der Module mit 2 x 6 mm Glas (M06) führte der erste Aufschlag in Position A zu keinem Glasbruch.

Spätestens der zweite Aufschlag (Position B) führte bei allen getesteten Modulen zu Schäden an Front- und Rückglas. Dabei wurden starke Unterschiede in der Ausprägung der Schäden festgestellt (fehlende Glasstücke ja/nein, verbleibende Stabilität der Module, unterschiedliche Bruchmuster). Aufgrund der geringen Statistik können nicht alle Trends des Tests verallgemeinert werden. Es kann jedoch aus den Ergebnissen geschlussfolgert werden, dass eine Glasdicke von 4 mm oder 6 mm sich sowohl positiv auf die verbleibende Stabilität auswirkt als auch tendenziell die Bildung von Löchern im Glas gegenüber Gläsern mit 2 mm verringert. Eine Verwendung von PVB anstelle von EVA schien die Stabilität des Moduls mit 2x 2mm Glas zu verbessern, dies müsste jedoch durch eine statistisch relevante Anzahl an Tests bestätigt werden.

Weitere festgestellte Unterschiede im Bruchmuster der Module sind auf unterschiedliche Vorspannungen der Gläser zurückzuführen. Vor Beginn des Tests wurden mit einem Streulicht-Polariskop Messungen der Oberflächenspannung der Gläser an jeweils vier Punkten auf Front- und Rückseite durchgeführt. Die Messergebnisse sind in Abbildung 55 dargestellt. Die verwendeten Gläser waren als teilvorgespanntes Glas („TVG“) spezifiziert. Basierend auf früheren Messungen [17] entsprechen die Messwerte der Module mit 4 mm und 6 mm dicken Gläsern größtenteils den Erwartungen für TVG, während die Messwerte der 2 mm dicken Gläser etwas unterhalb der typischen Messwerte für als TVG spezifiziertes Glas liegen.

Auffällig ist die relativ hohe Oberflächenspannung des Rückglases von Modul M05, die zwischen typischen Werten von TVG und Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) liegt. Wie in Tabelle 10 erkennbar ist, führte die Steinschlagprüfung bei diesem Modul zu einem gemischten Bruchbild am Rückseitenglas, das Eigenschaften von ESG (feinkörnige Glasstücke) und TVG (gröbere Risse) aufweist.

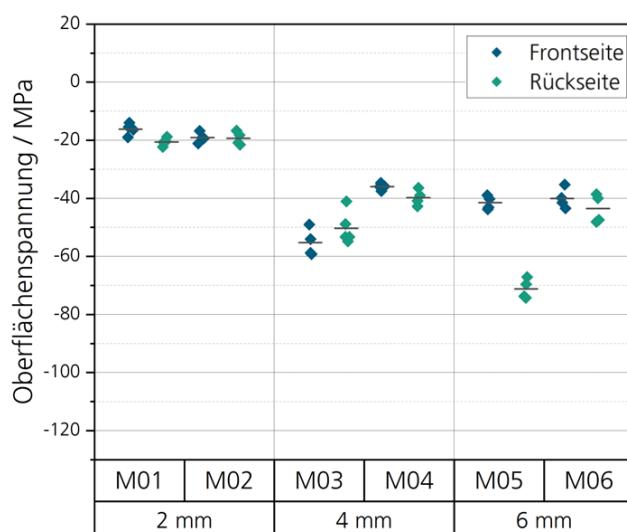


Abbildung 55: Vor der Steinschlagprüfung gemessene Werte für die Oberflächenspannung an Front- und Rückglas der Module



Abbildung 56: Durchführung des Accessibility Tests nach IEC 61730 [14] in Anschluss an die Steinschlagprüfung

Die Entstehung von Zellbrüchen durch die Steinschlagprüfung wurde durch Elektrolumineszenz-Messungen dokumentiert. Auch an den Solarzellen kann der Schaden durch Steinschlag durch eine größere Glasdicke signifikant verringert werden. Während an den Modulen mit 2 mm Glasdicke bereits der erste Aufschlag an Position A zu massiven Zellbrüchen in fast der Hälfte aller Zellen führte (Abbildung 57), wurde bei einem der Module mit 6 mm Glasdicke nach dem ersten Aufschlag (ohne Glasbruch) keine Veränderung in der Elektrolumineszenz festgestellt, und bei dem anderen Modul mit 6 mm Glasdicke war der Schaden auf die Zelle unterhalb des Aufpralls beschränkt (Abbildung 58).

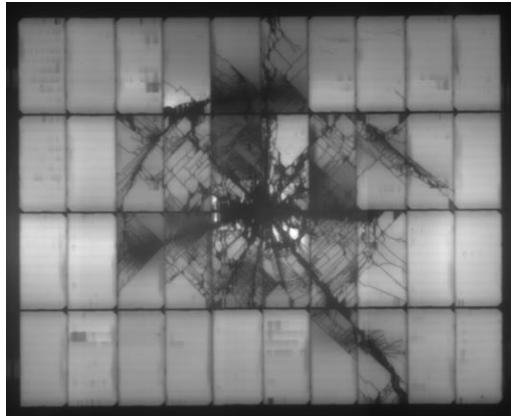


Abbildung 57: Elektrolumineszenz-Aufnahme von Modul M02 mit 2mm dicken Gläsern und EVA nach dem ersten Aufprall an Position A.

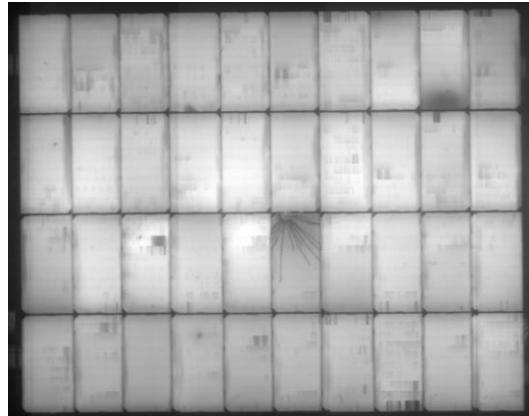


Abbildung 58: Elektrolumineszenz-Aufnahme von Modul M05 mit 6mm dicken Gläsern und PVB nach dem ersten Aufprall an Position A.

Für das Bestehen der Steinschlagprüfung sind in DIN EN 1794-1 folgende Voraussetzungen definiert [16]:

- 1) „Beschädigungen müssen auf die äußereren Teile der Konstruktion beschränkt sein, und Innenbauteile dürfen durch die Aufschläge nicht beschädigt oder verschoben werden;“
- 2) „der Schlagbolzen darf die Außenwand von hohlen Elementen nicht durchschlagen, örtlich begrenzte Schäden in Form von Rissen mit einer Länge von höchstens 50 mm sind jedoch zulässig“
- 3) „geringfügige Beschädigungen der Oberfläche von spröden Baustoffen in Form kraterartiger Absplitterungen (beim Abplatzen von Bruchstücken) sind zulässig, vorausgesetzt, dass die Kratertiefe geringer ist als die Dicke der Außenwand oder 20 mm nicht überschreitet, wobei der kleinere Wert maßgebend ist“

Diese Bewertungskriterien wurden für Lärmschutzelemente definiert, wobei der spezifische Aufbau und die Funktion von Solarmodulen nicht berücksichtigt wurde. Bei wortwörtlicher Anwendung dieser Kriterien wäre der Test für keines der untersuchten Module bestanden, da bei allen Modulen Risse im Glas mit einer Länge von mehr als 50 mm verursacht wurden. Jedoch stellten die getesteten PV-Module gegenüber Verkehrsteilnehmern keine mechanische Gefahr (durch z.B. größere herausfallende Glasbruchstücke) oder elektrische Gefahr (durch offene elektrische Kontakte, siehe Accessibility Test) für die Verkehrsteilnehmer dar, da der Verbundglasauflauf von Solarmodulen bereits zu weiten Teilen dem von Verbundsicherheitsglas entspricht.

In anderen Prüfnormen existieren ähnliche Tests, bei denen spezifische Bewertungskriterien für Solarmodule definiert sind. Ein Beispiel ist der Impact-Test aus UL 1703 [18], bei dem eine Stahlkugel mit 6,79 J auf ein Solarmodul auftrifft. In Anschluss an den Impact-Test ist Glasbruch zulässig, sofern keine Glasscherben mit einer Fläche größer als 6,5 cm<sup>2</sup> aus dem Modul herausgelöst werden. Dieses Kriterium wäre für alle Megasol-Module, die im Rahmen des Projekts der Steinschlagprüfung unterzogen wurden, erfüllt. Weiterhin dürfen keine spannungsführenden Teile zugänglich sein, was mit einem Accessibility Test, vergleichbar mit MST 11 in IEC 61730 [14], geprüft wird. An den im Projekt getesteten Modulen wurde der Accessibility Test nach IEC 61730 durchgeführt (siehe Abbildung 56). Hierzu wurde ein genormter „Prüffinger“ mit einem Druck von ca. 10 N an Bruchstellen der Module in verschiedenen Winkeln angedrückt und gleichzeitig der Widerstand zwischen dem Prüffinger und den Modulsteckern gemessen. An Modul M02 wurde der geforderte Mindestwiderstand von 1 MΩ unterschritten (<200 kΩ) und der Accessibility Test damit nicht bestanden. Bei allen anderen Modulen wurden höhere Widerstände gemessen, da auch bei fehlenden Glasstücken verbleibendes Einkapselungsmaterial oder verbleibendes Glas einen direkten Kontakt zu spannungsführenden Teilen verhinderte. Da die Widerstandsmessung mit einem Digitalmultimeter mit einer geringen Spannung durchgeführt wird und der Accessibility Test im trockenen durchgeführt wird, bedeutet ein Bestehen des Accessibility Tests nicht, dass die elektrische Sicherheit nach Steinschlag noch gewährleistet ist. Die Aussage des Accessibility Tests ist lediglich, dass spannungsführende Teile nicht direkt berührt werden können.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die Steinschlagprüfung nach DIN EN 1794-1 für Solarmodule eine sehr hohe Belastung darstellt und möglicherweise eine Herausforderung für die Akzeptanz von Solarmodulen in Lärmschutzvorrichtungen an Straßen werden könnte, falls die Kriterien aus DIN EN 1794-1 ohne Anpassungen angewandt werden müssen. Eine Erarbeitung von spezifischen Bewertungskriterien für Solarmodule unter Berücksichtigung der elektrischen Sicherheit, der operativen Sicherheit und des Brandschutzes könnte möglicherweise Abhilfe schaffen. Weiterhin wurde gezeigt, dass die Beständigkeit der Module gegenüber Steinschlag durch eine Erhöhung der Glasdicke verbessert werden kann. Es wird daher empfohlen, für Solarmodule in Lärmschutzwänden mindestens 4 mm dicke Gläser zu verwenden und dabei am besten auf Einscheiben-Sicherheitsglas zurückzugreifen.

## 2.1.5 AP 5 Entwicklung Lärmschutzelemente und Befestigungssystem

In diesem AP sollten Konzepte entwickelt werden, um Lärmschutzwände mit Photovoltaik auszustatten. Dabei spielten nicht nur die Baukonstruktion und Anbringung eine Rolle, sondern auch Montage- und Transportkonzepte sowie die Wartung und Gebrauchstauglichkeit. Die entwickelten Konzepte zielen unter anderem darauf ab, die PV-Module gegen Vandalismus schützen und gleichzeitig die definierten Anforderungen aus AP 1 und den jeweiligen Normen erfüllen. Aus den Konzepten wurden kleinformatige Prototypen hergestellt, die in AP 7 erprobt und vorbereitend für Zertifizierungen getestet wurden. Zusätzlich wurden weitere innovative Ansätze der Lärmschutzelemente betrachtet, die in Kombination mit PV-Modulen zusätzliche Vorteile der Systeme lieferten. Die Arbeiten in AP 5 wurden durch Kohlhauer und Fraunhofer ISE durchgeführt.

### AP 5.1: Entwicklung von Nachrüst- und Umrüstkonzepten

In diesen AP wurden Konzepte entwickelt, die für eine Nachrüstung und Umrüstung von bestehenden Lärmschutzwänden mit PV-Modulen geeignet waren, aber auch für neue Lärmschutzwände, die direkt oder später durch PV-Module erweitert werden konnten.

### AP 5.2: Entwicklung und Konstruktion von Rahmensystemen

Ausgehend von den Konzepten aus AP 5.1 wurden Rahmensysteme für die unterschiedlichen Modultypen entwickelt.

### AP 5.3: Herstellung von Wandelementen mit PV-Modulen

In diesem AP wurden die entwickelten Konzepte und Systeme begleitend hergestellt.

### AP 5.4: Integration von weiteren innovativen Ansätzen

In diesem AP wurden weitere innovative Ansätze betrachtet, die die Nutzung und Akzeptanz von PV-Modulen in Lärmschutzwänden weiter erhöhten.

Tabelle 11: Meilensteine AP 5

Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis
<b>MS 5.1</b> Konzepte für Nachrüstung und Umrüstung entwickelt	Es wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und teilweise technisch bis zur Demonstration weiterentwickelt.
<b>MS 5.2</b> Aufbau- und Rahmensysteme entwickelt	Es wurde ein Rahmensystem von Kohlhauer angepasst und für den Demonstrator verwendet.
<b>MS 5.3</b> Konzepte für innovative Ansätze entwickelt	Es wurden verschiedene innovative Konzepte erarbeitet und teilweise technisch bis zur Demonstration weiterentwickelt.

## MS 5.1 Konzepte für Nachrüstung und Umrüstung

Die Konzepte für Nachrüstung und Umrüstung sind die Aufsätze und vorgehängten Kassetten, die bereits vorherig in AP 2, AP 3 und in AP 7 beschrieben sind. Neben den auf Nachrüstung fokussierten Konzepten ist zu vermerken, dass auch der Austausch von in die Jahre gekommenen Absorberelementen und Einbau neuer PV-Elemente eine Option der Nachrüstung sein kann, wenn die H-Pfosten noch in guten Zustand sind und für die nächsten 20 bis 30 Jahre stehen bleiben können. Für die reale Umsetzung einer Nachrüstung müssen Lärmschutzwände im Einzelfall geprüft werden und ihr Zustand und die Resttragfähigkeit durch Gutachten geprüft werden. Im Anschluss müssen in der Regel noch Details am Design angepasst werden. Die Komponenten sollten so einfach zu installieren sein, dass nicht der Hersteller sie montieren muss, sondern jedes Bauunternehmen dafür in Frage kommt.

## MS 5.2 Aufbau- und Rahmensysteme

Für die MPA-Lösung und die Kombinationslösung war ein stabiler Rahmen notwendig, welcher genug Last aufnehmen kann, um das Gewicht aller Elemente in einer Lärmschutzwand aufzunehmen und die schweren Module zu stabilisieren. Die Firma Kohlhauer stellte hierfür ihren zugelassenen und getesteten Scorsa-Rahmen für transparente Acryllärmschutzwände zur Verfügung. Anpassungen wurden unternommen, um die unterschiedliche Dicke des Aufbaus bei der MPA-Lösung und der Kombinationslösung durch die Wahl unterschiedlicher Nutbreiten und EPDM-Gummis auszugleichen. Der Scorsarahmen hat den Vorteil, dass die Einfassung der Module auf der Vorderseite sehr nah an der äußeren Kante erfolgt und dadurch vorderseitig keine Verschattung durch den Rahmen auf die äußeren Zellen auftritt. In Abbildung 59 ist der Querschnitt des MPA-Moduls am Rahmen zu erkennen.

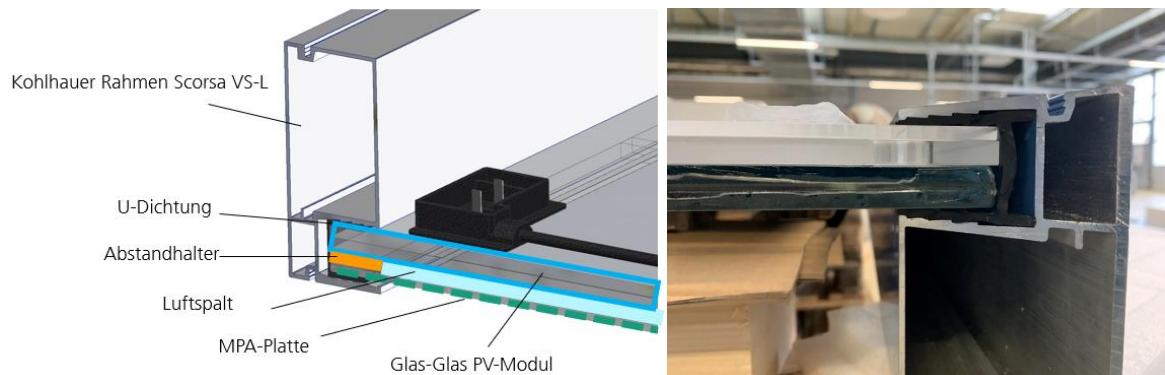


Abbildung 59: Konzept und Fotos vom Querschnitt des Rahmensystems, PV-Modul, Abstandhalter und MPA in Nut des Rahmens

## MS 5.3 Innovative Ansätze

Neben bereits durch frühere Pilotvorhaben zu PV-Lärmschutzwände erprobte Konzepte, die in PVwins aufgenommen wurden, konnten einige innovative Aspekte erprobt werden. Hierzu gehören bezüglich akustischen Ansatzes und Moduldesign die MPA-Lösung (Konzept 4), die Kombinationslösung (Konzept 7), welche bereits in den vorangehenden Kapiteln ausgiebiger behandelt wurden. An dieser Stelle wird daher nicht näher darauf eingegangen.

## 2.1.6 AP 6 Elektrische Systemanbindung

In diesem Arbeitspaket wurde die elektrische Systemanbindung für die PV-Lärmschutzwände entwickelt. Dazu gehörte die Entwicklung von Service- und Wartungskonzepten für eine optimale Betriebsführung. Als weiteren Aspekt wurden Konzepte für eine lokale Verwendung der generierten Leistung betrachtet. Die Entwicklung der elektrischen Systemanbindung erfolgte im Rahmen der aufgestellten Anforderungen aus AP1 und verwendete die Module aus AP 4 sowie die Lärmschutzwandsysteme aus AP 5. Als Ergebnis entstand ein Prototypenaufbau, der in AP 7 in-situ gemessen wurde. Die Arbeiten in AP 6 wurden zum Großteil durch Igrapower durchgeführt, mit Zuarbeit bei den verschiedenen Meilensteinen durch die anderen Projektpartner, und inhaltlichen Besprechungen mit EGIS und BASt.

### AP 6.1 Entwicklung der elektrischen Systemanbindung

Dieses Unter-AP beschäftigte sich mit der Anbindung der generierten Leistung an das Stromnetz.

### AP 6.2 Entwicklung von Betriebsführungsstrategien und Service- und Wartungskonzepten

Es wurden Strategien erstellt, um bereits vorab Betriebsführungskosten abschätzen und minimieren zu können.

### AP 6.3 Entwicklung von Ansätzen zur lokalen Energienutzung

Da eine Anbindung an das Stromnetz bei sehr entfernten Lärmschutzwandsystemen von Stromtrassen nicht unbedingt wirtschaftlich ist, wurden zusätzlich zu der Netzanbindung in AP 6.1 Varianten diskutiert, um die erzeugte Leistung lokal zu nutzen.

### AP 6.4 Aufbau eines Prototypensystems

Um die betrachteten Konzepte zu erproben, wurde zur geplanten in-situ Messanlage ein Systemanschluss simuliert, sodass mindestens ein Konzept erprobt werden konnte.

Tabelle 12: Meilensteine AP 6

Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis
<b>MS 6.1</b> Konzepte für die elektrische Systemanbindung inklusive Kabelführung für 3 Beispiele erstellt	Erfüllt
<b>MS 6.2</b> Betriebsführungsstrategien inklusive Wartungs- und Servicekonzepten für die 3 Beispiele erstellt	In einfacher Form erledigt
<b>MS 6.3</b> 2 Konzepte zur lokalen Nutzung der Energie entwickelt	Es wurden verschiedene Varianten, z.B. für Ladesäulen betrachtet.
<b>MS 6.4</b> Aufbau und Anbindung eines PV-Lärmschutzwandsystems an einem simulierten Strom-Abnehmer	Aufbau des Demonstrators mit Netzanschluss
<b>MS 6.5</b> Abschlussbericht über die Erprobung des angeschlossenen PV-Lärmschutzwandsystems aus MS 6.4	Wird in diesem Abschlussbericht integriert. Möglicherweise wird nach Abschluss einer längeren Monitoringphase des Solarertrags noch eine Veröffentlichung mit einer Übersicht der Ergebnisse des Demonstrators durchgeführt.

## MS 6.1 Elektrische Systemanbindung

### FMEA

Die elektrische Sicherheit von PV-LSW wurde durch eine Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) für verschiedene Fehlerfälle und Unfallszenarien bewertet. Insgesamt wurden 6 verschiedene Fehlerfälle für jeweils drei Lärmschutzwand Modellvarianten und dazu jeweils drei Unfallszenarien bewertet. Die Ergebnisse von drei ausgewählten Fehlerfällen werden im Folgenden dargestellt und erläutert. Tabelle 14 zeigt die Gewichtungsmetrik der Auftrittswahrscheinlichkeit A (niedriger Wert bevorzugt), Bedeutung B (niedriger Wert bevorzugt) und Entdeckungswahrscheinlichkeit E (niedriger Wert bevorzugt). Die Kennzahl RPZ ist die Risikoprioritätszahl und wird als das Produkt aus A,B und E berechnet. Je höher die RPZ ist, desto wichtiger ist es, entsprechende Abstellmaßnahmen aufgrund der Risikobewertung umzusetzen.

Tabelle 13: FMEA von drei ausgewählten Fehlerfällen

Nr.	Pot. Fehler	Pot. Folgen	Pot. Ursachen	LSW Model	Unfall Szenario	A	B	E	RPZ	Abstellmaßnahme	Wirkung
IV	Doppelter Erdschluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wenn Person involviert -&gt; Stromschlag, Lebensgefahr</li> <li>• Wenn zwei Objekte involviert -&gt; Stromschlaggefahr bei Berührung</li> </ul>	Beide enden eines Kabels/Strings laufen gegen Erde	1	a	1	6	3	18	Kurzschlußschutzschaltung DC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Spannungen in den Strings</li> <li>• Kurzschlussstrom fließt</li> </ul>
					b	3	6	3	54		
					c	3	6	3	54		
				2	a	1	6	3	18		
					b	3	6	3	54		
					c	3	6	3	54		
				3	a	3	6	3	54		
					b	3	6	3	54		
					c	3	6	3	54		
V	Potential an Karosserie	Stromschlag-/Lebensgefahr bei berühren der Karosserie	ein offenes Kabelende berührt die Karosserie	1	a	1	8	8	64	Kurzschlussschutzschaltung DC und Erdung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlerstrom fließt nicht über den Verunfallten</li> </ul>
					b	2	8	8	128		
					c	1	8	8	64		
				2	a	1	8	8	64		
					b	2	8	8	128		
					c	2	8	8	128		
				3	a	3	8	8	192		
					b	3	8	8	192		
					c	3	8	8	192		
VI	Leerlauf	Leerlaufspannung an den Kabelenden -> 1500 V DC bei klassischem Wechselrichter -> 90 V DC bei Modulwechselrichtern	Kabdurch-trennung	1	a	1	1	2	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stromfluss wird unterbrochen            -&gt; Berührungsspannung von 120 V DC bleibt unerreicht!</li> <li>• Wechselrichterabschaltung</li> <li>• Einzelne Module trennen</li> <li>Bsp.. Optimierter nach NEC 690.12 &amp; Modulwechselrichter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stromfluss wird unterbrochen            -&gt; Berührungsspannung von 120 V DC bleibt unerreicht!</li> <li>• Wechselrichterabschaltung</li> <li>• Einzelne Module trennen</li> <li>Bsp.. Optimierter nach NEC 690.12 &amp; Modulwechselrichter</li> <li>• Strings nahezu spannungsfrei</li> <li>• Spannung innerhalb Modul</li> </ul>
					b	3	4	2	24		
					c	3	3	2	18		
				2	a	1	2	2	4		
					b	5	3	2	30		
					c	5	4	2	40		
				3	a	5	3	2	30		
					b	5	3	2	30		
					c	5	3	2	30		

### Unfallszenarien

- a Ein PKW kollidiert mit der LSW
- b Ein LKW kollidiert mit der LSW
- c Zwei Kfz kollidieren mit der LSW

### Lärmschutzwand (LSW) Modell

- 1 Aufsatzvariante
- 2 Solarmodule in Oberhälfte der LSW integriert
- 3 Solarmodule in gesamter LSW integriert

Tabelle 14: Gewichtung FMEA

Gewichtung	A Auftrittswahrscheinlichkeit	B Bedeutung	E Entdeckungswahrscheinlichkeit
1	Sehr niedrig	gering	Sehr hoch
2			
3	Niedrig	Mäßig	Hoch
4			
5	Mittel	Erheblich	Mittel
6			
7	hoch	Groß	Niedrig
8			
9	Sehr hoch	Sehr groß	Sehr niedrig
10			

Für die FMEA-Fehlerbewertung in Tabelle 13 wurde eine 4 m hohe Lärmschutzwand angenommen, bei welcher es sich um ein ungeerdetes System mit einer unterirdischen Rückführung des Minus-Pols handelt. Fehler IV könnte sich aus einem Erdschluss (Fehler III) ergeben, sollte aber erst bei schwerwiegenden Unfällen und bei starker Beschädigung der LSW auftreten. Dieser Fehler ist besonders gefährlich, da der Stromkreis entweder durch Berührung einer Person geschlossen wurde und somit Lebensgefahr besteht, oder jedoch da involvierte Objekte unter Spannung bzw. sogar Stromfluss stehen können. Sollten Hilfskräfte oder auch Betroffene diese Objekte berühren besteht auch für sie Lebensgefahr. Man kann die Gefahr jedoch durch eine Kurzschlusschutzschaltung verringern, da hierdurch nur noch niedrige Spannungen anliegen.

Fall V hat eine sehr niedrige Auftrittswahrscheinlichkeit, da es sich hierbei um einen Spezialfall von Fehler IV handelt. Sollte der Fehler jedoch auftreten, so besteht Lebensgefahr für die Insassen des Kfz sowie für Hilfskräfte. Durch die Bereifung ist das Kfz isoliert und gilt somit nicht als Erdung, auch wenn ein Potential anliegt. Sollte eine Person somit das Kfz berühren, ohne selbst vom Boden isoliert zu sein, wird sich hierdurch der Doppelerdenschluss bilden. Aus diesem Grund gilt für diesen Fehlerfall dieselbe Abstellmaßnahmen wie für Fehler IV. Aufgrund der hohen Bedeutung mit Lebensgefahr beim Auftreten, fällt die Risikoprioritätszahl für diesen Fehlerfall besonders hoch aus im Vergleich zu den anderen Fehlerfällen.

Fehler VI könnte bei besonders schwerwiegenden Unfällen mit starker Beschädigung der LSW zwar auftreten, ist jedoch als solcher ungefährlich. Bei Erkennung des Fehlers durch den Wechselrichter trennt sich dieser vom Netz und ist somit nicht mehr über dieses geerdet. Somit geht von den durchtrennten Kabeln keine Gefahr aus, außer der sehr unwahrscheinliche Fall auftritt, dass zwei Kabelenden gleichzeitig durch eine Person berührt werden, in welchem Fall Lebensgefahr bestehen würde. Diese Gefahr könnte durch Moduloptimierer, welche bei einer Trennung vom Netz die Module aus dem String trennen, verringert werden. Allerdings wäre diese Schutzfunktion nur eingeschränkt wirksam bzw. zu bewerten, weil die meisten Moduloptimierer auf dem Markt nur mit einer Verzögerung von mehreren Sekunden reagieren.

### Vergleich Moduloptimierer und Modulwechselrichter: Sicherheit / Kosten

Die durch die FMEA-Analyse aufgezeigte Möglichkeit, im Falle eines Leerlaufs durch Durchtrennung des Stromleiters mit Moduloptimierern oder Modulwechselrichtern eine Abschaltung des Strangs zu bewirken, wurde ebenfalls in einem Funktionsvergleich in

Tabelle 15 und in einem Kostenvergleich in Tabelle 17 und Tabelle 18 für AP 6-1, AP 6-3 und AP 8-1 betrachtet.

Tabelle 15: Vergleich Zentral WR, Moduloptimierer, Modulwechselrichter

	Zentral WR	Optimierer	Modulwechselrichter
Kosten	Ca. 4000 €	27 – 60 €/Stk. 50 €/kWp (Feldverschaltung) 40 €/kWp (Stringverschaltung)	57–125 €/Stk. 124€/kWp (Feldverschaltung) 94 €/kWp (Stringverschaltung)
Sicherheit		Spannungsbereiche von 60–90 V •Lichtbogenerkennung •Abschaltung auf Modulebene	•Eingangsspannung von 45– 80 V •Ausgangsspannung von 230 V
Monitoring	Über 9 Stränge: •MPP Tracking	Über einzelne Module: •MPP Tracking •Verringert Mismatch-Verluste	Über einzelne Module: •MPP Tracking •Verringert Mismatch-Verluste

Für den Kostenvergleich wurden die Verschaltungsarten Feldverschaltung und Stringverschaltung gegenübergestellt (siehe Abbildung 60). Dabei wurden die Daten aus Tabelle 16 für die Moduloptimierer und Modulwechselrichter angenommen.

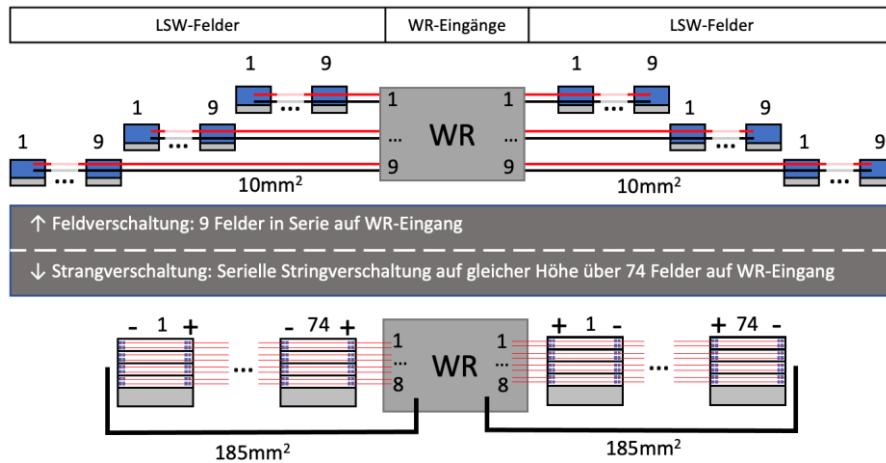


Abbildung 60: Vergleich Feldverschaltung vs. Stringverschaltung mit Zentral-WR

Tabelle 16: Parameter für Kostenkalkulation Modulwechselrichter und Moduloptimierer

Optimierer	Bsp. TIGO TS4-A-O	Modulwechselrichter	Bsp. INV500-90
Eingangsspannung max.	80 V	Eingangsspannung max.	90 V
Spannungsbereich	16-80 V	Spannungsbereich	40-90 V
Max. Strom	15 A	Max. Strom	11 A
Max. Eingangsleistung	700 W	Max. Eingangsleistung	500 W
Preis	30 €	Preis	85 €

Tabelle 17: Kostenvergleich Moduloptimierer

<b>Feldverschaltung</b>			
Feld		2 Optimierer pro Feld	
Anzahl Reihen	8		
Zellen pro Reihe	25		
Zelle pro Feld	200	Felder pro MPPT	9
		MPPT Eingänge pro WR Seite	8
mpp-Spannung pro Feld	110 V	Anzahl LSW pro Seite	72
mpp-Strom pro Feld	11 A	Menge Opt. / LSW	2
mpp-Spannung pro 1/2 Feld	55 V	Gesamtmenge Optimierer	144
mpp-Strom pro 1/2 Feld	11 A	Kosten pro Seite	4.320 €
Leistung pro Feld	1200 W	<b>Gesamtkosten</b>	8.640 €
Leistung pro WR Seite	86400 W	<b>spez. Kosten</b>	50 € /kW
Leistung gesamt	172,8 kW	<b>inkl. Wechselrichter ca.</b>	12.640 €
		<b>spez. Kosten</b>	73 € /kW
<b>Stringverschaltung</b>			
Zellen pro Reihe	25		
Anzahl Reihen	8		
		Nötige Menge an Opt. pro String	12,72
Strings pro Feld	8	max. Anzahl an Zellen pro Opt.	145,45
Felder pro String	74	Zellen pro Optimierer	125
		Menge an Opt. Pro String	14,8
Zellen pro String	1850		
mpp-Spannung pro String	1017,5 V		
mpp-Strom pro String	11 A	Menge Opt. Pro WR Seite	118,4
		Gesamtmenge Opt.	236,8
mpp-Spannung 125 Zellen	68,75 V		
mpp-Strom 125 Zellen	11 A	<b>Gesamtkosten</b>	7.104 €
		<b>spez. Kosten</b>	40 € /kW
Leistung pro String	11100 W	<b>inkl. Wechselrichter ca.</b>	11.104 €
Leistung gesamt	177,6 kW	<b>spez. Kosten</b>	63 € /kW

Tabelle 18: Kostenvergleich Modulwechselrichter

<b>Feldverschaltung</b>			
Feld		2 Modulwechselrichter pro Feld	
Anzahl Reihen	8		
Zellen pro Reihe	25		
Zelle pro Feld	200	Felder pro MPPT	9
		MPPT Eingänge pro WR Seite	8
MPP-Spannung pro Feld	110 V	Anzahl LSW pro Seite	72
MPP-Strom pro Feld	11 A	Menge Modulwr. / LSW	2
MPP-Spannung pro 1/2 Feld	55 V	Gesamtmenge Modulwr.	144
MPP-Strom pro 1/2 Feld	11 A	Kosten pro Seite	12.240 €
Leistung pro Feld	1200 W		
Leistung pro WR Seite	86400 W	<b>Gesamtkosten</b>	24.480 €
Leistung gesamt	172,8 W	<b>spez. Kosten</b>	142 € /kW
<b>Stringverschaltung</b>			
Zellen pro Reihe	25		
Anzahl Reihen	8		
Strings pro Feld	8	Nötige Menge an MWR pro Strin	11,31
Felder pro String	74	max. Anzahl an Zellen pro MWR	163,64
Zellen pro String	1850	Zellen pro MWR	150
MPP-Spannung pro String	1017,5 V	Menge an MWR Pro String	12,3
MPP-Strom pro String	11 A		
		Menge MWR pro Seite	98,7
MPP-Spannung 150 Zellen	82,5 V	Gesamtmenge MWR	197,3
MPP-Strom 150 Zellen	11 V		
Leistung pro String	11100 W	<b>Gesamtkosten</b>	16.773 €
Leistung Gesamt	177,6 kW	<b>spez. Kosten</b>	94 € /kW

Im Gesamtkostenvergleich (siehe Tabelle 19) zwischen Stringverschaltung und Feldverschaltung zeigt sich, dass der Kostenunterschied für Moduloptimierer nur gering ausfällt und die Stringverschaltung ca. 10 €/kWp günstiger als die Feldverschaltung ist.

Ein deutlich höherer Kostenunterschied ist bei den Modulwechselrichtern feststellbar. Hier ist die Feldverschaltung um 48 €/kWp teurer als die Stringverschaltung.

Tabelle 19: Komponentenkosten der Varianten exkl. Kabelkosten

	Stringverschaltung	Feldverschaltung
Zentral-WR	22,85 €/kWp	
Zentral WR + Moduloptimierer	62,85 €/kWp	72,85 €/kWp
Modul-WR	94 €/kWp	142 €/kWp

Insgesamt erhöht der Einsatz von Moduloptimierern oder Modulwechselrichtern die Systemkosten gravierend gegenüber einer Systemvariante mit nur einem Zentral-WR. Als Zwischenfazit ist daher festzuhalten, dass in jedem Fall die Zielsetzung „Zentral-WR“ fokussiert werden soll, weil die Kosten zur Reduzierung der systembedingten Sicherheitsanforderungen bei „Zentral-WR“ bei angemessener Gewichtung im Vergleich zu dezentralen Verschaltungsarchitekturen deutlich geringer sind. Die Kabelkosten für die beiden Verschaltungsarten mit Zentral-Wechselrichter wurden ebenfalls nochmals überarbeitet (siehe Tabelle 20). Hierbei ist die Feldverschaltung um ca. 5 €/kWp günstiger, jedoch kann aufgrund der preislichen Volatilität der Komponenten angenommen werden, dass die Kabelverschaltung etwa gleich teuer ist und andere Faktoren, z.B. ertragseffiziente Verschaltung bei der Auswahl der Verschaltung eine ebenso wichtige Rolle spielen.

Tabelle 20: Überarbeiteter Kostenvergleich der Verkabelung Verschaltung mit Zentral-WR

<b>Verschaltungs-Variante</b>	<b>Stringverschaltung</b>	<b>Feldverschaltung</b>
Zellreihen pro String	1 Zellreihe	8 Zellreihen
Aufspaltung des Felds	8 Strings	1 String
Zellen pro Feld pro String	25 Zellen	200 Zellen
Felder pro String	74	9
Feld-Blöcke pro WR pro Seite	1	8
V_mpp pro Feld	13,75 V	110 V
V_mpp pro String	1017,5 V	990 V
P_mpp pro String	11100 W	10800 W
P_mpp pro WR	177,6 kW	172,8 kW
Stringlänge	296 m	36 m
Gesamtlänge	592 m	576 m
<b>Installations-Kosten</b>	<b>Stringverschaltung</b>	<b>Feldverschaltung</b>
Kabel von Feld zu Feld, 6 mm^2		
Stecker, von 6 mm^2 an Modul	1,5 m	1,5 m
Kabel 6 mm^2 verlegen	1168 Stück	128 Stück
	2336 Stück	256 Stück
	1752 m	192 m
Kabel von WR (plus) zu Feld, 6 mm^2	5 m	
Kabel 6 mm^2 verlegen	16 Stück	72,00 EUR
Stecker, von 6 mm^2 an Modul bzw. WR		80,00 EUR
	32 Stück	64,00 EUR
Kabel von Feld zu WR (minus), 185 mm^2	296 m	
Kabel 185 mm^2 verlegen	2 Stück	2.190,40 EUR
Y-Stecker von 8 auf 1, 185 mm^2 an Modul		3.552,00 EUR
bzw. WR	4 Stück	240,00 EUR
Kabel von WR (plus u. minus) zu Feld, 10 mm^2		
Kabel 10 mm^2 verlegen	4688 m	7.032,00 EUR
Stecker, von 10 mm^2 an Modul bzw. WR	64 Stück	4.688,00 EUR
		256,00 EUR
<b>Gesamtkosten</b>	<b>14.199,20 EUR</b>	<b>12.852,80 EUR</b>
spezifische Kosten	79,95 EUR/kW	74,38 EUR/kW

## MS 6.2 Betriebsführungsstrategien

Grundbaustein der technischen Betriebsführung ist die Fernüberwachung der PV-Anlagen. Diese erfolgt hauptsächlich durch dafür geeignete Web-Portale bzw. eeb-basierten interaktive Applikationen. Durch eine tägliche Überwachung werden die Energie-Erträge der Anlage kontrolliert und ausgewertet. Außerdem ermöglicht das Monitoring auch die Kontrolle der elektrischen und physischen Parameter (hauptsächlich Wetterdaten).

Alle diese Informationen geben dem Verantwortlichen die Möglichkeit Anomalien, die an Anlagenkomponenten (z.B. Module, Strings, Wechselrichter) vorkommen, festzustellen und zu analysieren. Er kann dadurch im Vorfeld standortspezifische, jahreszeit- bzw. wetterbedingte Anomalien von wahren Störungen unterscheiden.

Eindeutige und versteckte bzw. schleichende Fehler können außerdem frühzeitig erkannt werden auch vor der Auslösung der automatischen Fehlerbenachrichtigung, die von den Portalen per Mail oder SMS gesendet werden.

Nachdem ein Fehler erkannt wird, folgt die Fehleranalyse, die eventuelle Identifizierung der Störquelle und am Abschluss immer eine Fehlerklassifizierung nach Dringlichkeit:

- sofort (Gefahr im Verzug), auch an Wochenenden und Feiertagen
- umgehend: am nächstmöglichen Arbeitstag welcher vertraglich festgelegt ist
- zügig (innerhalb 1-3 Wochen)
- geplant bzw. nicht dringend: bei der nächsten Wartung oder bei einem anderen geplanten Einsatz

Die Reaktionszeiten sind je nach Vertragslage sehr unterschiedlich definiert bzw. hängt dies auch von der Anlagengröße und dem zu erwartenden Ertragsausfall bei einem Schaden ab. Die Reaktionszeit kann sich entweder auf die Zeit beziehen, die benötigt wird, um einen Fehler per Fernwartung zu entdecken, einzuschätzen und zu klassifizieren oder auf die Zeit bis tatsächlich eine Servicekraft bei der Anlage ist. Im Falle der Lärmschutzwände bietet es sich an hier direkt eine zweistufig zu organisieren, indem man für sehr seltene Extremereignisse wie Unfälle in der Wand, Brand von Fahrzeugen etc. mit einem Notdienst Bereitschaftsverträge vereinbart, um in diesen Fällen unmittelbar qualifiziert auch vor Ort handlungsfähig zu sein. Bei allen anderen Havarien sollte die oben angedeutet Dringlichkeitsabstufung (ab umgehend) ausreichend sein.

Somit stehen dem Betriebsführer alle Informationen zur Verfügung, die ihm die Planung der Fehlerbehebung durch einen vor Ort Einsatz eines Fachtechnikers ermöglicht.

Durch die Fernüberwachung kann er außerdem den Fachkräften vor Ort helfen den Fehler schneller zu orten und mit ihnen nicht eindeutige Störungen besser zu identifizieren und zu beheben. Anschließend kann er die Effektivität der Reparatur in Echtzeit kontrollieren.

Die Aufstellung eines Serviceplans im Vorfeld, welcher festlegt, wie die betroffenen Subjekte (Anlagebetreiber, Netzbetreiber, Techniker, eventueller Mieter oder Pächter des Anlagestandorts) benachrichtigt bzw. koordiniert und wie die Aufgaben aufgeteilt werden sollten, liegt ebenfalls in den Händen des technischen Betriebsführers.

Ein schnelles und effizientes Störfallmanagement ermöglicht, die Ertragsminderungen durch Fehler und/oder Probleme und die verbundenen wirtschaftlichen Schäden zu minimieren.

Neben Störfallmanagement gehören zur technischen Betriebsführung weitere Aufgaben:

Periodische Datensicherung und Archivierung sowie Zusammenstellung von Berichten in denen die ausgewerteten Ertragsdaten sowie die Störfälle aufgelistet werden.

Die Gegenüberstellung der Quartal-, Semester oder Jahresdaten mit den langjährigen vorhandenen Daten zusammen mit Berücksichtigung der Wetterinformationen und der Störfälle ermöglichen dem Betriebsführer eine weitere Auswertung der Anlageeffizienz.

Die Planung und die Organisation einer periodischen Wartung, der wichtigen Anlageteile wie Unterkonstruktion, Module, Sammelkästen, Wechselrichter, DC- und AC-Verkabelung, sowie Kommunikation und Monitoring-Systeme bilden eine weitere wichtige Aufgabe des Betriebsführers. Anlagespezifische Wartungsprotokolle werden dazu vorbereitet und den ausführenden Fachkräften zur Verfügung gestellt.

Diese werden dann ausgewertet und in einem abschließenden Bericht zusammengefasst und dem Anlagebetreiber abgegeben.

Zu Wartung gehören Sichtkontrollen der Hautkomponenten, Messungen elektrischen Parameter, Nachziehen und thermografische Kontrolle der Verbindungen, Bewertung der Verschmutzungsgrad der Module und Status des Bewuchses.

Empfohlen wird in diesem Zusammenhang ebenfalls eine Reinigung der Module und Grünpflege. Das Intervall dazu kann z.B. jährlich sein, oder nach Bedarf. Diese Arbeiten werden im Regelfall von einer vom Anlagenbetreiber beauftragten Fachfirma durchgeführt.

Bei der Wartung werden auch geplante bzw. nicht dringende Reparaturen durchgeführt.

Im Hinblick auf die wandintegrierten PV-Module an Lärmschutzwänden an viel befahrenen Straßen muss hier das Reinigungsintervall individuell nach Verschmutzungsgrad festgelegt werden.

Im Falle von wandintegrierten PV-Modulen an Lärmschutzwänden sind neben den bereits erwähnten Kriterien auch noch andere Aspekte zu berücksichtigen und müssen in den Serviceverträgen festgelegt werden wie bspw. die vereinbarte Reaktionszeit und die mögliche Anzahl von Eingriffen in den Straßenverkehr. Hierzu gehört bereits im Vorfeld die genaue Festlegung der Zuständigkeiten und die Bewilligungen der zuständigen Ämter einzuholen. Die anfallenden Tätigkeiten können so anhand der Zuständigkeit organisiert und weitergegeben werden. Ebenso muss im Vorfeld ein Plan angefertigt werden, wie die PV-Technik an den Wänden zugänglich ist. Als essenziell wird angesehen, Reaktionszeiten und Ausführungszeiten ebenfalls im Voraus festzulegen. Nach den einzelnen Merkmalen der Anlage wird ein Notfallplan erstellt, welcher den Rettungskräften und dem zuständigen Straßenbetreiber im Vorfeld auszuhändigen ist. Hier ist auf den vorgegebenen Leitfaden für den Einsatzfall in Verbindung mit Photovoltaikanlagen zu verweisen, welcher den Rettungskräften bekannt sein sollte. Besonderheiten der Lärmschutzwand ist die Gefährdung des Personals bei Arbeiten an der straßenzugewandten Seite ggf. in Verbindung mit Servicefahrzeugen. Für eine Gefahrenreduzierung als auch Kosteneinsparung bei der Betriebsführung sollte möglichst ein Wartungs- und Reparaturplan ausgearbeitet werden, bei der die Wand von der straßenabgewandten Seite gewartet werden kann. Eine weitere Besonderheit ist die Bauhöhe, welche auch bei kleinen Reparaturen neben Leitern ggf. auch einen Hubsteiger notwendig macht. Für eine effiziente Wartung an dem Linearkraftwerk ist wichtig, dass mögliche Havarien an Wechselrichtern, Kabeln und Modulen aus der Ferne möglichst genau lokalisiert werden können, damit die Servicekraft vor Ort die Problemstelle schneller findet bzw. die Anfahrt bzw. der Fußweg reduziert ist. Im Rahmen der obligatorischen Störfallklassifizierung muss vorab festgelegt werden, bei welchen Störfällen und vor Ort-Einsätzen der Autobahnbetreiber und/oder die Feuerwehr und weitere Personen und Stellen informiert werden müssen. Die Informationsweitergabe sollte standarisert ablaufen, so dass die Kommunikationswege zwischen den Akteuren vorab eindeutig festzulegen sind.

### MS 6.3 Konzepte zur lokalen Nutzung der Energie

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Konzepte zur Nutzung der Energie diskutiert und betrachtet. Als wesentliche Unterscheidungsmöglichkeit lassen sich folgende Gruppen in Tabelle 21 einordnen:

Tabelle 21: Möglichkeiten der Energievermarktung / Nutzung

Eigenverbrauch	Tankstellen, Rastanlagen, E-Ladesäulen (mit THG-Quoten), Batteriespeicher, H2-Erzeugung, Tunnel, Straßenmeistereien, Industrieunternehmen in direkter Nähe zur Bundesfernstraße
Teileinspeisung	Wie bei Eigenverbrauch, aber mit Netzanbindung. Fokus auf Eigenverbrauch, Überschusseinspeisung.
Volleinspeisung	100 % Netzeinspeisung, bis 100 kWp EEG, ab 100 kWp Direktvermarktung über EEG-Ausschreibung oder Power Purchase Agreements (PPA)

Weitere Details zu den erzielbaren Einspeisevergütungen und Direktvermarktung werden in Kapitel 2.8 zu MS 8.1 Gesamtkostenanalyse und Wirtschaftlichkeit betrachtet.

#### MS 6.4 Elektrische Anbindung des PV-Lärmschutzwandsystems

Wie unter MS 6.1 bereits erläutert gibt es verschiedene generelle Konzepte für die elektrische Systemanbindung, welche projektspezifisch ausgelegt werden müssen bzw. müssen die unter 6.1 angestellten Systemvergleiche und Auslegungen für jedes Projekt individuell erfolgen. Das betrifft sowohl die Optimierung hinsichtlich der Kosten und der möglichen Verluste (Errichtung, Betrieb) aber auch die etwaigen Anforderungen des Betreibers, welche bspw. hinsichtlich der elektrischen Sicherheit auch die gesetzlichen Anforderungen überschreiten können. Neben den theoretischen Überlegungen dieser Konzepte wurde sowohl für die Aufsatzlösung (Projekt Musterwand Firma Kohlhauer) und die Demonstratorwand in Merdingen eine konkrete Planung durchgeführt und umgesetzt. In Abbildung 61 sind Bilder der Kabelführung durch die rückseitig an die H-Pfosten montierten Kabelkanäle und die Montage der Moduloptimierer innerhalb der Kabelkanäle zu sehen. Abbildung 62 zeigt den Stromlaufplan. Die verschiedenen Module wurden hier in einem String angeordnet, um eine hinreichende Systemspannung zu erreichen, und jedes Modul mit Optimierern verschiedener Leistungsklassen versehen. Neben der Erforschung der Prototypen wurde so auch die Sicherheitsfunktion von Optimierern durchgeführt, welche bei einer Störung die Ausgangsspannung eines Optimierers auf 1 V begrenzt. Die Netzanbindung erfolgt in diesem Fall lediglich über einen Leitungsschutzschalter mit Überspannungsschutzfunktion.



Abbildung 61: Fotos der Montage von Kabelkanälen, Leistungsoptimierer und Wechselrichter

Je nach Größe der Wand sind weitere Komponenten zur elektrischen Systemanbindung notwendig bzw. richtet sich dies nach den gängigen Normen (VDE ARN-4105 für die Niederspannung und der VDE ARN4110 für die Mittelspannung), dem EEG und den technischen Anschlussbedingungen des jeweiligen Netzbetreibers. Bei größeren Systemen/Wänden sind neben den Komponenten der aufgezeigten kleineren Systeme üblicherweise noch folgende Komponenten erforderlich:

- Netz- und Anlagenschutz: >30 kWp
- Rundsteuerempfänger: > 30 kWp
- Vorrichtung für Direktvermarktung (Fernsteuerung) >100 kWp
- Fernwirkanlage (USV-gepuffert) mit Erfassung der Ist-Leistung am NAP: je nach Netzbetreiber ab 120 (125) kWp
  - NSHV für PV: ab ca. 100 kWp
- Trafo- und Übergabestation: ab Mittelspannung, bzw. ungefähr 200-400 kW (Bei Lärmschutzwänden eher bei geringeren Leistungen, weil an Autobahnen und Landstraßen oft kein Niederspannungsanschluss zur Verfügung steht.)

Darüber hinaus ist ab einer gewissen Leistungsgröße (ab 500 kWp Leistung und 270kW Rückspeiseleistung ein Anlagenzertifikat Typ B und ab 950 kW ein Anlagenzertifikat Typ A erforderlich.

Technisch ändert sich an der Systemanbindung hierdurch nichts. Allerdings sind die Kosten für das Zertifikat, die Konformitätserstellung (Zertifikat Typ A) und der administrative und zeitliche Aufwand für derartig kleine Anlagen erheblich. Diese Regelung wurde u.a. deswegen kürzlich durch das Solarpaket I modifiziert bzw. lag die ursprüngliche Grenze bereits bei 135 kWp, was für einige der hier in Frage kommenden Wandlängen eine Vereinfachung bringen dürfte.

Die meisten Lärmschutzwände sind mit einer vergleichsweise kleinen Leistung und fehlendem Netzzanschluss (Niederspannung zu weit weg) oder der Notwendigkeit einer Trafostation aus wirtschaftlicher Sicht kritisch zu bewerten, weil letztlich die Errichtung einer Trafostation und/oder Übergabestation mit allen notwendigen Einbauten teurer ist als die gesamte PV-Installation. Bei kleinen und mittelgroßen Wandsystemen ist also darauf zu achten, dass diese noch in der Niederspannung nach VDE ARN1405 errichtet werden dürfen. Natürlich sind diese wirtschaftlichen Abwägungen im Zusammenhang mit dem Betriebsmodell zu sehen, so dass hier insbesondere reine Rückspeiseanlagen noch problematischer zu sehen sind als Wände, die für die Eigenstromnutzung zum Einsatz kommen.

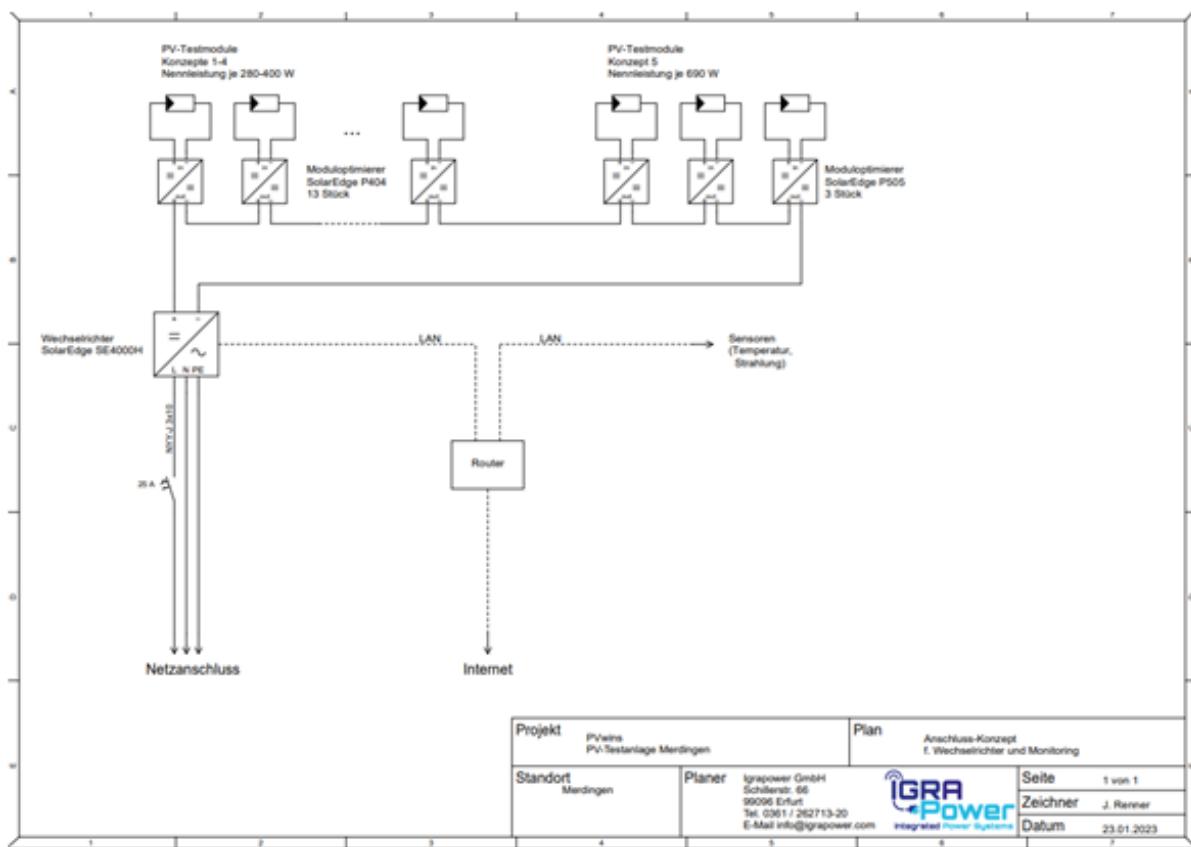


Abbildung 62: Stromlaufplan und Anschlusskonzept Lärmschutzwand Merdingen

Herausfordernd ist sowohl bei zentralen als auch dezentralen Wechselrichterkonzepten die Kabelführung bzw. müssen die Kabel geschützt und dauerhaft sicher entsprechend der gültigen Normen verlegt werden. Bei den Nachrüstvarianten empfiehlt sich eine Kabelführung entlang der Aufsatzgestelle (Unterkonstruktion), wobei bei größeren Kabelquerschnitten bereits die Statik kritisch wird bzw. dann zusätzliche Kabeltragsysteme (Pritschen, Leitungsführungskanäle) installiert werden müssen. Bei allen ebenfalls ausgiebig betrachteten Lösungen, bei denen die Solarmodule in die Wand integriert werden, müssen fast immer die Stützen und/oder übrigen Absorptionskörper der Wand mit in die Kabelführung einbezogen werden, um diese nicht lose an den Außenwänden führen zu müssen. Die Projektierungen haben gezeigt, dass dies je nach Integrationslösung mit vertretbarem Zusatzaufwand in einer qualitativ optisch sehr guten Qualität umsetzbar sind.

Allerdings sollte dieser Aspekt unbedingt sehr frühzeitig in die Planungsphase einer derartigen PV-Wand berücksichtigt werden. Andernfalls fallen erhebliche zusätzliche Kosten für Befestigungen wie Bohrungen, Nieten etc. und auch Problemstellungen hinsichtlich der Gewährleistungüberschneidung bzw. dem Gewährleistungseingriff der Gewerke an.

Zu diskutieren wäre, ob man bei echten Wandsystemen ggf. auf geschlossene Kabeltragsysteme verzichtet bzw. die Kabel bspw. an C-Schienen mit Bügelschellen befestigt. Die Kabel als auch die Befestigungssysteme sind ohnehin witterbeständig, so dass der Aufbau preisgünstiger ist und Beschädigungen bei Reparaturen geringer wären (ähnlich wird es hin und wieder bei PV-Anlagen auf industriellen Dächern gehandhabt). Letztlich ist das eine Frage hinsichtlich der optischen Wirkung im öffentlichen Raum.

### MS 6.5 Auswertungen der Ertragsmessungen

Die Erträge von Nachrüst-Anlagen und Integration von herkömmlichen Solarmodulen als Vertikalwand sind hinreichend bekannt und auch wie oben aufgeführt hinreichend prognostizierbar.

Tabelle 22: Spezifikationen der einzelnen Module

Name	Wp / Modul	Modul-fläche	Anzahl Module Aufbau Merdingen	Wp / m	Modulfläche/ Wand	kWh/kWp/a erwartet [19]
Kombination	439,5	3,65	3	329,6	11,0	520
Kassetten	240	1,67	3	180,0	5,0	1110
Integriert	405	1,90	2	202,5	3,8	780
MPA	444	3,65	3	333,0	11,0	800
Aufsatz Ost/West	405	2,00	2	202,5	4,0	930

In der weiteren Analyse werden die gemessenen Stromerträge der verschiedenen Varianten zusammengefasst. Da die Inbetriebnahme erst am 13.06.2024 erfolgte, bezieht sich der Auswertungszeitraum der Datenerhebung auf 13.06.2024 - 15.11.2024. Üblicherweise werden Erträge als normierte Größen, z.B. bezogen auf kWp pro Jahr ermittelt. Dies ist aufgrund des kürzeren Zeitraums nicht möglich, wird aber im Nachgang des Projekts noch intern betrachtet.

In Abbildung 63 ist die Zuordnung der Moduloptimierer zu den einzelnen Modulen gezeigt, damit die ausgewählten Tageskurven in Abbildung 64 besser nachvollzogen werden können.



Abbildung 63: Zuordnung der Optimierer und Module

Die typgleichen Solarmodule haben in der Regel mehr oder weniger identisch verlaufende Ertragskurven, d.h. die Position der 2 bzw. 3 gleichartigen Module spielt keine Rolle. Dies ist dadurch begründet, dass es aufgrund der Ost-West – Orientierung keine wesentlichen Verschattungsunterschiede entlang der Wand gibt. Ebenfalls verhalten sich die Erträge unabhängig von der Montagehöhe an der Wand. Das kann durch die verschmutzungsarme Testflächenumgebung erklärt werden bzw. wäre es interessant zu messen,

inwieweit bei stark befahrenen Straßen die unten positionierten Module schneller und stärker verschmutzen.

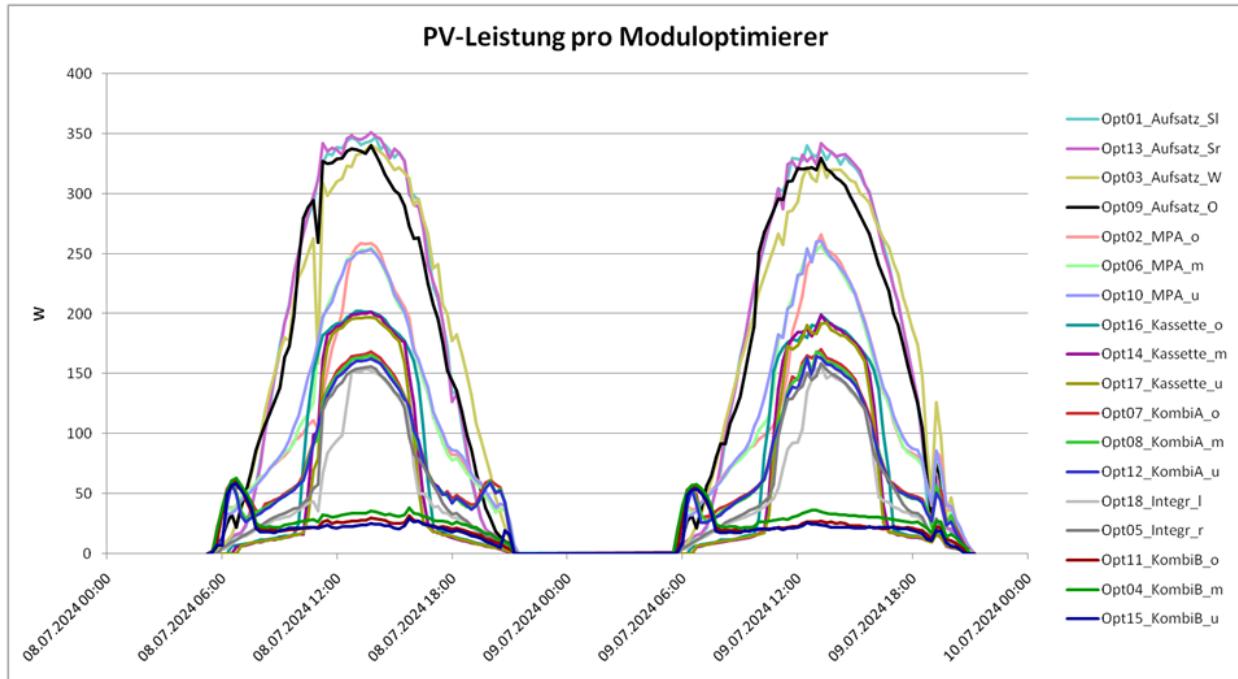


Abbildung 64: Leistung der einzelnen PV-Module, Sonnige Tage (8.-9. Juli 2024)

Zwischen Ost- und West-Aufsatz gibt es erwartungsgemäß eine leichte Verschiebung der Kurven bzw. wird das Tages-Maximum bei der Ostausrichtung etwas früher erreicht als bei der West-Ausrichtung. Das Teilmódul KombiB schneidet erheblich schlechter ab als alle anderen, was auf die nördlich orientierten Flächen zurückzuführen ist. Dies war so erwartet worden und wurde dennoch angegangen, um noch etwas mehr Extraleistung herauszuholen und die Albedostrahlung nach Norden durch die Module zu erfassen. Für die beiden ausgewählten Tage in Abbildung 64 ist die Zusatzleistung der rückseitigen Zellstrings im Kombinationsmodul bei ungefähr 25 bis 30 W über den Tag, jedoch gibt es einen morgendlichen Peak auf über 50 W, da die Sonne zu dieser Zeit noch leicht nördlich über der Ost-West Achse steht.

In den folgenden Auswertungen sind die typgleichen Module jeweils zusammengefasst, d.h. die Erträge der 2 bzw. 3 Module desselben Typs wurden zu einem gemeinsamen Datenpunkt addiert.

Im Sommer haben die Aufsatz-Typen den höchsten flächenspezifischen Ertrag. Dies verhält sich also wie in den Ertragsprognosen vorhergesagt und es gibt wegen der günstigen Orientierung zur Sonnenstrahl-Richtung zwischen Süd-Orientierung und Ost-West-Orientierung kaum einen Unterschied beim spezifischen Ertrag.

Die Kassetten sollten theoretisch Erträge in ähnlicher Größenordnung liefern, weil sie ebenfalls mit 30° Neigung nach Süden orientiert sind; tatsächlich sind dort die Erträge aber merklich geringer. Die genauen Ursachen müssen noch getestet werden. Vermutlich wird die obere lange Kante der Module doch häufiger verschattet als angenommen, wodurch sich der Strom und damit der Ertrag merklich reduziert. Des Weiteren könnte sich Staub auf der satinierten Oberfläche besser festsetzen und so weniger Licht durchlassen.

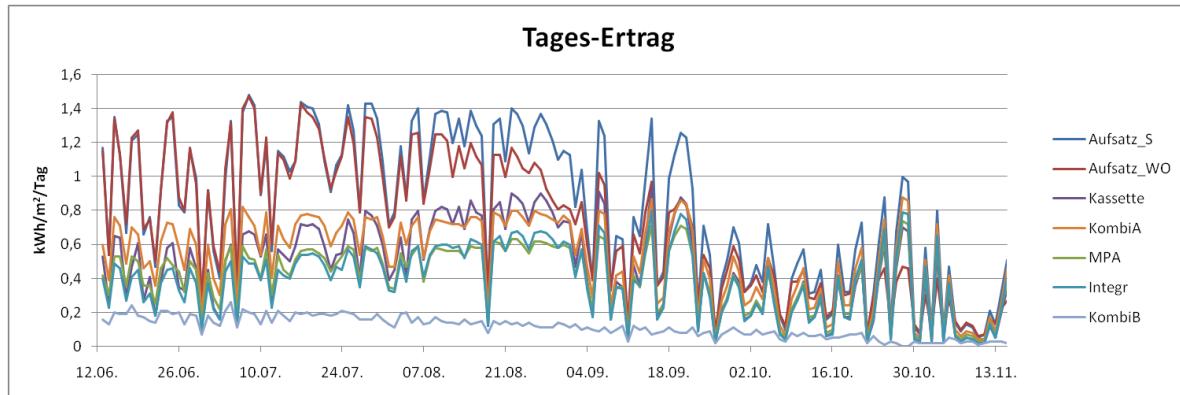


Abbildung 65: Tages-Ertrag der verschiedenen Modul-Typen, normiert auf Modulfläche

Die vertikalen Wände mit Süd-Richtung (MPA-Module, integrierte Module, KombiA) sind untereinander sehr ähnlich. Bei der KombiB, d.h. vertikal Nord-Ausrichtung, ist der Ertrag derart gering, dass eine wirtschaftliche Nutzung zweifelhaft ist. Positiv überrascht die MPA-Lösung bzw. war hier die Befürchtung, dass die Vielzahl an Löchern bei schrägem Lichteinfall ggf. zu einem erheblichen Minderertrag im Vergleich zu vertikalen Solarmodulen führt. Hier würde es sich anbieten die Schallabsorption durch eine Modifikation der Löcher weiter zu optimieren und nach Möglichkeiten für eine skalierbare/kosteneffiziente Fertigung zu forschen bzw. hat die MPA-Lösung ggf. mehr Potential als ursprünglich angenommen.

Zum Herbst nähern sich die Kurven aufgrund des niedrigen Sonnenstands und den häufig diffusen Lichtverhältnissen großenteils an, d.h. zwischen den Aufsatz-Lösungen und der vertikalen Süd-Orientierung gibt es dann kaum noch einen Unterschied.

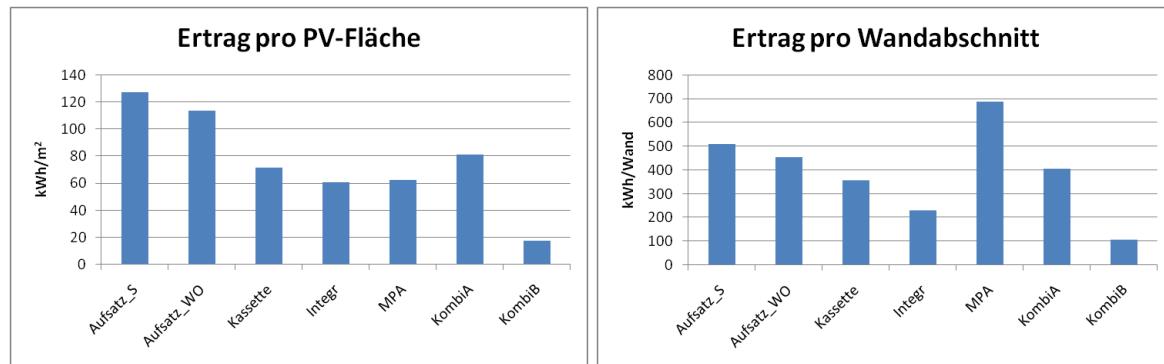


Abbildung 66: Gesamtertrag der verschiedenen Modul-Typen im begrenzten Zeitraum 13.6.-15.11.2023

Bei Normierung auf die PV-Fläche sind die Aufsatzlösungen erwartungsgemäß die Spitzenreiter. Bei Normierung auf den Wandabschnitt ist der MPA-Typ ideal, weil hier die gesamte Wandfläche in voller Höhe verwendet wurde. Allerdings ist, wie bereits gemessen, immerhin eine hinreichende Schallabsorption notwendig (siehe MS 7.3 Auswertung der akustischen in-situ Messungen). Der gute Ertrag der Aufsatzlösungen unterstreicht das Potential für die entwickelten Nachrüstlösungen für bestehende Schallschutzwände. Bei der Kassettenlösung und den Integrationsvarianten sind die bereits bekannten Kosten im Vergleich zu dem niedrigeren Ertrag kritisch zu bewerten. D.h. hier wäre es notwendig die Kosten weiter zu reduzieren bzw. durch Skaleneffekte zu verringern, um bei geringerem Ertrag und eingeschränkter Wandabsorption (im Vergleich zu einer reiner Schallschutzwand) die Mehrkosten wirtschaftlich tragbar zu entwickeln.

## 2.1.7 AP 7 Prototypenaufbau- und Erprobung

In diesem AP sollten die PV-Lärmschutzelemente entweder als Teil eines laufenden Lärmschutzbauvorhabens oder auf dem Referenzareal (duraBAST) der BASt mit Elementen von Kohlhauer aufgebaut und getestet werden. Igrapower stellte die PV-Systemtechnik bis zum Netzanschluss zur Verfügung. Als Administrator des Wechselrichters stellte Igrapower die Messdaten zur Verfügung und wertete die Daten mit Beihilfe vom ISE aus. Der Aufbau des Demonstrators wurde durch das Fraunhofer ISE und unterbeauftragte Unternehmen durchgeführt. Die Akustikmessungen wurden durch die BASt erledigt.

### AP 7.1 Erprobung von kleinformatigen Prototypen

In diesem AP wurden die PV-Lärmschutzwandkonzepte in einem kleinem Maßstab in Prüflaboren (Müller BBM), bei der BASt und im Impedanzrohr des Fraunhofer ISE auf deren Schallwirkung getestet und analysiert.

### AP 7.2 Aufbau und Installation einer PV-aktiven Lärmschutzwand

Um in-situ Akustikmessungen durchführen zu können, wurden die ausgewählten PV-Lärmschutzwandsysteme in einer Demonstratorwand installiert. Ursprünglich war die Idee, die entwickelten Konzepte in die Testlärmschutzwand auf dem Gelände der Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch Gladbach einzubauen. Im Zuge des Projekts stellte sich jedoch heraus, dass der Standort dort nicht gut für Solarmodule geeignet ist, da die Ausrichtung der Wand nicht Richtung Süden liegt und Verschattung durch Bäume auftritt. Zudem wäre die Logistik und das Handling für den Aufbau dort mit zu großem Aufwand verbunden gewesen und die Möglichkeiten der Erfassung von Wetterdaten wäre beschränkt gewesen. Daher wurde ein alternativer Standort in der Nähe vom Fraunhofer ISE in Freiburg gesucht. Zwischenzeitlich konnte das Fraunhofer ISE ein neues Solartestfeld mit ca. 3 ha Fläche, einer modernen Wettermessstation und Messcontainern in Merdingen nahe Freiburg eröffnen. Dieses Testfeld bot sich daher als idealer Standort an, um eine Testlärmschutzwand zu errichten. Durch diese Änderung und Verzögerungen bei Planung, Gutachten und Vergabe der Bauleistungen konnte der ursprüngliche Zeitplan nicht gehalten werden und das Projekt musste kostenneutral verlängert werden.

Die installierten Solarmodule wurden dabei elektrisch angeschlossen durch Igrapower und das ISE.

Ursprünglich sollte das ISE die Koordination und Überwachung der Aufgaben übernehmen. Durch den geänderten Demonstratorstandort wurde jedoch auch die Planung des Demonstrators, Baumaßnahme und mechanische Installation der PV-Elemente im Wesentlichen durch das ISE beauftragt und durchgeführt.

### AP 7.3 Testdurchführung und Überwachung der Testanlage

Die Akustikmessungen wurden im Unterauftrag durch die Akustikexperten der BASt durchgeführt. Dabei wurde die Schallschutzwirkung in einem zusätzlichen Bericht der BASt analysiert.

Das Monitoring der Module individuell in ihrem Maximum Power Point (MPP) wurde technisch durch Moduloptimierer realisiert. Aufgrund des Systemdesigns wurde daher nur der MPP über die Zeit gemessen, nicht jedoch kontinuierliche IV-Kennlinienmessungen wie im Projektantrag beschrieben. Diese wären bei der Vielzahl unterschiedlicher Varianten und dem verfügbaren Budget nicht möglich gewesen und hätten keinen ausreichenden Zusatznutzen gehabt.

Tabelle 23: Meilensteine AP 7

Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis
<b>MS 7.1</b> Prototyp auf Testgelände aufgebaut	Demonstratorwand auf ISE-Solartestfeld in Merdingen errichtet
<b>MS 7.2</b> Installation des Monitorings und der simulierten Netzanbindung	Monitoring durch Moduloptimierer, reale Netzanbindung
<b>MS 7.3</b> Auswertung der in-situ Tests	Auswertung durch BASt erfolgt

### MS 7.1 Aufbau Demonstrator Lärmschutzwand

Die Demonstrator Lärmschutzwand wurde auf dem Solartestfeld in Merdingen auf eine noch weitläufig freie Stelle auf dem nordwestlichsten Teil des Testfelds festgelegt. Die Ausrichtung der Module liegt dabei nach Süden. Die Lärmschutzwand für PVwins besteht aus fünf HEB 160 Pfosten mit 4,5m Höhe, welche mit einem Zwischenabstand von 4 m montiert sind. Für ein weiteres Projekt wurde die Lärmschutzwand im Zuge der Bautätigkeit noch um zwei weitere Pfosten erweitert. Für die Fundamente wurden verschiedene Optionen evaluiert. Anstatt der häufig an der Straße eingesetzten Rammfundamente wurden Fertigbetonplatten mit einer Grundfläche von 2,5 m x 1,5 m verbaut, auf welche die H-Pfosten auf Sockelplatten mit speziellen Ankern montiert wurden. Vor dem Bau wurde basierend auf einem Bodengutachten ein Statikgutachten beauftragt.

Da das Testfeld außer an einigen Zugangswegen größtenteils Wiese ist, wurde um die Lärmschutzwand herum eine ausreichend befestigte Schotterfläche als Weg gebaut. Ohne diesen würde die Lärmschutzwand durch hohes Gras zuwachsen und wäre in der Bauphase im Schlamm versunken. Die Anbindung des Stromanschlusses und Netzwerkanschlusses des Wechselrichters ist über ein unterirdisch verlegtes Leerrohr vom zweiten Pfosten im Osten zum ca. 20 m entfernten Messcontainer realisiert. Die Pfosten sind über einen Ringerder um die Fundamente herum zwecks Potenzialausgleich miteinander auf Massepotenzial verbunden. In Abbildung 67 sind Fotos aus der Bauphase gezeigt.

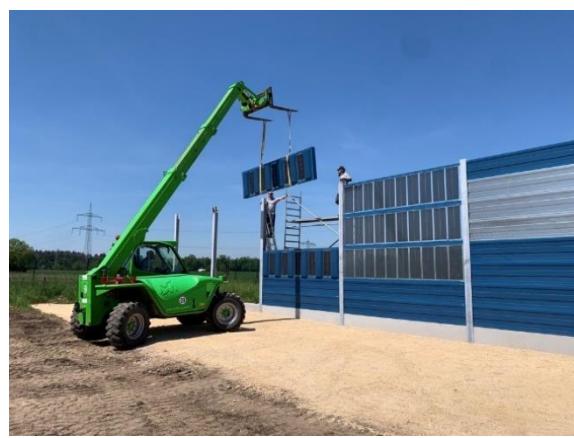


Abbildung 67: Fotos vom Bau der Lärmschutzwand in Merdingen

Nach Fertigstellung der Basiswand und der Wege um die Wand herum wurden die PV-Elemente und Absorberelemente mit einem Teleskoplader eingesetzt. Anfänglich wurden die beiden rechten Segmente mit vollflächig absorbierenden Elementen (Kohlhauer Alumna) gefüllt, um eine akustische Referenzmessung an Standard-Absorberelementen durchzuführen. Nach der ersten Messreihe durch die BASt wurden die beiden rechten Segmente nochmal umgebaut und die Konzepte 7, 8 und 9 montiert. Die fertiggestellte Lärmschutzwand ist in Abbildung 68 dargestellt.



Abbildung 68: Fertiggestellter Demonstrator PV-Lärmschutzwand PVwins

Wie in Abbildung 68 zu sehen ist, wurden beim fertiggestellten Demonstrator innerhalb von vier Segmenten sechs verschiedene PV-Installationen eingebaut, wobei sich die Aufsätze nur in der Ausrichtung Süd und Ost/West unterscheiden. Ziel war es, möglichst viele der entwickelten Konzepte auf der verfügbaren Länge zu erproben. Die Anordnung wurde dabei so gewählt, dass sich die Konzepte möglichst wenig durch Verschattung beeinflussen. Im Anhang befinden sich weitere Fotos, auf denen die Details der verschiedenen Varianten besser hervorgehen.

## MS 7.2 Netzanbindung und Monitoring

Die Fotos zeigen die Ausführung der elektrischen Systemanbindung an der Musterwand in Merdingen. Die Optimierer für Aufsatzlösungen wurden direkt an die längs verlaufenden Träger (Unterkonstruktion) montiert. Für den Wechselrichter und die verwendeten vertikalen Kabelkanäle wurden die H-Pfosten bereits während der Fertigung vor der Beschichtung mit entsprechenden Bohrungen versehen, um diese nachträglich nicht beschädigen zu müssen. (Ähnlich sollte es bei Großanlagen projektiert werden, um keine Vermischung von Gewerken und Probleme mit der Gewährleistung zu erzeugen). Die Optimierer der Kassettenlösung wurden an den Tragschienen an der Wand montiert (hinter den Kassetten). Die Optimierer aller übrigen Varianten bzw. der wandintegrierten Varianten wurden in den vertikalen Kabelkanälen positioniert, welche für eine hinreichende Wärmeabfuhr unten und oben unverschlossen sind. Die Stringverkabelung erfolgte oberhalb der Wand an der Unterkonstruktion der Aufsatzmodule und in einem Fall auf der Wand selbst. Ansonsten wurden die vertikalen Kabelkanäle verwendet. Die Kabel der integrierten Module wurden bereits bei der Produktion mit in die Rahmen integriert und mit abdichtenden Kabelverschraubungen herausgeführt. Die Stringverschaltung wurde hergestellt, indem die einzelnen Module via Stoßverbinder und teilweise Verlängerungen an die Koppelleitung angeschlossen wurden. Bei Großanlagen wäre hier ein steckerfertiges System (MC4-Stecker) zu bevorzugen, wobei dies so zu designen ist, dass nach Möglichkeit die Kabel so liegen, dass keinerlei nachträgliche Kabelführung mit Kabelbindern oder ähnlichem erforderlich ist. Auch hier gilt, dass die Einarbeitung von Kabeln in ein Modul bzw. einem Modulrahmen vom Aufwand problemlos ist, sofern es frühzeitig berücksichtigt und gewissenhaft geplant wird. Derweil Projekte dieser Art oft über Ausschreibungen qualitativ minderwertiger Qualität erfolgen, sollte man diesem Aspekt daher erhöhte Aufmerksamkeit widmen. Die weitere Anbindung der Anlage erfolgte klassisch via Erdkabel und Absicherung. Ebenfalls berücksichtigt wurde der Potentialausgleich. Bei kommerziellen Anlagen und der Verwendung neuartiger Systeme sollte hier darauf geachtet werden, dass zwischen den Tragsystemen und der Wand jeweils eine elektrische Verbindung hergestellt wird, also nicht bspw. eine Lackierung die Durchkontaktierung verhindert. Ebenfalls verlegt wurde ein geeignetes Kommunikationskabel.

Wichtig für die Zuordnung der Erträge und vor allem beim Finden von havarierten Modulen ist die eindeutige Zuordnung der Optimierer. Dies erfolgte bei der Musterwand über einen QR-Code auf den Optimierern und dem Einlesen per App. Bei großen Anlagen sollte dies ähnlich bzw. nach Möglichkeit vollständig digital durchgeführt werden. Die Konfiguration des Wechselrichters erfolgte in Merdingen ebenfalls per Smartphone App und nachträglicher Konfiguration über das Web-Portal. Bei größeren

Anlagen sind hier unter Umständen aufwendigere Systeme wie unter anderem noch der Netzschatz und die Abschalteinrichtungen zu parametrieren.

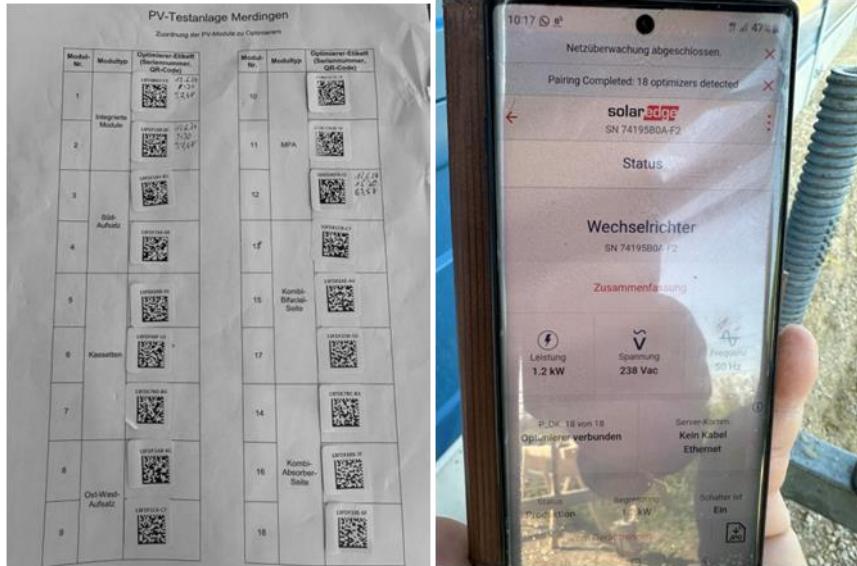


Abbildung 69: Abbildung links zeigt die QR-Codes der montierten Optimierer, rechts zeigt einen Screenshot der Visualisierung der Wechselrichter-Inbetriebnahme

### MS 7.3 Auswertung der akustischen in-situ Messungen

#### Einleitung und Messmethode

Die akustischen Eigenschaften der vier Segmente des Lärmschutzwand-Demonstrators in Merdingen wurden durch die Bundesanstalt für Straßenwesen untersucht. Es wurden akustische In-situ-Messungen nach der sogenannten Adrienne-Methode durchgeführt, um zum einen die Schallreflexion gemäß DIN EN 1793-5 [12] und zum anderen die Luftschalldämmung gemäß DIN EN 1793-6 [20] zu ermitteln. Konkret wird im ersten Fall der sogenannte Schallreflexionsindex, im letzteren Fall der Schalldämmungsindex bestimmt.

Das **allgemeine Prinzip** der Messungen nach DIN EN 1793-5 und -6 lässt sich wie folgt beschreiben: Eine Schallquelle emittiert eine gerichtete, impulsartige Kugelschallwelle in Richtung der zu prüfenden Lärmschutzwand (LSW). Hier wird sie teilweise an der Oberfläche reflektiert, teilweise vom Material absorbiert und zu einem geringen Teil tritt sie durch die LSW hindurch. Zusätzlich wird die Schallwelle an der Wandoberkante gebeugt.

Ein Messgitter bestehend aus  $3 \times 3$  Mikrofonen ist im Falle der **Schallreflexions-Messung** zwischen LSW und Schallquelle positioniert und empfängt sowohl die zur LSW laufende direkte Schallwelle als auch die an der LSW reflektierte Schallwelle (s. Abbildung 70). Zur messtechnischen Bestimmung des Schallreflexionsindex sind jeweils zwei Messungen durchzuführen, eine Messung mit LSW und eine Messung ohne LSW (Freifeld-Messung). Aus der Messung mit LSW wird eine Impulsantwort berechnet, die eine direkte Komponente, eine an der Vorderseite der LSW reflektierte Komponente sowie weitere von der Umgebung reflektierte Anteile beinhaltet. Die Freifeld-Messung liefert die Impulsantwort, die nur die direkte Komponente beinhaltet, so dass sich schließlich der Schallreflexionsindex (und daraus der spektrale Schallabsorptionsgrad) der betrachteten LSW aus der Differenz der beiden Impulsantworten (reflektierte Komponente und direkte Komponente) ermitteln lässt. Die Umgebungseinflüsse können rechnerisch durch Anwendung eines Zeitfensters auf das Signal ausgeschlossen werden.

Im Falle der **Messung der Luftschalldämmung** ist das Messgitter hinter der LSW positioniert und empfängt entsprechend die von der Schallquelle durch die Wand hindurchtretende als auch die über die Oberkante gebeugte Schallwelle (s. Abbildung 71). Auch hier sind zur Bestimmung des Schalldämmungsindex eine Messung mit LSW und eine Freifeld-Messung ohne LSW durchzuführen. Aus der Freifeld-Messung kann eine Impulsantwort berechnet werden, die nur den direkten Schalleinfall beinhaltet. Die Impulsantwort aus der Messung mit LSW besteht aus der transmittierten Komponente sowie Anteilen aus umgebungsbedingten Reflexionen und der Beugung über die Oberkante der LSW. Diese Anteile lassen sich durch Anwendung eines Zeitfensters aus dem Signal entfernen, so dass nur die transmittierte Komponente verbleibt. Schließlich lässt sich der Schalldämmungsindex der zu charakterisierenden LSW durch Auswertung der beiden berechneten Impulsantworten ermitteln.

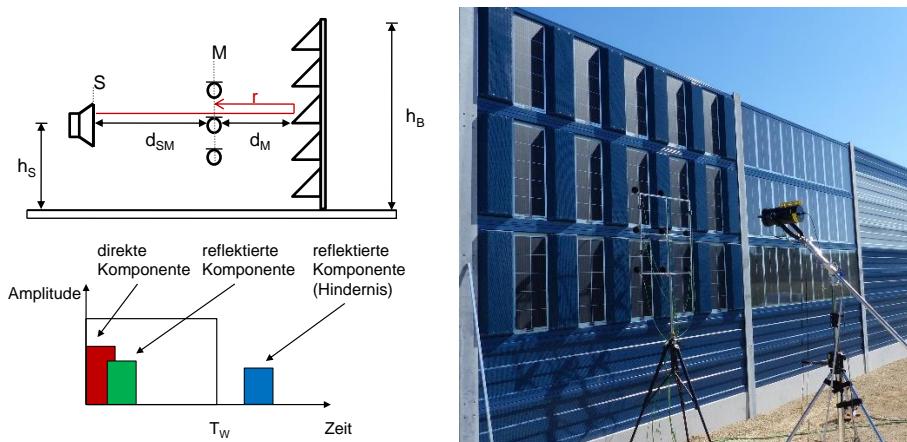


Abbildung 70: (links) Schematische Darstellung der Messung (Aufbau sowie Komponenten der Impulsantwort) des Schallreflexionsindex nach DIN EN 1793-5 an einer Lärmschutzwand (Bild: AED [21]; (rechts) Messung am Demonstrator-Segment mit Kombinationslösung (Bild: BASt)

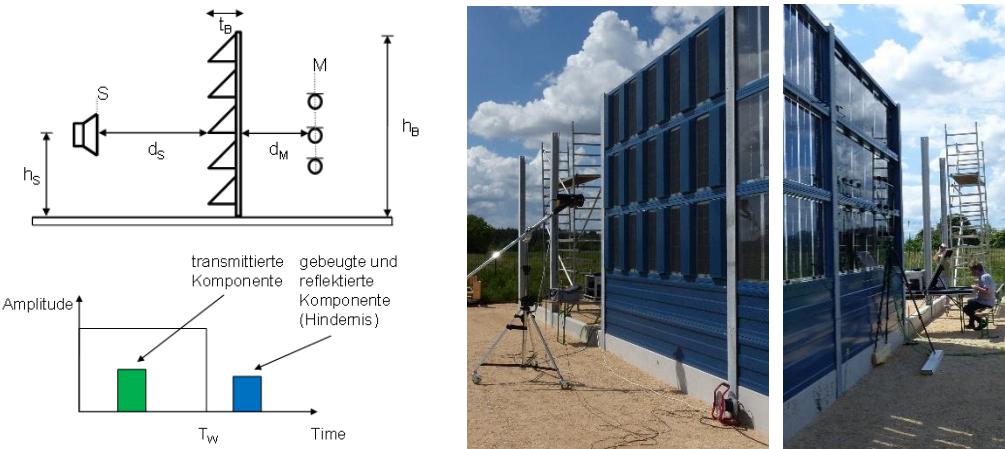


Abbildung 71: (links) Schematische Darstellung der Messung (Aufbau sowie Komponenten der Impulsantwort) des Luftschalldämmungsindex nach DIN EN 1793-6 an einer Lärmschutzwand (Bild: AED; [21]); (rechts) Messung am Segment (Vorder- und Rückseite) mit Kombinationslösung (Bild: BASt)

Die Nutzung eines gerichteten Schallfeldes (im Gegensatz zum diffusen Schallfeld, das beim Hallraumverfahren gemäß DIN EN 1793-1 zum Einsatz kommt) stellt sicher, dass die Messergebnisse repräsentativ für die akustische Situation an der Straße sind und die akustischen intrinsischen Eigenschaften einer LSW realistisch abbilden. Das Verfahren ist zudem für In-situ-Messungen konzipiert, so dass Messungen (bereits installierter LSW) direkt an der Straße möglich sind. Auf eine detailliertere Beschreibung der Prüfung nach DIN EN 1793-5 und -6 wird an dieser Stelle verzichtet. Für eine vollständige Beschreibung sei auf die veröffentlichten Normen verwiesen.

### Messdurchführung

In einem ersten Schritt ist für die Auswahl der Messpunkte auf den LSW-Segmenten festzustellen, ob eine horizontale oder vertikale Unebenheit der Prüfoberfläche bzw. Inhomogenität im Aufbau der Wandelemente gemäß DIN EN 1793-5 besteht. Gemäß Norm gilt: Ein Wandelement ist **uneben**, wenn die Tiefe der Oberflächenstruktur mindestens 85 mm beträgt. Im anderen Falle ist es eben. Ein Wandelement ist **nichthomogen**, wenn es aus unterschiedlichen akustischen Materialien besteht deren Breite jeweils mindestens 85 mm beträgt. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, ist es homogen.

Die **Referenz-Lärmschutzwand** KOHLHAUER ALUMNA® ohne installierte PV-Module ist sowohl horizontal als auch vertikal eben und homogen. Bei der **Kombinationslösung** handelt es sich um 1 m hohe Elemente, die in horizontaler Richtung abwechselnd aus einem ca. 5 cm dicken Absorberelement mit einer Tiefe von 5 cm und PV-Elementen bestehen. Die Oberfläche ist somit horizontal als auch vertikal eben und homogen, jedoch horizontal inhomogen mit einer Periodizität von 695 mm. Bei der Ausführung mit **Mikroperforation** handelt es sich um 1 m hohe PV-Elemente, die mit in einer in einem Rahmen gespannten mikroperforierten Folie überdeckt sind. Die Tiefe der Oberflächenstruktur beträgt 10 mm in vertikaler Richtung. Die Rahmen der Einzelelemente sind vertikal 40 mm breit. Das Wandelement ist damit sowohl horizontal als auch vertikal eben und homogen. Die Lösung mit **Dreieckskassetten** wirkt sowohl durch seine Absorberflächen als auch durch die geneigte Geometrie reflexionsmindernd. Die Tiefe der Oberflächenstruktur beträgt über 400 mm in vertikaler Richtung. Das Material ist vertikal abwechselnd absorbierend und reflektierend (PV-Fläche). Die Absorber sind jeweils ca. 650 mm breit, die PV-Flächen jeweils ca. 350 mm. Die Periodenlänge für sowohl Un-ebenheit als auch Inhomogenität beträgt vertikal 999 mm. Das Wandelement ist somit als horizontal eben und homogen, aber vertikal uneben und nichthomogen einzustufen.

Die Messungen fanden an vier Messtagen im Mai und Juni 2024 statt und wurden normgerecht durchgeführt. Wiederholungsmessungen stellen die Reproduzierbarkeit und Belastbarkeit der Messergebnisse sicher.

### Messergebnisse und Auswertung

Wie unter MS 7.1 beschrieben wurden in einem ersten Schritt die beiden rechten Segmente der Demonstrator-Wand mit vollflächig absorbierenden Elementen (Kohlhauer Alumna) gefüllt, um akustische Referenzmessungen an Standard-Absorberelementen durchzuführen. Das Einzahlergebnis der Referenzmessungen für die *Luftschalldämmung* ist  $\mathbf{DL}_{SI,E} = 30$  dB für den Frequenzbereich von 200 Hz bis 5000 Hz. Das Einzahlergebnis für die *Schallreflexion* des Referenzabschnitts beträgt  $\mathbf{DL}_{RI} = 6,2$  dB. Nach Abzug der erweiterten Unsicherheit von 1,3 dB gemäß ZTV Lsw 22 [7] beläuft sich der Reflexionsverlust für die Referenzwand auf gerundet 5 dB und führt damit zur Klassifikation „stark reflexionsmindernd“ nach ZTV Lsw 22.

Die Messergebnisse für die **Kombinationslösung** sind in Abbildung 72 zusammengefasst. Das Einzahlergebnis für die *Luftschalldämmung* liefert den Wert  $\mathbf{DL}_{SI,E} = 32$  dB für Frequenzen zwischen 200 Hz und 5000 Hz. Der gemessene Schalldämmungsindex an der unteren Mikrofonreihe ist höher als an der mittleren und oberen Reihe, was dafür spricht, dass die Dämmung der untersten LSW-Kassette ohne PV höher ausfällt als bei den Elementen mit PV-Anteil. Diese Varianz zwischen den Mikrofonreihen nimmt zudem mit zunehmender Frequenz ab. Dies ist damit zu begründen, dass die von der Quelle „beschallte“ Fläche mit zunehmender Frequenz (abnehmender Wellenlänge) abnimmt und dementsprechend weniger durch die unterste LSW-Kassette transmittierte Anteile in das Ergebnis eingehen. Für die Messung der *Schallreflexion* waren aufgrund der horizontalen Inhomogenität (Wechsel zwischen PV- und Absorberoberfläche) zwei Messpositionen zu betrachten. Befinden sich die linken und rechten Mikrofone vor dem Absorber, zeigen diese eine deutliche Reflexionsminderung zwischen 400 und 1250 Hz, während der Schall zu den mittleren Mikrofonen von dem PV-Element reflektiert wird und der gemessene Reflexionsindex dann 1 beträgt. Befinden sich die vertikal mittleren Mikrofone vor dem Absorber, ist die Reflexionsminderung analog in diesen Mikrofonen erkennbar, während der Schall zu den seitlichen Mikrofonen von dem PV-Element reflektiert wird. Das Einzahlergebnis der Schallreflexion für die Kombinationslösung als Mittelwert aus den beiden Messpositionen ist  $\mathbf{DL}_{RI} = 0,9$  dB.

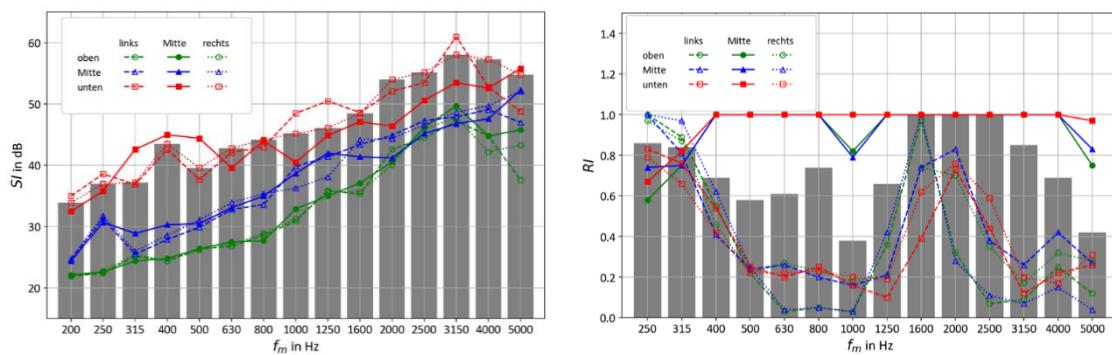
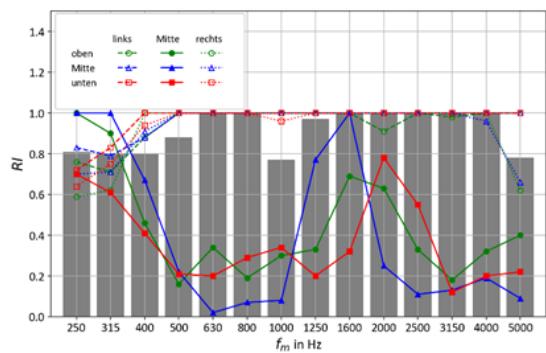


Abbildung 72: Spektrale Ergebnisse der Messungen für die Kombinationslösung, jeweils über alle Mikrofonpositionen gemittelt (Balken) und für die Einzelmikrofone (Linien): (oben links) Luftschalldämmungsindex; (oben rechts) Schallreflexionsindex, vertikal mittlere Mikrofone über PV positioniert; (unten rechts) Schallreflexionsindex, vertikal mittlere Mikrofone über Absorber positioniert .



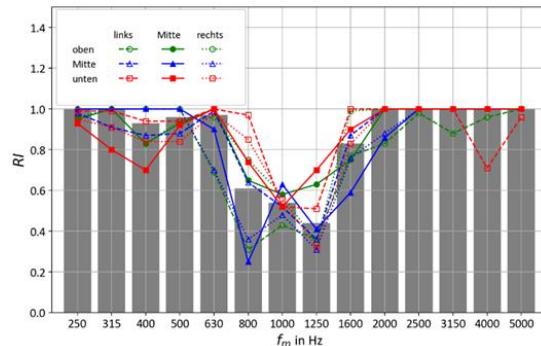


Abbildung 73: Spektrale Ergebnisse der Messungen des Schallreflexionsindex für die Lösung mit Mikroperforation, über alle Mikrofonpositionen gemittelt (Balken) und für die Einzelmikrofone (Linien).

Die Messergebnisse für die *Schallreflexion* für die Variante mit **Mikroperforation** sind in Abbildung 73 dargestellt. Da dieses LSW-Feld homogen und eben in beide Richtungen ist, war gemäß Norm nur eine Messposition zu betrachten. Die Daten zeigen an allen Mikrofonpositionen deutlich, dass die mikroperforierten Absorber zwischen 800 und 1250 Hz wirken. Dieses schmalbandige Verhalten entspricht grundlegend den Ergebnissen der Voruntersuchungen an Probekörpern im Impedanzmessrohr. Im Bereich unter 800 Hz und oberhalb 1250 Hz findet nahezu keine Reflexionsminderung mehr statt. Der Einzahlwert für die Variante mit Mikroperforation ergibt sich in der Folge zu  $DL_{RI} = 1,1 \text{ dB}$  für den Frequenzbereich von 250 Hz bis 5000 Hz. Die gemessene Schalldämmung bei Mikroperforation verhält sich sehr ähnlich zu den Ergebnissen für die Kombinationslösung und wird daher hier nicht explizit gezeigt. Die Abhängigkeiten von der Frequenz und der Mikrofonposition lassen sich hier ebenso beobachten. Als Einzahlwert für die *Luftschalldämmung* zwischen 200 Hz und 5000 Hz erhält man  $DL_{SI,E} = 33 \text{ dB}$ .

Da die **Dreieckskassetten** als Erweiterung für eine bestehende LSW entwickelt und am Demonstrator auf die bekannte Referenzwand aufgebracht wurden, wurde für diese Variante die *Luftschalldämmung* nicht explizit gemessen. Es ist davon auszugehen, dass diese mindestens den Wert der Referenzmessung erreicht. Wie oben beschrieben, ist die Lösung mit Dreieckskassetten als vertikal uneben und inhomogen einzustufen, so dass sich gemäß Norm 4 Messpositionen für die Bestimmung der Schallreflexions-Eigenschaften ergeben (siehe Abbildung 74). Die Ergebnisse der *Schallreflexions-Messungen* sind in Abbildung 75 zusammengefasst.

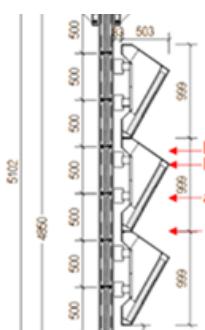


Abbildung 74: Schematische Darstellung der Messpositionen gemäß DIN EN 1793-5 zur Charakterisierung der Schallreflexion an der Variante mit Dreieckskassetten.

Einfallender Schall wird vom Absorber absorbiert oder es findet eine Reflexion an der PV-Oberfläche statt, die aufgrund der Schrägstellung der PV im besten Fall auch zu einer Absorption in der Kassette führt. Andernfalls wird der Schall nach schräg oben „weg“ reflektiert. Diese unterschiedlichen Schallpfade spiegeln sich je nach Position des Mikrofon-Arrays in den Messergebnissen wider: Je nachdem auf welcher Höhe das Mikrofon-Array positioniert ist, erfassen die Mikrofon-Reihen unterschiedliche Anteile an reflektiertem Schall. Diese Positionsabhängigkeit ist vor allem im unteren und mittleren Frequenzbereich, d. h. für längere Wellenlängen, erkennbar. Ab etwa 2000 Hz ist der Reflexionsindex in allen Messungen und an allen Mikrofonen nahezu null. Das stärkste reflexionsmindernde Verhalten wird an Position t (Mikrofone zentriert über der tiefsten Stelle der Dreieckskassette) gemessen, während beispielsweise an

Position p (Mikrofone zentriert über der Mitte des PV-Elementes) um 500 Hz herum Reflexionen von den oberen zwei Mikrofonreihen detektiert werden.

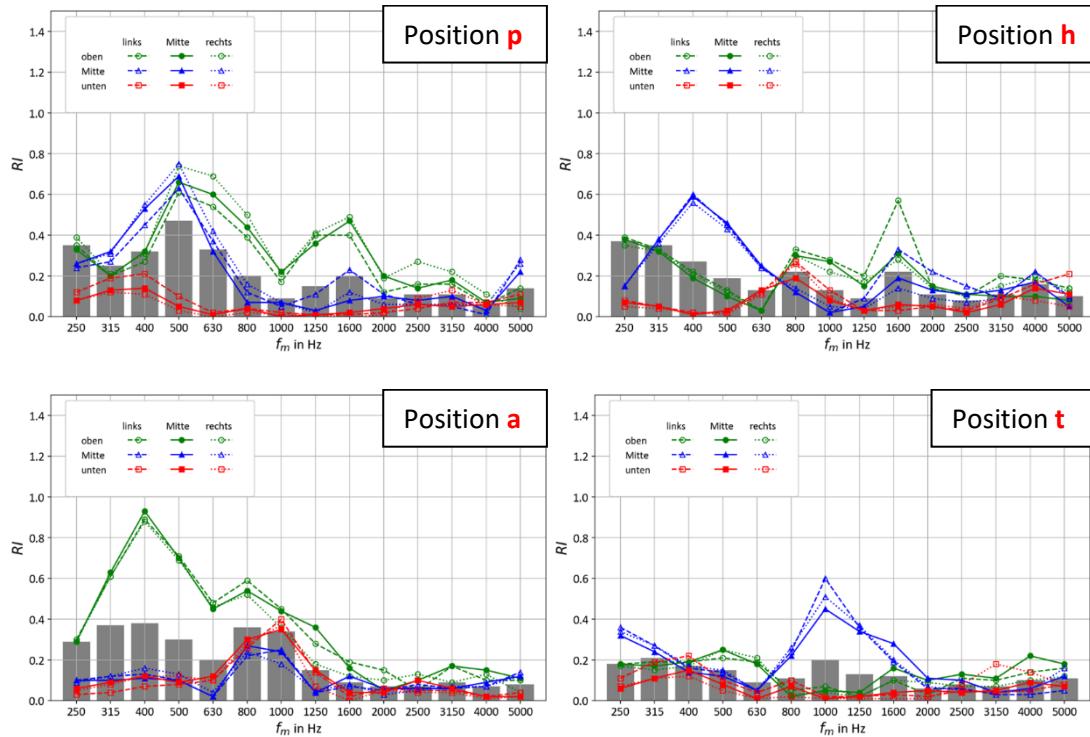


Abbildung 75: Spektrale Ergebnisse der Messungen des Schallreflexionsindex der Messungen für die Dreieckskassettenlösung, jeweils über alle Mikrofonpositionen gemittelt (Balken) und für die Einzelmikrofone (Linien): (oben links) Mikrofone zentriert über der Mitte des PV-Elementes, Position **p** in Abbildung 74; (oben rechts) Mikrofone zentriert über der höchsten Stelle der Dreieckskassette, Position **h** in Abbildung 74; (unten links) Mikrofone zentriert über der Mitte des Absorber-Elementes, Position **a** in Abbildung 74; (unten rechts) Mikrofone zentriert über der tiefsten Stelle der Dreieckskassette, Position **t** in Abbildung 74.

Das Einzahlergebnis der *Schallreflexion* für die Dreieckskassettenlösung als Mittelwert aus den vier Messpositionen ist  $\mathbf{DL}_{RI} = 7,4 \text{ dB}$  für den Frequenzbereich von 250 Hz bis 5000 Hz. Es sei angemerkt, dass im realen Straßenverkehr der einfallende Schall von schräg unten auf die Dreieckskassetten eintreffen würde, d. h. die gewählte Schrägstellung der Absorberflächen als sehr wirksam erachtet werden kann, da die im Messverfahren auftretenden Reflexionen an den PV-Flächen kaum vorkommen und die Absorberflächen dem an kommenden Schall eine große Fläche bieten.

## Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass alle untersuchten Varianten die akustischen Voraussetzungen für die Luftschalldämmung nach ZTV Lsw 22 ( $\mathbf{DL}_{SI,E} \geq 28 \text{ dB}$ ) erfüllen. Hinsichtlich der Schallreflexion sind die Kombinationslösung und die Variante mit Mikroperforation als reflektierend einzustufen, während der Reflexionsverlust bei der Variante mit den Dreieckskassetten nach Abzug der erweiterten Unsicherheit von 1,3 dB gerundet 6 dB beträgt und demnach als stark reflexionsmindernd einzustufen ist.

## 2.1.8 AP 8 Kostenanalyse, Geschäftsmodelle und rechtliche Rahmenbedingungen

In diesem AP ging es um die rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der entwickelten PV-Lärmschutzelemente. Im AP 8.1. wurden die von den einzelnen Partnern betrachteten Herstellungskosten der Komponenten durch Igrapower zusammengetragen und die Gesamtkosten des Systems analysiert. In AP 8.2 wurden durch alle Projektpartner (unterstützt durch EGIS) Geschäftsmodelle von Systemen aus PV-Lärmschutzelementen betrachtet und Vertriebs- und Marketingstrategien diskutiert. Hierbei wurde auch der mögliche Zusatznutzen aus AP 5 mit betrachtet. In AP 8.3 betrachteten die Projektpartner mit Unterstützung durch die BASt und das EBA die bestehenden rechtlichen Vorgaben im Hinblick auf die Ergebnisse aus dem Projekt und entwickelten ggf. Vorschläge zur Überarbeitung. Zusätzlich nutzten alle Partner Zwischenergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Projekt, um Impulse zur Verbesserung der Umsetzbarkeit an politische Entscheidungsträger heranzutragen. Dafür wurden Veröffentlichungen und Treffen auf Fachtagungen sowie bei Gremiensitzungen angestrebt.

### AP 8.1 Gesamtkostenanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die verschiedenen Anwendungsfälle und die untersuchten Aufbauvarianten wurden die Herstellungskosten analysiert, die bei Produktion und Montage der Elemente anfallen, und mit Referenzprodukten verglichen.

### AP 8.2 Geschäftsmodelle und Vermarktungsstrategien

In diesem AP sollten bestehende Geschäftsmodelle und Vermarktungsstrategien optimiert werden, dass die Kundenstruktur optimal bedient werden kann.

### AP 8.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Gremienarbeit

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für PV-Schallschutzprojekte an Straße und Bahn wurden analysiert und mögliche Verbesserungen und Vereinfachungen für Investoren werden mit Unterstützung der Projektpartner vorgeschlagen.

Tabelle 24: Meilensteine AP 8

Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis
<b>MS 8.1</b> Gesamtkostenanalyse erstellt und Wirtschaftlichkeit bewertet	Es wurden zu verschiedenen Zeitpunkten Kostenanalysen durchgeführt. Durch die stark von den technischen Rahmenbedingungen der verschiedenen Konzepte und wirtschaftlichen Umständen über die Zeit ändernden Bedingungen, konnten keine generellen wirtschaftlichen Aussagen getroffen werden.
<b>MS 8.2</b> Geschäftsmodelle und Vermarktungsstrategien entwickelt	Die Firma Kohlhauer hat Lärmschutzwandprodukte und ihre Vermarktung in ihr Tagesgeschäft aufgenommen.
<b>MS 8.3</b> Rechtliche Rahmenbedingungen analysiert und Verbesserungsvorschläge erarbeitet	Im Projekt wurden rechtliche und durch Normen gestellte Hürden betrachtet und vielfach diskutiert. Im Zuge des Projekts wurde auch bei externen Tagungen, Konsortien und Gremien teilgenommen und Erkenntnisse dort eingebracht, um Hürden abzubauen und eine breitere Nutzung von PV an Lärmschutzwänden zu ermöglichen.

## MS 8.1 Gesamtkostenanalyse und Wirtschaftlichkeit

Insbesondere im ersten Jahr des Projekts wurden die Kosten mehrerer Varianten berechnet und anhand verschiedener Vermarktungsoptionen auf Wirtschaftlichkeit analysiert. Dabei waren alle Projektpartner beteiligt und auch die EGIS-Energiegenossenschaft als assoziierter Partner trug durch Beratung und Input dazu bei.

Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen haben sich während der Projektdauer auf der Kostenseite stark verändert, und auch auf der Verkaufsseite bezüglich erzielbarer Einspeisevergütung. Da einige der Kostendaten sensibel sind und zugleich die Kosten immer eine Frage der Skaleneffekte, des Zeitpunkts und sonstiger Umstände eines Einzelprojekts sind, werden in diesem Bericht keine detaillierten Kostenanalysen gezeigt. Es lässt sich jedoch festhalten, während der Projektdauer gab es Phasen, bei denen sich die PV-Komponenten einer Lärmschutzwand amortisieren würden, und andere Phasen, bei denen die erzielbaren Vergütungen das Ganze unwirtschaftlich gemacht hätten.

Nachfolgend werden zunächst die Kostenentwicklungen von PV-Modulen, sowie die durchschnittlichen statistischen Kosten von Lärmschutzwänden betrachtet. Im Anschluss werden die verfügbaren Optionen für die Stromvermarktung diskutiert.

### Kostenentwicklungen von Solarmodulen und Lärmschutzwänden

In Abbildung 76 sind die Nettopreise von PV-Modulen über die letzten 8 Jahre für verschiedene Effizienzklassen an Modulen aufgetragen. Diese Preise spiegeln nicht die Endkundenpreise, sondern die Großhandelspreise wider. Gegen Projektbeginn im April 2020 lagen „Normale“ bzw. „Mainstream“-Module der mittleren Effizienzklasse bei 26 ct/Wp. Es folgte zunächst eine Preissenkung bis auf 21 ct/Wp im Spätsommer 2020, dann kam es jedoch zu stetig steigenden Preisen im Zuge der Covid-19 Gesundheitskrise und damit unter Druck geratenden Lieferketten. Von den 21 ct/Wp stiegen die Preise der mittleren Effizienzklasse bis auf 35 ct/Wp, was einer Erhöhung um 66 % entspricht. Durch den extremen Zubau insbesondere der chinesischen Modulbaukapazitäten und die wieder beruhigten Lieferketten begann ab Ende 2022 ein stetiger Preisverfall, der sich in 2024 teils noch beschleunigte. So sind die Kosten vom Höhepunkt mit 35 ct/Wp auf 10 ct/Wp im November 2024 gesunken, was einem Preisrückgang von ca. 71 % entspricht.

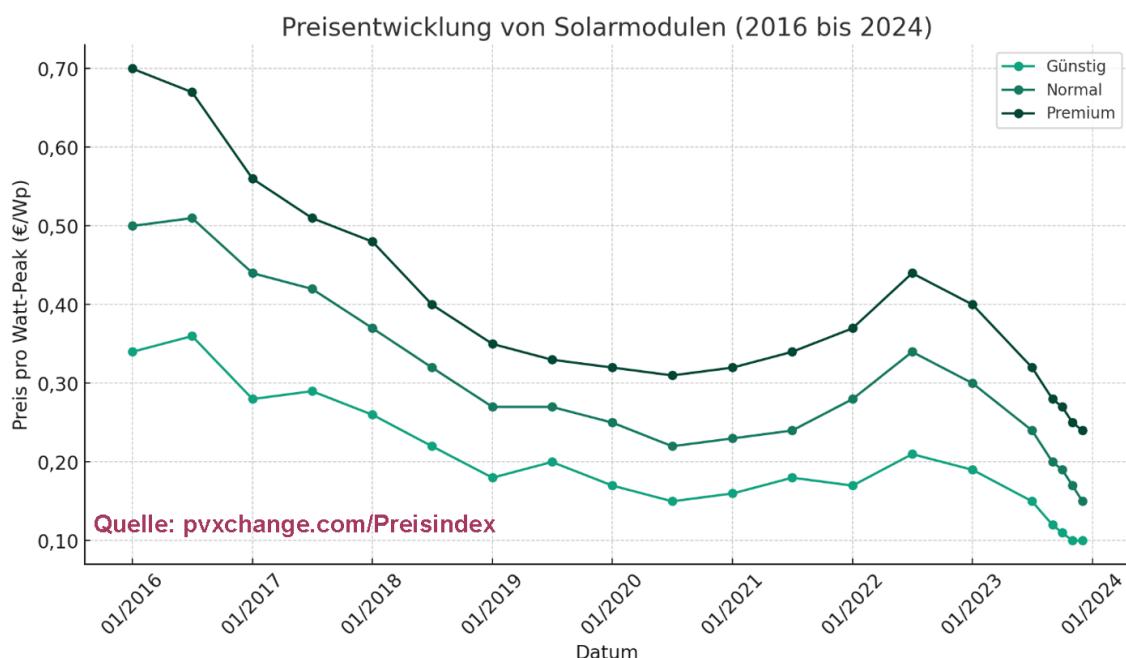


Abbildung 76: Entwicklung der Netto-Modulpreise pro Wp gemäß pvxchange, Quelle der Abbildung: echtsolar.de/preisentwicklung-photovoltaik/

Die hier beschriebene Preisentwicklung der Solarmodule soll zeigen, dass eine Gesamtkostenanalyse als Resultat eines mehrjährigen Forschungsprojekts nur für einen kurzen Moment Aktualität hatte. Zugleich wird der Kostendruck auf die europäische Solarindustrie deutlich. Spezielle Sondermodule mit zusätzlichen Funktionen, wie z.B. Module für Lärmschutzwände sind daher ein potenzieller Markt für höherpreisig verkaufte Module aus Deutschland oder Europa, ohne die unmittelbare Konkurrenz chinesischer Module.

Die Kostenentwicklung über den Durchschnitt aller verbauten Lärmschutzwände ohne Photovoltaik im Zeitraum von 2017 bis 2021 geht aus den Berichten des BMDV zur Statistik des Lärmschutzes hervor [22, 23].

Tabelle 25: Zubau und durchschnittliche Kosten von LSW zwischen 2017 und 2021 gemäß [22, 23]

Jahr	Gesamtlänge Deutschland in km	Jährlich zugebaute Fläche in m <sup>2</sup>	Durchschnittliche Kosten der Gesamterrichtung in €/m <sup>2</sup>
2017	24,13	125.226	431
2018	40,04	180.061	463
2019	41,98	191.218	612
2020	18,46	78.816	524
2021	30,58	150.312	576

### Marktpotenzial

Zwischen 2017 und 2021 wurden insgesamt 725.633 m<sup>2</sup> Lärmschutzwandfläche (inkl. Gabionen) neu zugebaut, natürlich bei zugleich auch abgerissenen alten Lärmschutzwänden. Gemäß [22] liegt der Gesamtbestand an Lärmschutzwänden in 2021 in Deutschland bei 9.603.802 m<sup>2</sup> bzw. 2497 km Länge für Autobahnen und Bundesstraßen. Parallel zum Projekt PVwins war das Fraunhofer ISE in einer durch die BASt beauftragten Potenzialstudie namens „Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen“ involviert, in welchem unter anderem für Lärmschutzwände anhand einer Deutschlandweiten GIS-Analyse die erschließbaren PV-Potenziale mit abgeschätzten Abschlagsfaktoren ermittelt wurden. Hierbei wurde ein erschließbares PV-Potenzial von ca. 465 bis 597 MWp festgestellt, unter der technischen Annahme, dass PV-Aufsätze wie die in PVwins erprobten mit 0,2 kWp/ lfd. m verwendet werden [24]. Das Potenzial scheint im Vergleich zu den gesamten PV-Installationen in Deutschland eher niedrig, ist hier jedoch auch konservativ angenommen, da nur ein Prozentanteil der bestehenden Lärmschutzwände berücksichtigt ist und nur die aktuell installierten und nicht die geplanten Lärmschutzwände betrachtet werden. Die flächenbasierte Abschätzung ist attraktiver, wenn wandintegrierte PV-Elemente angenommen werden, welche die über die Höhe skalierte Fläche besser ausnutzen können. Somit wären mehr als die 0,2 kWp/ lfd. m installierbar. Insgesamt kann beim Potenzial für Lärmschutzwände davon ausgegangen werden, dass das maximal erschließbare Potenzial eher im niedrigen einstelligen GWp Bereich liegt. Sollte der in aktuellen Debatten häufig thematisierte Investitionsstau der Infrastruktur in den nächsten Jahren angegangen werden, wäre zu erwarten, dass in dem Zuge auch viele neue Lärmschutzwände entstehen. Bei immer kleiner werdenden Möglichkeiten für Freiflächenkraftwerken bleiben alternative Lösungen wie Lärmschutzwände weiterhin attraktiv. Des Weiteren wird die Ausstattung von Lärmschutzwänden mit Photovoltaik allgemein in der Bevölkerung als sinnvoll, synergetisch und insgesamt positiv bewertet. Durch die öffentliche Exposition von Lärmschutzwänden kann hierdurch auch die Unterstützung in der Bevölkerung verstärkt werden.

### EEG-Einspeisevergütung

Unter Kapitel 2.1.6 zu MS 6.3 wurden bereits Optionen für den Eigenverbrauch oder Verkauf durch Strom einspeisung als Kategorien aufgezeigt. Nachfolgend werden die Vermarktungsoptionen näher betrachtet.

Für PV-Lärmschutzwände bis zu einer max. installierten Leistung von 100 kWp kann eine feste Einspeisevergütung aus dem EEG bezogen werden. Die Einspeisevergütung zu Projektbeginn im April 2020 ist in Tabelle 26 zu finden, die aktuellen Vergütungssätze (durch Änderungen im EEG heute nach Teileinspeisung und Volleinspeisung unterschieden) in Tabelle 27.

Tabelle 26: EEG-Einspeisevergütung für Gebäude oder Lärmschutzwände nach Teil/Volleinspeisung und installierter Leistung bei Inbetriebnahme ab 01.04.2020 [25]

Inbetriebnahme	Wohngebäude, Lärmschutzwände und Gebäude nach § 48 Absatz 3 EEG		
	bis 10 kWp	bis 40 kWp	bis 100 kWp
ab 01.04.2020 <sup>4</sup>	9,44	9,18	7,21

Tabelle 27: EEG-Einspeisevergütung für Gebäude oder Lärmschutzwände nach Teil/Volleinspeisung und installierter Leistung bei Inbetriebnahme zwischen 1. August 2024 und 31. Januar 2025 [25]

Art der Anlage	Installierte Leistung (kW) bis	Teileinspeisung (ct/kWh)	Volleinspeisung (ct/kWh)
Gebäude oder Lärmschutzwände (§ 48 Abs. 2, 2a EEG 2023)	10	8,03	12,73
	40	6,95	10,68
	100	5,68	10,68

Die beiden Tabellen zu den Einspeisevergütungen zeigen, dass die Einspeisevergütung bei Anlagen bis 100 kWp von ca. 7,21 ct/kWh auf 5,68 ct/kWh für den Fall der Teileinspeisung über die Projektdauer gesunken ist. Für Volleinspeisung haben sich die Werte jedoch auf 10,68 ct/kWh erhöht, um für diese Einspeisevariante mehr Anreize zu bieten.

### Direktvermarktung

Anlagen zur Erzeugung von Erneuerbaren Energien, die ab dem 1. Januar 2016 in Betrieb genommen wurden, müssen ab einer installierten Leistung von 100 kWp ihren Strom direkt über das Marktprämienmodell vermarkten (§ 20 EEG 2021). Die Direktvermarktung wird im Regelfall von einem speziell hierfür beauftragten Dienstleister (Direktvermarkter) durchgeführt, welcher Zugang zur Strombörse hat. Neben der reinen Vermarktung muss die Anlage durch den Direktvermarkter auch fernsteuerbar bzw. abregelbar sein. D.h. es muss parallel zur Fernsteuermöglichkeit des Netzbetreibers eine zweite Schnittstelle über das Internet eingerichtet werden. Neben den Kosten für Hardware und ggf. eine zusätzliche Internetverbindung fallen die Vermarktungskosten an, die anbieterspezifisch unterschiedlich sind. Die Preisentwicklung war hier im Projektzeitlauf sehr dynamisch bzw. lagen die Preise vor der Energiekrise 2022 bei ca. 2 – 6 €/ MWh. Aktuell liegen Sie für Großanlagen bei ca. 3- 8 €/ MWh und bei kleineren Anlagen im Bereich 100 – 500 kWp bei über 10 €/MWh.

Werden Preise oberhalb der theoretischen EEG-Vergütung erzielt, ist dies zum Vorteil des Betreibers. Im Regelfall wird jedoch der anzulegende Wert (siehe EEG) bei der Vermarktung an der Börse (Marktwert) unterschritten, so dass die Differenz in Form der so genannten Marktprämie ausgezahlt wird. D.h. in der Praxis erhält der Betreiber den Marktwert von seinem Direktvermarkter und die Marktprämie von seinem Netzbetreiber in separaten Abrechnungen.

Beim sogenannten „anzulegenden Wert“ handelt es sich um den Wert, der bei Ausschreibungen für Photovoltaikanlagen ermittelt wurde.

Die Marktprämie ist der anzulegender Wert EEG minus monatlichen Durchschnittspreis für Strom an der Börse.

Der Prozess mit Anbietersuche, Kosten- und Vertragsvergleich ist relativ aufwendig und bürokratisch für Anlagengrößen zwischen 100 und 1000 kWp. Die Direktvermarktung ist auch für die Direktvermarkter bei schwankenden Strompreisen besonders für kleine Anlagen zunehmend unattraktiver, weil Sie das Prognoserisiko übernehmen müssen, so dass die Vermarktungsentgelte oft deutlich über der für Altanlagen geltenden Managementprämie von 4€/MWh liegen. Bei den hier anvisierten Anlagengrößen werden mittlerweile auch Preismodelle mit monatlichen Grundpreisen und einem zusätzlichen

Vermarktungsentgelt pro kWh erhoben, um die administrative Tätigkeit zwischen Betreiber und Direktvermarkter zu organisieren. Hinzu kommt, dass in der Regel vertraglich festgelegt wird, dass der Betreiber oder Betriebsführer seine Anlage beim Direktvermarkter abmelden muss, sofern Sie bspw. aus Wartungsgründen nicht produzieren kann.

Insgesamt bedeutet die Direktvermarktung für die Lärmschutzwände tendenziell eher höhere Investitionen und laufende Kosten.

### Eigenverbrauch

Im Prinzip wird unter der Annahme von strengen wirtschaftlichen Investitionsentscheidungen klar, dass bei Lärmschutzwänden noch stärker als bei herkömmlichen PV-Anlagen der Fokus auf Eigenverbrauchsanlagen liegt, weil die eingesparte Strombezug von ca. 0,2 – 0,35 € / kWh inkl. der enthaltenen Stromzusatzkosten fast um Faktor 3 höher ist als der Rückspeisetarif. Dies ist darin begründet, dass die spezifischen Errichtungskosten nochmal deutlich höher sind als bei "normalen" Freiflächen PV-Anlagen. Änderungen im Projektverlauf haben sich hier durch deutlich gesunkene Modulpreise (vgl. hier insbesondere Aufsatzzlösungen) und die leichte Tariferhöhung von Anlagen mit Volleinspeisung (Änderung EEG) ergeben.

Allerdings verbleibt der Anreiz bzw. Zwang für Eigenverbrauchslösungen. In Frage kommen hier natürlich E-Ladestationen für PKW oder Raststätten bzw. andere Verbraucher entlang der Straße. Bei E-Ladestationen kann zudem eine weitere Zusatzeinnahmequelle in Form von THG-Quoten beansprucht werden, die aktuell zwischen 0,1 und 0,2 €/kWh liegen kann, was äußerst attraktiv ist.

Generell hinderlich für Eigenverbrauchslösungen an Autobahnen oder Landstraßen ist, dass selbst wenn eine technische Möglichkeit für Eigenverbrauchslösungen möglich wäre (z.B. Rasthof, Ladepark etc.) oft eine Vielzahl von Akteuren vorhanden sind (LSW-Hersteller, LSW-Errichter, Straßenbetreiber, Eigentümer & Betreiber PV-Anlage, Rasthofbetreiber, Ladeparkbetreiber etc.), dass der administrative Aufwand erheblich ist. In der Praxis müssen hier umfangreiche Verträge zwischen den Akteuren geschlossen werden, um ggf. einen Stromweiterverkauf zu organisieren, Netzanschlüsse errichtet oder geteilt werden und Dienstbarkeiten für die zu verbauende Infrastruktur eingetragen werden. Hinzu kommen hohe Kosten für die Baumaßnahmen im öffentlichen Raum bzw. der Autobahn.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die im Projektverlauf betrachteten Projektbeispiele bzw. echte Projekte (Firma Kohlhauer) oft wesentlich kürzere Lärmschutzwände realisieren, als man allgemein annehmen könnte. Das impliziert, dass oft nur Wandlängen von maximal einigen hundert Metern umgesetzt werden und demzufolge oft Anlagengrößen von ca. 100 – 250 kWp Nennleistung entstehen. Vergleicht man dies mit der Ladeleistung eines einzelnen Schnellladepunktes von 250 kW, welcher auch im Winter versorgt werden muss, wird klar, dass Ladeparkbetreiber ggf. aufgrund der bürokratischen Hemmnisse und den damit verbundenen Kosten auf eine Anbindung einer Lärmschutzwand verzichten bzw. die technischen und organisatorischen Gegebenheiten äußerst günstig sein müssen, damit sich eine Umsetzung lohnt.

In jedem Fall sollten Konstellationen identifiziert werden, wo ein einfacher Eigenverbrauch möglich ist und nach Möglichkeit der Verbraucher der erzeugten Energie (Ladenetzbetreiber, Raststättenbetreiber) vergleichsweise einfach Eigentümer und/oder Betreiber einer Lärmschutzwand werden können, um die bürokratischen Hemmnisse hier wesentlich zu reduzieren und den wirtschaftlichen Anreiz auch nutzen zu können. Potenziale gäbe es bei der Zusammenlegung einer PV-Lärmschutzwand mit Parkplatzüberdachungen, um entsprechend Skaleneffekte zu heben bzw. den Nachteil von relativ kleinen Nennleistungen auszugleichen.

### MS 8.2 Geschäftsmodelle und Vermarktungsstrategien

Die Ausarbeitung von Geschäftsmodellen und Vermarktungsstrategien wurde durch die Firma Kohlhauer vorangetrieben. Die ursprünglich im Projekt vorgesehene Einbeziehung von PV-Lärmschutzwänden für die Bahn wurde anfänglich geprüft, ist jedoch aufgrund spezifischer, bautechnischer und sicherheitsrelevanter Vorgaben bis auf Weiteres nicht oder nur mit aufwändigen Zusatzkonstruktionen umsetzbar. Aus diesem Grund und weil bisher von außen wenig Interesse und Förderung der notwendigen Entwicklungen und Zertifizierungen zu spüren war, wurden hier auch keine Geschäftsmodelle weiter betrachtet.

## Geschäftsmodelle PV-Lärmschutzwände an der Straße

Für PV-Lärmschutzwände an der Straße sieht es besser aus. Jedoch müssen hier jeweils konkret mit den örtlichen Begebenheiten der Flächeneigentumsverhältnisse, Konstellation der Bauunternehmen, Betreiber, die Art der Energievermarktung und weiteren Rahmenbedingungen die Geschäftsmodelle fallbezogen aufgestellt werden. Hier ergibt sich eine Bandbreite an möglichen Konstellationen. Eine ausgiebige Betrachtung von Fallbeispielen, Stakeholder Konstellationen und Geschäftsmodellen wurde zwischenzeitlich durch den Bericht „Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie“ [26] veröffentlicht. Der Umfang dieses Berichts ist deutlich ausführlicher und ausgiebiger, als es in PVwins möglich gewesen wäre, daher wird an dieser Stelle darauf hingewiesen.

Ob eine PV-Lärmschutzwand überhaupt errichtet werden kann und damit die Grundlage für ein Geschäftsmodell vorliegt, hängt von dem Standort und dem an der Straße verantwortlichen Betreiber ab. Organisatorisch ist dabei eine Fallunterscheidung zwischen Autobahnen des Bundes und Bundesstraßen in Verantwortung des Bundes zu ziehen. An Autobahnen, die durch die Autobahn GmbH betrieben werden, muss im Einzelfall betrachtet und verhandelt werden, ob eine Lärmschutzwand mit PV gebaut werden kann. Eine generelle Öffnung für PV-Lärmschutzwände liegt aktuell noch nicht vor. Organisatorische Hürden sind dabei zum einen, dass die Autobahn GmbH PV-Lärmschutzwände für sich selbst nur an Orten mit Eigenenergieverbrauch bauen möchte, was insbesondere in Nähe von Tunneln der Fall ist. PV-Lärmschutzwände ohne direkte Nähe zu Eigenenergieverbrauchern müssten dann mit Netzeinspeisung oder Energieverkauf an Dritte aufgestellt werden, wobei die Autobahn GmbH dann als Energieerzeuger auftreten würde und hierfür aktuell keine rechtliche Grundlage bzw. kein Interesse besteht. Zum anderen könnte die Autobahn PV-Potenzialflächen ohne eigenen lokalen Energiebedarf auch an Dritte kostenlos oder verpachtet vergeben und Vorgaben für den Betrieb und die Wartung aufstellen. Diese Option wird jedoch aktuell nicht geöffnet. Ein Blick in die Nachbarländer Schweiz und Österreich zeigt, dass es auch anders geht. Der Schweizer Bundesrat hat 2022 die rechtlichen Grundlagen geschaffen, dass Flächen ohne Eigenenergieinteresse seitens der ASTRA für die Produktion von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien kostenlos an Dritte zur Verfügung gestellt werden dürfen. Daraufhin startete die ASTRA ein Bewerbungsverfahren von ausgewählten Flächen und stellte einen Anforderungskatalog auf. Für 18 Lärmschutzwände und 15 Rastplätze gingen Bewerbungen ein (Mehr Informationen unter [Bewerbungsverfahren für den Bau von Photovoltaikanlagen Dritter](#)). Die ASFINAG in Österreich hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2030 bilanziell stromautark zu werden. In diesem Zuge wurden und werden PV-Projekte an verschiedenen Flächen wie Tunnelportalen, Nebenflächen und Lärmschutzwänden vorangetrieben. Fokus ist hierbei die Eigenenergienutzung. Um diese zu erhöhen, baute die ASFINAG in einer Modellregion das weltweit erste private Stromnetz entlang von 38 km Autobahn auf, um in das eigene Energienetz Verbraucher, Erzeuger und Speicher miteinander zu verbinden. Nähere Informationen dazu unter [Photovoltaik in der ASFINAG: Lärmschutzwände werden zu Energieanlagen | ASFINAG Blog](#).

In Deutschland sind attraktive Rahmenbedingungen für einen richtigen Markt von PV-Lärmschutzwänden noch zu schaffen. Dabei kann die vorher thematisierte Fokussierung auf bilanzielle Deckung von Eigenenergieverbrauch der Straßenbetreiber oder Öffnung von Möglichkeiten zur Flächenvergabe an Dritte einen Markt schaffen, der dann die Entwicklung neuer Produkte durch die Hersteller von Lärmschutzwänden nach sich ziehen würde und den Rahmen für neue Geschäftsmodelle bietet.

Im Zuge des Projekts wurden auch weitere Möglichkeiten zur Errichtung von PV-Lärmschutzwänden diskutiert. An Orten, wo die Lärmbelastung gerade unterhalb der Grenzwerte liegt und durch die Straßenbetreiber keine Lärmschutzeinrichtung vorgesehen ist, könnten Gemeinden in Abstimmung mit den Straßenbetreibern den Lärmschutz selbst in die Hand nehmen. Da viele Gemeinden jedoch in ihren finanziellen Möglichkeiten beschränkt sind, wären hier private Initiativen für mehr Lärm- und Umweltschutz ein Ausweg. Ein aussichtsreiches Beispiel könnten lokale Bürgerenergiegenossenschaften sein. Die EGIS Energiegenossenschaft mit der PV-Lärmschutzwand in Neuötting ist dafür ein gutes Beispiel. Die Finanzierung einer PV-Lärmschutzwand würde dabei von den Bürgern vor Ort unterstützt, die damit zusätzlich den Nutzen des Schallschutzes im eigenen Ort bewirken. Durch den Energieertrag der installierten Solarmodule rechnen sich allenfalls die Komponenten der Solarinstallation in einem für PV-Projekte üblichen Amortisationszeitraum von unter 10 bis 15 Jahren. Eine Refinanzierung der gesamten

Lärmschutzwand kann, wenn dann nur über mehrere Generationen von PV-Elementen erreicht werden. Um das Investment in eine komplett neue Lärmschutzwand mit PV für Bürgerenergiegenossenschaften attraktiv zu machen, könnten Gemeinden zusätzliche Flächen für weitere Erneuerbare Energien vergeben, über welche dann eine Querfinanzierung und ggf. zusätzliche Kostenminderungen durch gemeinsame Netzanschlusspunkte ermöglicht werden.

### **Vermarktungsstrategien**

Das Projekt PVwins wurde auf unterschiedliche Weise zur Vermarktung genutzt. Während der Jahre 2022, 2023 und 2024 wurde das Thema Lärmschutzwände auf dem ISE-Stand der Intersolar-Messe durch Exponate wie Lärmschutzwandelemente und ein kleines Modell einer Straße mit Lärmschutzwänden und Straßenüberdachung gezeigt. Entsprechende dort ausgelegte Broschüren unterstützen die Thematik. Der Aufbau der Lärmschutzwand über LinkedIn durch die Verbundprojektpartner gepostet. Daraufhin kam es zu verschiedenen Anfragen durch die Presse, z.B. das PV-Magazine. Bei der Firma Kohlhauer wurden neue Vermarktungsstrategien beim Marketing im Zuge einer Neustrukturierung von Internetauftritt, Broschüren und Marketingkampagnen z.B. bei LinkedIn. Dabei ist das PV-Lärmschutzwandelement „Volta“ Teil der Produktpalette.

### **MS 8.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Verbesserungsvorschläge**

Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind ein komplexes Thema und haben sich während der Projektdauer von PVwins bereits an vielen Stellen geändert, nicht nur was die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen z.B. im EEG angeht, sondern auch bezogen auf Aspekte wie den Umgang mit PV innerhalb der „Anbauverbotszone“ aus Paragraf 9 im Bundesfernstraßengesetz. Eine ausführliche Beschreibung der aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen wird aktuell in der FGSV ad-hoc Gruppe zu Erneuerbaren Energien an Straßen außerorts in Zusammenarbeit der relevanten Akteure wie Autobahn GmbH, BASt, FBA und auch dem Fraunhofer ISE erarbeitet. Hieraus wird voraussichtlich Anfang 2025 ein Hinweisblatt hervorgehen, auf welches an dieser Stelle bereits verwiesen wird, da in diesem die Informationen aktuell und ausführlich bereitgestellt werden.

### **Verbesserungsvorschläge**

Im Hinblick auf eine breitere Nutzung von PV-Lärmschutzwänden wurden einige Punkte durch die Projektpartner identifiziert.

Falls keine lokalen Verbraucher zur Verfügung stehen, jedoch ein Netzzuschluss möglich ist, und die Anlage in die Leistungsklasse der EEG-Einspeisevergütung passt, könnte die Wirtschaftlichkeit von PV-Lärmschutzwänden erhöht werden, wenn es einen zusätzlichen EEG-Bonus ähnlich wie für die Agri-PV geben würde. Ebenfalls wäre zu überlegen, die Leistungsgrenzen der festen EEG-Einspeisevergütung nach oben zu erhöhen, oder Lärmschutzwände in die Klasse von besonderen Anlagen gemäß § 37 Abs. 1 Nr. 3 EEG 2023 aufzunehmen, sodass sie bei der EEG-Ausschreibung im Segment von PV-Parkplatzüberdachung, Agri-PV und Moor-PV liegen.

Aus Sicht des Projektpartners Kohlhauer erschwert das aktuelle Ausschreibungsdesign für den Bau von Lärmschutzwänden, Lärmschutzelemente mit integrierter Photovoltaik zu platzieren bzw. hinzuzufügen. Hierfür müssten deutlich klarere Regelungen geschaffen werden. Der Standardleistungskatalog für Lärmschutzprodukte lässt oberflächlich keine Möglichkeit zu, um innovative Produkte auszuschreiben. Es sind lediglich die Produkte enthalten, die seit mehr als 35 Jahren den Markt bestimmen, z.B. Lärmschutzelemente aus Holz, Aluminium, Beton und transparente Acrylelemente. Da Nebenangebote mit Alternativoptionen nicht möglich sind und üblicherweise der Preis und Erfüllung der primären technischen Anforderungen an Lärmschutz den Zuschlag bestimmen, finden Photovoltaiklärmschutzelemente nur selten in die standardmäßigen Ausschreibungen von neuen Lärmschutzwänden. Pilotprojekte mit Photovoltaik schaffen es zumeist deshalb in Ausschreibungen, weil hier lokale Initiativen, zum Beispiel durch Stadtwerke und Gemeinden im Vorfeld die technischen Möglichkeiten untersuchen, sich mit Herstellern von Lärmschutzelementen mit PV austauschen und darüber erfahren, auf welche technischen Zusatzaspekte es in der Ausschreibung ankommt. Indem diese

dann zusätzlich bei der Ausschreibung berücksichtigt werden, können solche Pilotvorhaben umgesetzt werden. Damit bleiben sie jedoch ein Sonderprozess, welcher lokale Initiativen voraussetzt. Ein erster Lösungsansatz könnte die Einführung der Verwendung von PV-Zusatzen in den Standardleistungskatalog Bau – STLB-BAU und STLK sein.

Die Vermarktung erfolgt bei der Firma Kohlhauer ähnlich wie bei Standard-Elementen über Vertriebsmitarbeiter. Ein Hersteller wie Kohlhauer kann jedoch nicht aktiv auf die ausschreibenden Stellen zugehen, um auf deren Ausschreibungsdesign Einfluss zu nehmen. Daher ist zunächst der politische Wille notwendig, diese und andere Hürden zu reduzieren. Für Hersteller von Lärmschutzwandprodukten ist die einzige Möglichkeit etwas voranzutreiben die Arbeit in Verbänden. Kohlhauer ist dabei bereits beteiligt in der Einrichtung eines Arbeitskreises PV in der Fachgruppe Straße des DVLV e.V. – Deutscher Verband für Lärmschutz an Verkehrswegen in Kooperation mit BVMB – Bundesverband mittelständischer Bauunternehmen. Für die Zukunft wäre der Aufbau von Kooperationen mit öffentlich-rechtlichen Einrichtungen (Autobahn GmbH, DEGES GmbH, BASt, FBA und Forschungsinstituten) wichtig, um sich etwa gemeinsam auf Anforderungskataloge zu einigen, die in zukünftigen Ausschreibungen umgesetzt werden können. Damit würde es auch Klarheit für Produktentwicklungen von Herstellern geben, und die marktverfügbaren Optionen würden sich erhöhen.

Zusätzlich kann über Fachartikel auf das Thema hingewiesen und für dieses sensibilisiert werden. Weitere Hürden bei der Vermarktung kann auch die Stakeholderstruktur über verschiedene Gewerke und Bauunternehmen darstellen. Viele Hersteller von Lärmschutzwandelementen werden zwar in der Detailplanung der Lärmschutzwand mit einbezogen und produzieren die Elemente, agieren jedoch nicht als Generalunternehmer für die Baustelle der Lärmschutzwand. Die Installation und im Falle von PV-Lärmschutzwänden notwendige elektrische Anbindung wird durch andere Bau- und Elektrounternehmen oder einen übergeordneten Generalunternehmer abgewickelt. Hier ist dementsprechend Potenzial, organisatorisch die Zusammenarbeit über die Gewerke und im Hinblick auf ein für Lärmschutzwände neuartiges Produkt zu verbessern.

Weitere Verbesserungsvorschläge sind, Anforderungen für Photovoltaikintegrationsvarianten in Regelwerke wie die ZTV Lsw aufzunehmen, damit sich Hersteller daran orientieren können und die Anforderungen an Aspekte der Sicherheit klar für Hersteller und Betreiber sind. Aspekte hierbei können sein, wie das Thema Blendung zu bewerten ist und ob es Typenzulassungen für bestimmte Oberflächen oder Modulprodukte gibt, welche Aspekte für die elektrische Sicherheit erfüllt werden müssen und welche Anforderungen die Module bezüglich Steinschlag erfüllen müssen. Diese Aspekte sollten sorgsam durch Experten aus Verkehrstechnik und Photovoltaik in Abstimmung mit Straßenbetreuern erarbeitet und vorgeschlagen werden. Ziel sollte dabei jedoch sein, die Anforderungen ausreichend streng, aber nicht zu aufwendig zu machen, da die Umsetzung sonst unwirtschaftlich wird und zur Verhinderung von PV-Lärmschutzwänden führt.

## 2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt seitens Fraunhofer ISE separat über die zentrale Verwaltung der Fraunhofer-Gesellschaft. Die Projektpartner Igrapower und Kohlhauer reichen den Nachweis ebenfalls separat ein.

## 2.3 Notwendigkeit der Arbeit

Um die Klimaziele zu erreichen und den erklärten Zubau von PV auf 215 GWp bis 2030 und 400 GWp bis 2040 zu erreichen, sind große Flächen für Photovoltaikmodule notwendig. Um Flächennutzungskonflikte zu mindern, gilt es dabei, nicht nur einfach zu bebauende Freiflächen zu nutzen, sondern auch Flächendoppelnutzung in vielen Bereichen zu verfolgen. Zudem kann Energie dann häufig an Orten mit lokalem Verbrauch genutzt werden. Eine wichtige Flächenkategorie für die „Integrierte Photovoltaik“, also der Photovoltaiknutzung auf Potenzialflächen mit anderer Primärfunktion, sind Lärmschutzwände. Schon in den frühen Tagen der Photovoltaik wurden diese Flächen als aussichtsreich hervorgetan, insbesondere in der Schweiz. Bereits seit den 1990er Jahren gibt es diverse Pilotprojekte, jedoch sind Photovoltaik Lärmschutzwände immer noch ein Nischenprodukt und eine Installation wird nicht überall wo möglich geprüft und gebaut. Während der letzten 30 Jahre, seitdem es Photovoltaik Lärmschutzwände gibt, hat sich bei der Technologie von Solarzellen und Solarmodulen viel getan und auch die Anforderungen an Lärmschutz weiterentwickelt wurden. Insbesondere die Erfüllung von hohen akustischen Anforderungen und Schallabsorption zusammen mit Photovoltaik ist eine Herausforderung, zu der es Forschungsbedarf gab und auch noch weiterhin gibt. Im Projekt PVwins konnten verschiedene Konzepte für unterschiedliche Einbausituationen erprobt werden.

## 2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erarbeiteten Konzepte, durchgeführten Tests und der Erfahrungsaufbau durch den Aufbau der Lärmschutzwand haben den Projektbeteiligten gezeigt, welche Anwendungen aussichtsreich sind. Auf dieses Wissen können zukünftige Projekte aufbauen und die Teilnahme an Konsortien und Gremien, z.B. der Forschungsgesellschaft für Straßenverkehr erfolgen. Das Fraunhofer ISE hat durch den Aufbau von Expertise für PV-Lärmschutzwände zwei weitere EU-Projekte mit Lärmschutzwanddemonstratoren, mehrere Industrieprojekte, sowie zwei Potenzialstudien angehen können. Die Firma Kohlhauer hat bereits während der Projektphase und auch danach verschiedene Projekte mit PV-Lärmschutzwandelementen gebaut. Sowohl Kohlhauer, als auch ISE erreichen häufig Anfragen zu möglichen Umsetzungsprojekten, hier scheint ein hohes Interesse zu sein, aber auch viele Unklarheiten für die verschiedenen Interessengruppen, was es alles zu beachten gilt.

## 2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Während der Projektlaufzeit sind verschiedene Projekte und Studien zu Photovoltaik Lärmschutzwänden im In- und Ausland durchgeführt worden.

Vom Fraunhofer IPB ist dabei mit direktem Bezug zu PV-Lärmschutzwänden das Projekt „Klimaneutraler Lärmschutz“ [10] zu nennen. Im Zuge der Innovationsausschreibung „IÖB Challenge“ der österreichischen ASFINAG wurde an der S1 ein Abschnitt mit Photovoltaik Lärmschutzwandinstallationen verschiedener Firmen installiert und im Jahr 2022 getestet. Ergebnisse liegen Stand November 2024 jedoch noch nicht öffentlich vor. Auch der Projektpartner Kohlhauer konnte bei der IÖB Challenge einen Abschnitt mit seiner PV-Lärmschutzwand erproben [27].

Eine durch die BASt beauftragte Studie zu rechtlichen Rahmenbedingungen, Geschäftsmodellen und Beurteilung von best-practice Pilotprojekten wurde unter dem Titel „Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie“ in 2022 veröffentlicht [26].

## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

### Veröffentlichungen

Forster, Jacob; Tsutskiridze, Giorgi; Herr, Cornelius; Huyeng, Jonas; Basler, Felix; Kohlhauer, Reinhard et al. (2023): Photovoltaic Noise Barriers as Energy Generating Infrastructure: Functional Overview about Five Solutions. WIP-Munich. In: 40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.

Jonas D. Huyeng, Jacob Forster, Felix Basler, Pascal Romer, Andreas J. Beinert, Christian Schill, Martin Heinrich (2022): Technical Aspects for Road Integrated PV Towards a More Sustainable Mobility Sector.

Jonas Huyeng (2022): Solarstrom vom Straßennetz. Das Potenzial der verkehrswege-integrierten Photovoltaik, ihr Nutzen für die Klimaneutralität und der aktuelle Stand der Technik. Hg. v. VSVI-NRW. Online verfügbar unter <https://www.vsvinrw.de/unsere-jahreshefte>.

### Geplant:

DAGA 2025, Beitrag der BASt „PVwins - Wandintegrierte PV-Elemente für den Lärmschutz“

### Abschlussarbeiten

Giorgi Tsutskiridze: Gestaltung einer Photovoltaik-Nachrüstlösung für Verkehrslärmschutzwände unter Verwendung von der Qualitativen Modellbildungsansätze PGE und C&C2-A. Karlsruhe Institut für Technologie.

Cornelius Herr (2022): Nachrüstlösung für Standard-PV-Module in Kombination mit Schallabsorber-elementen für Lärmschutzwände. Hochschule Offenburg.

Enzo Job (2023), „Untersuchung der mechanischen Stabilität von Photovoltaikmodulen gegenüber Steinschlag gemäß Vorgaben für Lärmschutzvorrichtungen“. Duale Hochschule Baden-Württemberg

### Zeitungsauftritt

Valerie Thompson (2024): Fraunhofer ISE testet neue Modulkonzepte für Lärmschutzwände. In: PV Magazine, 21.07.2024. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2024/06/21/fraunhofer-ise-testet-neue-modulkonzepte-fuer-laermeschutzaende/>.

### 3 Anlagen

#### 3.1 Zusätzliche Fotos und Informationen

##### Kombinationslösung



##### Kassettenlösung



### Mikroperforierte Absorber



### Rückseite der Lärmschutzwand



## Spezifikationen von Megasol zu MPA-Modulen (Konzept 4) mit M6 RearCon-Zellen

### Dimensions

Width $\pm 4.0$ mm	3900 mm
Height $\pm 4.0$ mm	936 mm

### Thermal properties

Nominal operating cell temperature (NOCT)	$42 \pm 2$ °C
Temperature coefficient Uoc	- 0.268 %/°C
Temperature coefficient Isc	+0.042 %/°C
Temperature coefficient Pmpp	- 0.300 %/°C

### Electrical data STC <sup>1</sup>

Active cells	200
Cell matrix	20x10
Stringing direction	Vertical
Pmpp Nominal power	592 Wp
Umpp Nominal voltage	60.5 V
Impp Nominal current	9.79 A
Uoc Open circuit voltage	70.5 V
Isc Short circuit current	10.26 A

## Spezifikationen von Megasol zu Kombinations-Modulen (Konzept 7) mit G1 HiR-Zellen

### Dimensions

Width $\pm 4.0$ mm	3900 mm
Height $\pm 4.0$ mm	936 mm

### Thermal properties

Nominal operating cell temperature (NOCT)	$42 \pm 2$ °C
Temperature coefficient Uoc	- 0.260 %/°C
Temperature coefficient Isc	+0.046 %/°C
Temperature coefficient Pmpp	- 0.320 %/°C

### Electrical data STC <sup>1</sup>

	22-0168-12-02-001-1-0	22-0168-12-02-001-2-0
Active cells	60	50
Cell matrix	12x5	10x5
Stringing direction	Vertical	Vertical
Pmpp Nominal power	320 Wp	266 Wp
Umpp Nominal voltage	37.2 V	31.0 V
Impp Nominal current	8.61 A	8.61 A
Uoc Open circuit voltage	42.8 V	35.6 V
Isc Short circuit current	8.99 A	8.99 A

## Spezifikationen von Kassetten-Modulen (Konzept 9) mit M6 RearCon-Zellen

### Dimensions

Width $\pm 4.0 \text{ mm}$	3980 mm
Height $\pm 4.0 \text{ mm}$	420 mm

### Thermal properties

Nominal operating cell temperature (NOCT)	$42 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient Uoc	- 0.268 %/ $^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient Isc	+0.042 %/ $^{\circ}\text{C}$
Temperature coefficient Pmpp	- 0.300 %/ $^{\circ}\text{C}$

### Electrical data STC <sup>1</sup>

Active cells	80
Cell matrix	20x4
Stringing direction	Vertical
Pmpp Nominal power	240 Wp
Umpp Nominal voltage	24.2 V
Impp Nominal current	9.92 A
Uoc Open circuit voltage	28.2 V
Isc Short circuit current	10.40 A

### 3.2 Literaturverzeichnis

- [1] Andres Büchi, "Solarstrom von der Autobahn," *SonntagsZeitung*, <https://www.photovoltaik.eu/solarparks/methusalem-unter-der-lupe>.
- [2] Thomas Nordmann and TNC Consulting AG, "Drei integrierte PV-Schallschutz Versuchsfelder," 2002.
- [3] T. N. Thomas Vontobel, "Auswertung der Langzeit-Betriebserfahrung der PV-Lärmschutz-Anlage A13," Energie Schweiz, 2019.
- [4] Th. Nordmann, Th. Vontobel, L. Clavadetscher, "15 Years of Practical Experience in Development and Improvement of Bifacial Photovoltaic Noise Barriers Along Highways and Railway Lines in Switzerland," 2012.
- [5] T. Nordmann and L. Clavadetscher, "PV on noise barriers," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 12, no. 6, pp. 485–495, 2004.
- [6] Graaf, Dirk van der (GPO), "Solar Highways Final report LIFE13ENV/NL/000971," 2020.
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Ausführung von Lärmschutzwänden an Straßen: ZTV Lsw 22*, 2022nd ed. Köln: FGSV Der Verlag, 2022.
- [8] DIN EN 1793-3 *Lärmschutzeinrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum*.
- [9] X. Z. Philip Leistner, "Transparente, schallabsorbierende Lärmschutzwände," Fraunhofer Institut für Bauphysik, 2009.
- [10] Mark Koehler, Alassane Braun, Korbinian Czirwitzky, Peter Brandstätt, "Klimaneutraler Lärmschutz: Nachhaltige Optimierung und ganzheitliche Bilanzierung von Lärmschutzbauwerken," Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2022. [Online] Available: <https://www.ipb.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/publikationen/ak/abschlussbericht-klimaneutraler-laermschutz.pdf>.
- [11] DIN EN 1793-4 *Lärmschutzaufstellungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 4: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte der Schallbeugung*.
- [12] DIN EN 1793-5 *Lärmschutzaufstellungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 5: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern*.
- [13] Petra Ichá. Dr. Thomas Lauf, *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2023*. [Online] Available: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23\\_2024\\_cc\\_strommix\\_11\\_2024.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_cc_strommix_11_2024.pdf). Accessed on: Nov. 29 2024.
- [14] IEC 61730-2:2023 *Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 2: Requirements for testing*.
- [15] IEC61215-1:2021 *Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1-1: Special requirements for testing of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules*.
- [16] *Lärmschutzaufstellungen an Straßen – Nichtakustische Eigenschaften – Teil 1: Mechanische Eigenschaften und Anforderungen an die Standsicherheit; Deutsche Fassung EN 1794-1:2018*, 2018.
- [17] J. Markert, "Mechanical Stability of PV Modules: Analyses of the Influence of the Glass Quality," in *PV-Symposium Proceedings 2024*.
- [18] UL 1703 *Flat-Plate Photovoltaic Modules and Panels*, 2002.
- [19] J. Forster, G. Tsutkirkidze, C. Herr, J. Huyeng, F. Basler, R. Kohlhauer, D. H. Neuhaus, M. Heinrich, and L. C. Rendler, "Photovoltaic Noise Barriers as Energy Generating Infrastructure: Functional Overview about Five Solutions," (en), *40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2023.
- [20] DIN EN 1793-6 *Lärmschutzaufstellungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 6: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte der Luftschalldämmung in gerichteten Schallfeldern*.
- [21] Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, Ed., *AcoustiStudio. Version des Handbuchs 2.0, Softwareversion 3.1.x.: Bedienungsanleitung zur Datenanalyse- und Datenmanagement-Software*.

- [22] Referat StB 13, "Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2020 – 2021," [Online] Available: [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/statistik-des-laermschutzes-an-bundesfernstrassen-2020-2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/statistik-des-laermschutzes-an-bundesfernstrassen-2020-2021.pdf?__blob=publicationFile).
- [23] Referat StB 13, "Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2017 - 2018 - 2019," [Online] Available: [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/statistik-des-laermschutzes-an-bundesfernstrassen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/statistik-des-laermschutzes-an-bundesfernstrassen.pdf?__blob=publicationFile).
- [24] Dorothea Ludwig, Anja Tegeler, Daniel Schmedes, Luca Tomhave, Andreas Hensel, Jacob Forster, Alexander Kleinhans, Martin Heinrich, "Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen," IP Syscon, Fraunhofer ISE, 2024. [Online] Available: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2999/file/V382+Gesamtversion+BF.pdf>.
- [25] Bundesnetzagentur, *EEG-För-de-rung und -För-der-sät-ze*. [Online] Available: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/EEG\\_Forderung/start.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/EEG_Forderung/start.html).
- [26] Elena Chvanova, Birgit Haller, Uwe Leprich, Ursula Mayr, Christian Mayr, Christian Oßwald, Martin Altrock, Christian Gemmer, Sascha Michaels, Julia Wagner, *Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie: Bericht V364*. [Online] Available: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/docId/2739>.
- [27] ASFINAG, *Die Autobahn als Sonnenkraftwerk: Mit der Lärmschutzwand Strom produzieren*. [Online] Available: <https://www.ioeb-innovationsplattform.at/challenges/detail/die-autobahn-als-sonnenkraftwerk-mit-der-laermschutzwand-strom-produzieren/>.

### 3.3 Erfolgskontrollbericht

Der Erfolgskontrollbericht wird durch alle drei Verbundprojektpartner separat eingereicht.

### 3.4 Berichtsblatt

Das Berichtsblatt wird durch das Fraunhofer ISE separat eingereicht.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel PVwins - Entwicklung von wandintegrierten PV-Elementen für den Lärmschutz		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] a) Forster, Jacob; Heinrich, Martin; Fokuhl, Esther b) Schwarz, Wolfgang; Renner, Johannes c) Bäuerle, Lukas; Kohlhauer, Reinhard d) Strigari, Fabio		5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2024
		6. Veröffentlichungsdatum Noch nicht bekannt
		7. Form der Publikation Digitale Bereitstellung des Schlussberichts
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) a) Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg b) Igrapower GmbH, Magdeburger Allee 199, 99086 Erfurt c) R. Kohlhauer GmbH, Draisstr. 2, 76571 Gaggenau d) Bundesanstalt für Straßenwesen, Brüderstr. 53, 51427 Bergisch Gladbach		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 03EE1062A,B,C
		11. Seitenzahl 95
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn		13. Literaturangaben 27
		14. Tabellen 28
		15. Abbildungen 77
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TIB, geplant		
18. Kurzfassung Der Schlussbericht behandelt die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt PVwins, in welchem wandintegrierte PV-Elemente für Lärmschutzwände entwickelt wurden. Ausgehend von einer Anforderungsanalyse wurden zunächst verschiedene Konzepte und Varianten betrachtet, um Lärmschutzfunktionen für Schallisolation und Schallabsorption mit Photovoltaik zu verbinden. Eine Auswahl dieser Konzepte wurden zu großmaßstäblichen Prototypen weiterentwickelt und die dabei durchgeföhrten Entwicklungsarbeiten als Teil verschiedener Arbeitspakete dokumentiert. Um die Prototypen in akustischen in-situ Messungen zu testen und den Solarertrag zu messen, wurde eine 16 m lange und 4 bis 4,5 m hohe Lärmschutzwand mit 4 Segmenten aufgebaut. Neben diesen Arbeiten sind auch andere Arbeitspakete, wie eine LCA-Analyse, elektrische Systemanbindung, Steinschlagtests und rechtliche – und wirtschaftliche Rahmenbedingungen im Bericht betrachtet.		
19. Schlagwörter Photovoltaik, Lärmschutzwände, Integrierte Photovoltaik, RIPV		
20. Verlag	21. Preis	

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report	
3. title PVwins – Development of noise barrier integrated PV-elements		
4. author(s) (family name, first name(s)) a) Forster, Jacob; Heinrich, Martin; Fokuhl, Esther b) Schwarz, Wolfgang; Renner, Johannes c) Bäuerle, Lukas; Kohlhauer, Reinhard d) Strigari, Fabio		5. end of project 30.06.2024
		6. publication date Not known yet
		7. form of publication Digital access to final report
8. performing organization(s) (name, address) a) Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg b) Igrapower GmbH, Magdeburger Allee 199, 99086 Erfurt c) R. Kohlhauer GmbH, Draisstr. 2, 76571 Gaggenau d) Bundesanstalt für Straßenwesen, Brüderstr. 53, 51427 Bergisch Gladbach		9. originator's report no.
		10. reference no. 03EE1062A,B,C
		11. no. of pages 95
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn		13. no. of references 27
		14. no. of tables 28
		15. no. of figures 77
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date) TIB, planned		
18. abstract The final report addresses the results of the research project PVwins, in which integrated PV elements for noise barriers were developed. Based on a requirement analysis, various concepts and variants were initially considered to combine noise protection functions for sound insulation and sound absorption with photovoltaics. A selection of these concepts was further developed into large-scale prototypes, and the development work carried out was documented as part of various work packages. To test the prototypes in acoustic in-situ measurements and to measure solar yield, a 16-meter long and 4 to 4.5-meter high noise barrier with 4 segments was constructed. In addition to this work, other work packages such as an LCA analysis, electrical system integration, stone impact tests, and legal and economic framework conditions are also discussed in the report.		
19. keywords Photovoltaic, Noise Barrier, Integrated Photovoltaic, RIPV		
20. publisher	21. price	