

Klimaneutrale Lärmschutzbauwerke

Peter Brandstädt, Mark Koehler

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Abteilung Akustik, E-Mail: peter.brandstaett@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Die gestiegenen Anforderungen an die Energiewende mit der Abkehr von fossilen Brennstoffen führt auch zu vermehrtem Einsatz von Photovoltaik (PV) Anlagen, bisher vor allem im privaten Bereich, unterstützt durch entsprechende Verordnungen der Baubehörden. Aber auch im öffentlichen Bereich werden zunehmend Flächen zur Verfügung gestellt, um dort PV-Anlagen zu installieren. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das vom Ministerium für Verkehr in Baden-Württemberg geförderte Projekt »Nachhaltige Optimierung und ganzheitliche Bilanzierung von Lärmschutzbauwerken«, das im Abschlussbericht [1] ausführlich beschrieben ist, mit der Integration von PV-Anlagen in vor allem schallabsorbierende Lärmschutzwände. Dabei geht es einerseits um die möglichst optimale Gestaltung der Kombination hinsichtlich der schallabsorbierenden Eigenschaften und des Stromertrags. Durch die optimierte Anordnung kann andererseits der Stromertrag schon nach nur wenigen Jahren zur Klimaneutralität der Lärmschutzeinrichtung inklusive PV-Anlage führen. Diese nachhaltige Optimierung und ganzheitliche Bilanzierung von Lärmschutzbauwerken steht im Fokus des Beitrags und streift darüber hinaus genehmigungsrechtliche und weitere Aspekte.

Voraussetzungen und Hemmnisse

Mit dem Ziel, das Systempotenzial klimaneutraler Lärmschutzbauwerke auszuschöpfen, widmet sich das Projekt der fachübergreifenden Zusammenführung von Fachliteratur, Standards und Praxiserfahrungen sowie der Erweiterung der dafür erforderlichen Daten, Modelle und Methoden. Im Vordergrund steht die Aufgabe, eine jeweils fallspezifisch abgestimmte, funktionale Lärmschutzwirkung nachhaltig zu gewährleisten. Dazu müssen Ressourceneinsatz (Material, Bau, PV-Komponenten usw.), Umweltindikatoren (GWP, Flächenverbrauch usw.) sowie natürlich die »CO₂-Gewinne« durch erneuerbare Energie in einer Gesamt-Ökobilanz behandelt werden können. Mit dem geschaffenen Wissen lassen sich konkrete Systempotenziale beschreiben sowie neue, innovative Lösungsansätze entwickeln und bewerten.

Dazu wurden im ersten Schritt Workshops mit den verschiedenen involvierten Parteien in unterschiedlichen Konstellationen durchgeführt. Dabei konnte u.a. festgestellt werden, dass ein hoher Abstimmungsbedarf unter den Planungsbeteiligten (z.B. Energieversorger, Ämter, Autobahn GmbH, Behörden) entsteht, die Geschäftsmodelle zur PV-Nutzung zum Teil unklar oder nicht geregelt sind, es sich konstruktiv komplexe Anforderungen in der Kombination der akustischen Funktion mit den PV-Elementen ergeben und darüber hinaus der Wartungsaufwand und die Verantwortlichkeiten auf mehrere Parteien verteilen würden. Trotz dieser Hemmnisse bestehen berechtigte Aussichten Lärmschutzwände mit PV-Modulen zu kombinieren, um durch diese

Funktionsintegration den Flächenverbrauch zu reduzieren und die Bauwerke inklusive der PV-Module über die Nutzungsdauer klimaneutral zu gestalten.

Systeme und Konfigurationen

Aus der Vielzahl an möglichen Konstruktionen von Lärmschutzwänden sowie Kombinationen und Anordnungen von PV-Modulen wurden im Projekt drei Varianten von Lärmschutzwänden herangezogen, die gemäß Abbildung 1 aus Holz- oder Aluminiumkassetten sowie Betonelementen zwischen Stützen aufgebaut sind.



Abbildung 1: Im Projekt betrachtete Bauweisen von Lärmschutzwänden mit Holzkassetten (links), Aluminiumkassetten (Mitte) und Betonriegeln (rechts).

Diese drei Grundkonstruktionen wurden in vier Varianten sowohl ohne als auch mit PV-Modulen ausgestattet, wie in Abbildung 2 skizziert. Dabei zeigt Variante 1 (links oben) eine schallabsorbierende LSW, Variante 2 (links unten) eine vollständig mit PV-Modulen belegte und damit reflektierende Wand, Variante 3 (rechts oben) eine Kombination der beiden vorgenannten mit jeweils 50 % Flächenanteil und Variante 4 (rechts unten) eine Wand mit einer deutlich größeren Gesamtfläche an PV-Modulen in einer Shed-Anordnung.

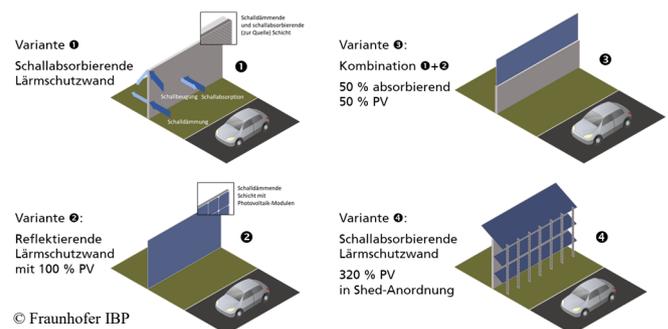


Abbildung 2: Im Projekt betrachtete Kombinationen von PV-Modulen an den Lärmschutzwandvarianten.

Die daraus entstehenden 12 Kombinationen aus Konstruktion und Anordnung wurden auf ihre akustischen und energetischen Eigenschaften untersucht. Die stofflichen Kennwerte der Materialien und der Energieertrag der PV-Module dienen als Basis für die ganzheitliche Bilanzierung hinsichtlich des GWP der jeweiligen Kombination.

Akustische Untersuchungen

Die akustischen Eigenschaften von Lärmschutzwänden werden über die Schallabsorption und Schalldämmung beschrieben. Die Messung erfolgt nach DIN EN 1793 Teil 1 [2] und liefert die Schallabsorption $DL_{\alpha, NRD}$ als dB-Wert durch Bezug auf ein Standardspektrum. Für Messungen im Freifeld ist das in Teil 5 der Norm definierte Impulsverfahren (Adrienne) zu verwenden. Dabei wird eine Anordnung von insgesamt 9 Mikrofonen (Mikrofonarray) in Abstand zur Lärmschutzwand positioniert und bei Geräuschanregung mit einem speziellen Lautsprecher der von der Wand reflektierte Schallanteil bestimmt. Die Schalldämmung wird nach Teil 2 der Norm als Differenz der Schalldruckpegel zwischen zwei Räumen im Diffusfeld gemessen und mit dem Spektrumanpassungswert C_{tr} berechnet zu $DL_R = R_w + C_{tr}$.

Die Bewertung der Eigenschaften erfolgt nach ZTV-Lsw 06. Dabei gelten Lärmschutzwände mit $DL_{\alpha, NRD}$ ab 8 dB als hochabsorbierend, zwischen 4 bis 7 dB als absorbierend und darunter als reflektierend. Für die Schalldämmung DL_R wird ein Wert von mindesten 24 dB gefordert.

Die einfachste Art PV-Module an Lärmschutzwände anzubringen, besteht in einer flächenbündigen, vertikalen Anordnung. Werden die Module auf der akustisch wirksamen Seite angebracht ist ein Rückgang der schallabsorbierenden Eigenschaften der Lärmschutzwand zu erwarten. Abbildung 3 zeigt die Anordnung einer schallabsorbierenden Schicht als Ersatz einer Lärmschutzwand für Messungen der Schallabsorption im Hallraum. Dabei wurde die Lärmschutzwand zunächst ohne PV-Module und in folgenden Varianten mit einer Belegung von 12, 24 und 36 Prozent der Lärmschutzwandfläche mit PV-Modulen belegt.

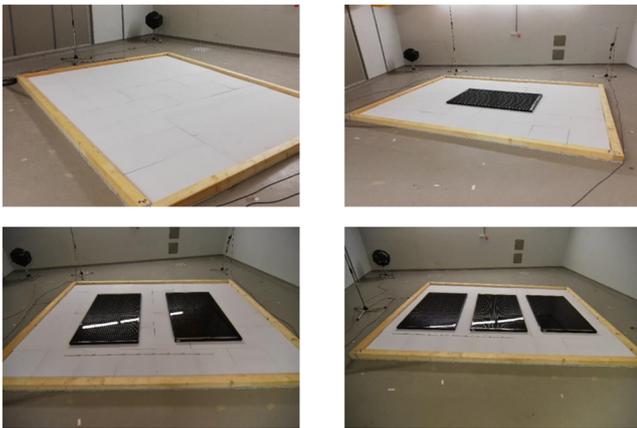


Abbildung 3: Flächenintegrierte Belegung der LSW mit PV-Modulen für Hallraummessungen mit oben 0 % und 12 %, unten 24 % und 36 % der Wandfläche.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für diese Messreihe. Ohne Belegung mit PV-Modulen erreicht die LSW hochabsorbierende Eigenschaften. Mit zunehmender Belegung der Absorberschicht nimmt die Absorption beginnend bei ca. 500 Hz immer weiter ab, so dass die LSW lediglich absorbierende Eigenschaften für $DL_{\alpha, NRD}$ erreicht. Weitere Versuchen haben ergeben, dass die Art der Verteilung auf der Oberfläche zwar nur geringen Einfluss hat, dennoch ist die regelmäßige Anordnung einer konzentrierten vorzuziehen.

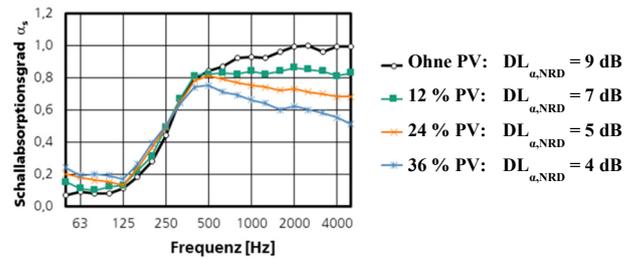


Abbildung 4: Schallabsorptionsgrad für die Lärmschutzwand mit PV-Modulen nach Abbildung 3.

Mit Versuchen im Hallraum lässt sich allerdings nicht der Einfluss der Anordnung der PV-Module ermitteln, wie er bei freier Schallausbreitung zu erwarten ist. Bei Montage der PV-Module als Sheds, z.B. im 45°-Winkel, sind richtungsabhängige Effekte durch reflektierte Schallanteile zu erwarten. In FEM-Simulationen und validierenden Messungen wurde dieser Effekt untersucht. Abbildung 5 zeigt die dabei zugrunde gelegte Anordnung.

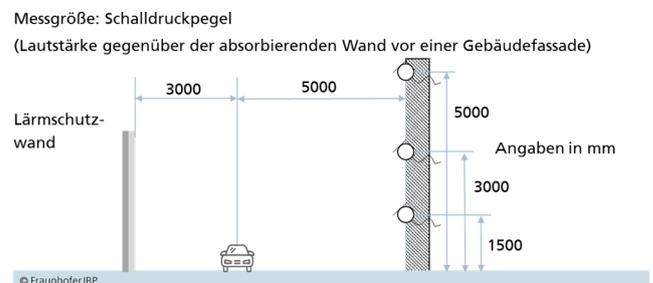


Abbildung 5: Nachbildung einer realen Lärmsituation durch FEM-Simulationen mit Comsol® und Messungen im Halbfreifeldraum.

Für die Schallemission wurde eine Punktschallquelle in 0,5 m über dem Boden verwendet, welcher das standardisierte Verkehrslärmspektrum aus DIN EN 1793-3 [2] zugewiesen wurde. Da dieses Spektrum auf einen Summenpegel von 0 dB normiert ist, wurde der Summenpegel der Schalleistung bei gleichbleibender spektraler Verteilung auf 100 dB angehoben, was in etwa der Schallemission einer durchschnittlich befahrenen Bundesstraße entspricht. Da auch bei dieser Untersuchung lediglich Pegelunterschiede infolge der unterschiedlichen Maßnahmen bei gleichbleibender Schallquelle entscheidend sind, hat der Absolutwert der Schallemission keinen Einfluss auf die Interpretation der Ergebnisse.

Zusätzlich wurde bei der Simulation noch ein Gebäude auf der gegenüberliegenden Seite der LSW integriert, um die Situation so realistisch wie möglich zu gestalten. Anschließend wurden drei Simulationen durchgeführt, bei denen jeweils nur die Oberfläche der LSW variiert wurde.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 6 dargestellt. Zusätzlich zu den farblich gekennzeichneten simulierten Schalldruckpegeln im Bereich zwischen der LSW und dem Gebäude wurde der Schalldruckpegel an einem Referenzpunkt vor der Gebäudefassade ausgegeben. Als maßgebend für die schallabsorbierende Wirkung wird der A-bewertete Schalldruckpegel L_{PA} an diesem Referenzpunkt betrachtet. Er beträgt für die hochabsorbierende Wand

83,2 dB(A), für die Wand mit 50 % flächenintegrierter PV 86,5 dB(A) und für die Wand mit der Shed-Konstruktion 82,6 dB(A). Während es bei flächenintegrierter Belegung mit PV-Modulen zu einem ca. 3 dB höheren Schalldruckpegel infolge des zusätzlich reflektierten Schalleintrags (Spiegelschallquelle) kommt, tritt bei der Shed-Konstruktion ein ca. 0,6 dB geringerer Schalldruckpegel an der Gebäudefassade auf.

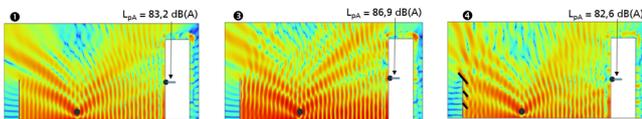


Abbildung 6: Simulationsergebnisse bei 500 Hz vor einer Gebäudefassade. Schallabsorbierende LSW ohne PV-Belegung (links), mit 50 % Belegung (Mitte) und mit Shed-Belegung (rechts).

Da die gängigen Messverfahren zur Bestimmung der Schallabsorption nicht geeignet sind, um den Effekt durch vor- oder aufgesetzte PV-Module im 45° Winkel zu ermitteln, wurde der Schalldruckpegel als Summe des Direktschalls und des reflektierten Schalls auf der gegenüberliegenden Seite der LSW direkt gemessen und mit der Simulation verglichen. Abbildung 7 zeigt den Versuchsaufbau im Halbfreifeldraum. Als Schallquelle diente eine sogenannte Vergleichsschallquelle, welche eine konstante Schallenergie mit bekannter, konstanter Schalleistung abstrahlt. Diese Schallquelle wurde, vergleichbar mit einer Straßenlärmsituation, im Halbfreifeldraum in 3 m Abstand vor der Wand auf dem Boden platziert. In weiteren 5 m Abstand von der Schallquelle wurden Messmikrofone in 1,5 m, 3,0 m und 5,0 m Höhe über dem Boden platziert und der Schalldruckpegel in Terzen von 50 Hz bis 5000 Hz gemessen. Die Messung wurde einmal mit der hochabsorbierenden Wand durchgeführt und anschließend mit der Wand mit zusätzlich 3 Reihen PV Module im 45° Winkel (Shed-Konstruktion) wiederholt.



Abbildung 7: Einfluss vorgesetzter PV-Module auf die hochabsorbierende Lärmschutzwand. Messung im Halbfreifeldraum mit Vergleichsschallquelle in drei Höhen.

In Abbildung 8 sind die Ergebnisse gegenübergestellt. Zum Vergleich ist jeweils der frequenzabhängige Schalldruckpegel ohne (schwarz) und mit PV-Modulen (grün) dargestellt. Es ist an den Kurvenverläufen zu erkennen, dass der Schalldruckpegel bei 1,5 m Höhe bei der Variante mit PV-Modulen niedriger ist als bei der ursprünglichen hochabsorbierenden LSW. Bei einer Höhe von 3,0 m verlaufen die Kurven nahezu gleich und bei einer Mikrofonhöhe von 5,0 m ist der Schalldruckpegel mit PV-Modulen etwas höher als ohne. Betrachtet man die Summenschalldruckpegel, kommt es bei 1,5 m Höhe

zu einer Reduzierung von 1 dB, bei 3,0 m Höhe zu 0,4 dB und bei 5,0 m Höhe zu einer Erhöhung von 1 dB.

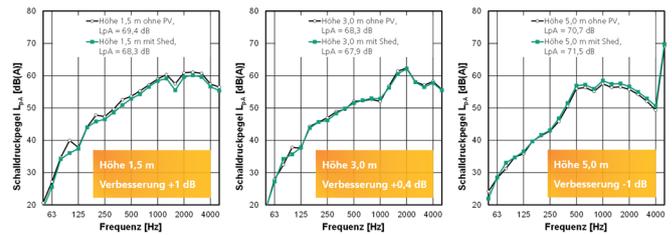


Abbildung 8: Ergebnisse der Messungen mit und ohne PV-Module nach Abbildung 7 bei verschiedenen Mikrofonhöhen; links: 1,5 m; Mitte: 3,0 m; rechts: 5,0 m.

Daraus lässt sich folgern, dass die reflektierenden PV-Module, wenn sie in einem Winkel, hier von 45°, vor einer hochschallabsorbierenden Wand montiert werden, Schall von einer bodennahen Quelle von ihrer Unterseite in die schallabsorbierende Schicht und von ihrer Oberseite in Richtung »Himmel« lenken. Dadurch kommt es, je nach Entfernung von der Wand, bis zu einer bestimmten Höhe zu einer Verbesserung der Lärmsituation. Es lässt sich damit aber auch zeigen, dass die schallabsorbierende Eigenschaft der LSW durch die Shed-Anordnung der PV-Module nicht wesentlich beeinträchtigt wird. Es ist zu erwarten, dass durch variierte Anordnungen sowohl die akustischen Eigenschaften als auch der Energieertrag weiter optimiert werden können.

Diese Verbesserung kann mit den genormten Prüfverfahren zur Schallabsorption von Lärmschutzwänden nicht ermittelt und nur direkt als sogenannte Einfügungsdämpfung mit einer konstanten Schallquelle gemessen werden. Oben beschriebenes Verfahren kann später auch zur Überprüfung der qualitativen Wirksamkeit von absorbierenden LSW in der Praxis angewendet werden. Vor allem wenn sich gegenüber von Lärmschutzwänden schutzbedürftige Räumlichkeiten in Gebäuden befinden, kann so die Qualität der Lärmschutzmaßnahme beurteilt werden.

Ergebnisse der Ökobilanzierung

Die praktische Anwendung der Ökobilanzierung orientiert sich an den Vorgaben der DIN EN 15978 [3]. Es wird eine vereinfachte Ökobilanz durchgeführt. Die betrachteten Lärmschutzwände folgen der nachfolgend beschriebenen Grundkonstruktion, wobei die eigentlichen für den Lärmschutz verwendeten Elemente aus Beton, mit Holz oder mit Aluminium gefertigt sind. Die hier durchgeführte Ökobilanz bedient sich im Wesentlichen der Daten für Gebäude, so dass diese Ansätze aus dem Gebäudebereich für die Bilanz der LSW übernommen werden. Als funktionelle Einheit hat sich dabei die Bilanzierung bezogen auf einen m² Nettoraumfläche NRF gem. DIN 277 für einen Zeitraum von einem Jahr etabliert. Die führenden Zertifizierungssysteme in Deutschland des DGNB und des BNB, haben diesen Ansatz beispielsweise adaptiert [4, 5], weshalb die Ergebnisse der vorliegenden Ökobilanz ebenfalls auf einen m² NRF in einem Jahr bezogen werden.

Das Bilanzierungsmodell setzt sich aus den Schichtaufbauten der einzelnen Bauteile der Lärmschutzwand zusammen. Dabei steht eine Bohrpfahlgründung mit 70 cm Durchmesser

stellvertretend für das Fundament und ein Betonsockel für den Anfahrtschutz. Die Wand selbst wird mit Stahlstützen und den schallabsorbierenden Bauteilen Holz- oder Aluminiumkassetten, gefüllt mit Mineralfasern, sowie (offenporigen) Betonelementen beschrieben. Zusätzlich kommen die PV-Module mit unterschiedlichen Flächenanteilen, je nach der in Abbildung 2 dargestellten Konfiguration.

Die Systemgrenze für die Ökobilanz folgt den empfohlenen Lebenszyklusphasen für die Ökobilanz gemäß DIN EN 15978 [3], wie schematisch in Abbildung 9 dargestellt. Dabei fließen gemäß dieser Norm die Umweltwirkungen in der Herstellungsphase (A1-3), der Nutzungsphase (ohne die Module B6 und B7), der Entsorgungsphase (C) sowie Vorteile und Belastungen (D) außerhalb der Systemgrenzen in das Ökobilanz-Modell mit ein.

Den Maßgaben des DGNB-Systems folgend wurden Transporte zur Baustelle, Produkte, Prozesse und Aufwendungen, die sich nur auf den Baustellenbetrieb beziehen, vorbereitende Arbeiten und der Bodenaushub bei der Ökobilanz nicht berücksichtigt [5].

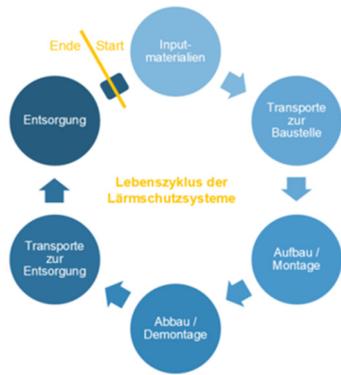


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Produktsystems mit den betrachteten Lebenswegphasen und den Systemgrenzen.

Aufbauend auf den Angaben im ÖKOBAUDAT-Datensatz für PV-Module wurde eine jährliche Solarstrahlungsenergie von 1.000 kWh/m²*a angenommen, was einem ungünstigen Standort in Deutschland entspricht. Der Wirkungsgrad wurde mit 13,3 % angesetzt und ergibt 165 Wp Nennleistung. Bei einem Gesamtwirkungsgrad der Solaranlage von 75 % erhält man damit eine sehr konservative Abschätzung für den Ertrag pro Jahr von 100,7 kWh/m². Der Betrachtungszeitraum für die Lärmschutzwand inklusive PV-Anlage beträgt 20 Jahre. Die Verwendung und Verwertung der Komponenten am Lebensende sind im Wesentlichen von ihrer Zusammensetzung abhängig. Für die verwendeten Bauprodukte wurden die den verwendeten Datensätzen der ÖKOBAUDAT hinterlegten Wege und Werte am Lebensende zugeordnet.

Die modellierten Schichten wurden mit den Datensätzen der ÖKOBAUDAT, Version 2021/II [5] verknüpft. Bei den verwendeten Datensätzen wurde ein konservativer Ansatz gewählt (Worst-Case-Prinzip) [3]. Das Ökobilanz-Modell für die Optionen der energetischen Ertüchtigung wurde abschließend in der Software Generis® auf Basis der Informationen der Sachbilanz abgebildet [6]. Abbildung 10

zeigt beispielhaft die auf dieser Basis gewonnenen prozentualen Anteile der einzelnen Bauteile auf das gesamte GWP der jeweiligen Konstruktion. Bei Belegung zu 100 % mit PV-Modulen bestimmen diese zum Großteil das GWP der Gesamtkonstruktion.

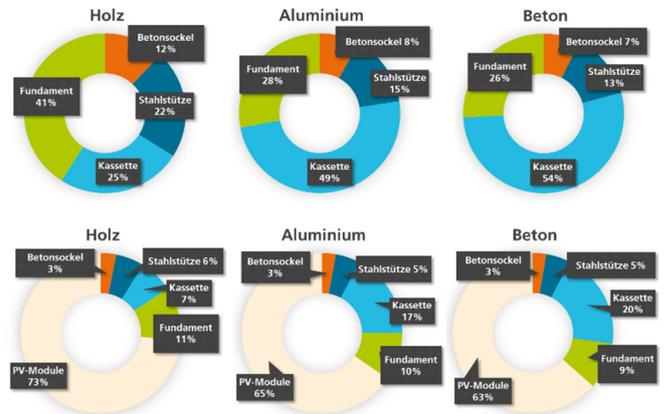


Abbildung 10: Beispiel für den CO₂-Fußabdruck (GWP) der Konstruktionen mit prozentualen Anteil der Bauteile ohne PV (oben), mit 100 % PV-Belegung (unten).

Im Ergebnis zeigen die Werte in Tabelle 1, dass sich die GWP-Neutralität der gewählten Beispiele an Konstruktionen und PV-Anordnungen im Rahmen von minimal ca. 6 Jahren und maximal ca. 10 Jahren bewegt. Damit ist selbst im schlechtesten Fall eine Klimaneutralität der Bauwerke in der Hälfte der angesetzten Lebensdauer erreichbar.

Tabelle 1: GWP-Neutralität in Jahren für einen jährlichen Stromertrag in Höhe von 100,7 kWh/m² PV-Modul.

Jahre bis zur Klimaneutralität [a]		Konstruktion		
Variante	Anteil PV [%]	Beton	Alu	Holz
1	0	-	-	-
2	44	9,8 a	10,3 a	9,2 a
3	88	8,4 a	8,9 a	7,8 a
4	320	6,3 a	6,4 a	6,1 a

Literatur

- [1] Koehler, M. et al: Klimaneutraler Lärmschutz – Nachhaltige Optimierung und ganzheitliche Bilanzierung von Lärmschutzbauwerken. IBP-Bericht B-AK 5/2022.
- [2] DIN EN 1793-T1-5: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin.
- [3] DIN EN 15978:2012: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode. Beuth Verlag, Berlin.
- [4] VDI 2067 Blatt 1:2012-09: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung, Beuth Verlag, Berlin.
- [5] Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI): Ökobau.dat. V 2021-II. <https://www.oekobaudat.de/>.
- [6] Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP): GENERIS v. 1.0. Stuttgart, 2020 <https://www.generis-solution.eu>.