



UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES
UPPER AUSTRIA

MASTERSTUDIENGANG

Bauingenieurwesen im Hochbau

**Leichte Tragstrukturen für PV-Anlagen
über Verkehrsflächen - Minimierung
ökologischer Kosten**

ALS MASTERARBEIT EINGEREICHT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur für technisch-wissenschaftliche Berufe (Dipl.-Ing.)

von

Sebastian Üblacker, B.Sc.

Wels, September 2024

Betreuung der Arbeit durch

FH-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Jaksch

VORWORT/DANKSAGUNG

Mit der vorliegenden Masterarbeit "Leichte Tragstrukturen für PV-Anlagen über Verkehrsflächen – Minimierung ökologischer Kosten" schließe ich eine intensive und bereichernde Studienzeit ab. Ich hoffe, damit einen kleinen Beitrag zu einer umweltfreundlicheren Bauwirtschaft und Energiegewinnung leisten zu können. Mein besonderer Dank gilt FH-Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Stefan Jaksch, Professor für konstruktiven Ingenieurbau und Bauinformatik an der Fachhochschule Oberösterreich. Seine Betreuung, sein wertvoller Input und seine konstruktive Kritik während des Entstehungsprozesses waren für mich von unschätzbarem Wert. Herrn DI Udo Zauner von one2zero GmbH danke ich für den Anstoß und die Unterstützung in der Ideenfindungsphase dieser Arbeit. Abschließend möchte ich meiner Familie meinen tiefen Dank aussprechen, die mich während meiner gesamten Studienzeit tatkräftig unterstützt hat.

Im Zuge der Korrekturlesung der Arbeit wurde Künstliche Intelligenz (KI) für die Rechtschreibprüfung sowie zur sprachlichen und grammatikalischen Korrektur verwendet. Hierfür wurde Mimir Mentor (2024) und CompanyGPT, OpenAI, Version GPT-4 Omni (August 2024) verwendet. Als Prompt für ChatGPT wurde folgende Anweisung verwendet: Analysiere den folgenden Textauszug aus einer wissenschaftlichen Abschlussarbeit: [...] Bitte führe folgende Schritte durch:

1. Gib den ursprünglichen Text unverändert wieder. Identifiziere und nummeriere dabei sprachliche und strukturelle Schwächen im Text. Markiere diese direkt im Text mit [1], [2], usw.
2. Erläutere die identifizierten Schwächen in einer separaten Liste, mit Bezug auf die Nummerierung.
3. Erstelle eine verbesserte Neufassung des Textes. Verwende dabei ausschließlich Informationen aus dem Originaltext. Du darfst umstrukturieren und umformulieren, aber keine neuen Inhalte hinzufügen.
4. Erläutere die vorgenommenen Verbesserungen.
5. Gib an, zu wie viel Prozent du sicher bist, dass nur Informationen aus dem Originaltext verwendet wurden. Befolge diese Anweisungen genau und führe keine zusätzlichen Aktionen aus.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Die vorliegende Arbeit ist mit dem elektronisch übermittelten Textdokument identisch.



.....
Sebastian Üblacker

Wels, September 2024

KURZFASSUNG

Der Klimawandel stellt eine zentrale Herausforderung der Menschheit im 21. Jahrhundert dar. Um dieser zu begegnen, ist es erforderlich, die gesamte Energiebereitstellung auf erneuerbare Energien umzustellen. Neben dem Ausbau von Wind- und Geothermieenergie muss insbesondere die Erzeugung von Solarenergie forciert werden. In Österreich müssen bis 2030 rund 11,5 Terawattstunden (TWh) und bis 2050 weitere 20 TWh an erneuerbarer Energiekapazität installiert werden, um Klimaneutralität im Energiesektor zu erreichen. Die Installation von Photovoltaikanlagen soll vorwiegend auf bereits versiegelten Flächen wie Gebäuden und Verkehrsflächen erfolgen. Für Verkehrsflächen sind Tragkonstruktionen zur Überdachung erforderlich, deren Herstellung Energie benötigt und Treibhausgasemissionen verursacht. Diese Konstruktionen müssen sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch optimiert werden, um eine positive Gesamtbilanz zu gewährleisten.

Das Ziel dieser Arbeit ist die CO₂-Äquivalent- und Energiebilanzierung für Tragsysteme von Photovoltaikanlagen über Verkehrssystemen. Basierend auf bautechnischen Tragkonzepten und einer Marktanalyse werden beispielhafte Tragkonzepte aus Holz und Metall für eine Beispielparkplatzanlage baustatisch ausgelegt. Die ermittelten Massen werden mit materialspezifischen Energie- und Emissionsdaten verrechnet. Zudem werden die durch die PV-Anlage erzielten Energie- und CO₂-Äquivalent-Einsparungen bestimmt. Abschließend werden Gesamtbilanzen erstellt und Amortisationszeiten berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Tragkonzepte und Materialien einen wesentlichen Einfluss auf die Energie- und CO₂-Äquivalent-Emissionen hat. Holzkonstruktionen weisen deutlich geringere Energieaufwände und Emissionen auf und amortisieren sich innerhalb eines Jahres. Bei Stahlkonstruktionen variiert die Amortisationszeit je nach Ausführungsart: Leichte Seilkonstruktionen amortisieren sich in knapp ca. 2,5 Jahren, während Rahmen- oder auskragende Konstruktionen 2,6 bis 45 Jahre benötigen. Zu beachten ist, dass die angegebenen Amortisationszeiträume nur die Tragkonstruktion zur Überdachung berücksichtigen. Für eine vollständige Bilanz müssen auch die Aufwände für Photovoltaikanlagen berücksichtigt werden.

ABSTRACT

Climate change is a key challenge facing mankind in the 21st century. In order to meet this challenge, it is necessary to switch the entire energy supply to renewable energies. In addition to the expansion of wind and geothermal energy, the production of solar energy in particular must be stepped up. In Austria, around 11.5 terawatt hours (TWh) of renewable energy capacity must be installed by 2030 and a further 20 TWh by 2050 in order to achieve climate neutrality in the energy sector. Photovoltaic systems are to be installed primarily on already sealed surfaces such as buildings and traffic areas. Traffic areas require supporting structures for roofing, the production of which requires energy and causes greenhouse gas emissions. These structures must be optimised both economically and ecologically in order to ensure a positive overall balance.

The aim of this work is the CO₂-equivalent and energy balancing of support systems for PV systems above transport systems. Based on structural support concepts and a market analysis, exemplary support concepts made of wood and metal are structurally designed for an example car park. The determined masses are offset against material-specific energy and emission data. In addition, the energy and CO₂-equivalent savings achieved by the PV system are determined. Finally, overall balances are drawn up and amortisation periods calculated.

The results show that the choice of load-bearing concepts and materials has a significant influence on the energy and CO₂-equivalent emissions. Timber constructions have significantly lower energy consumption and emissions and are amortised within one year. For steel constructions, the amortisation period varies depending on the type of construction: light cable constructions amortise in just under 2.5 years, while frame or cantilever constructions require 2.6 to 5 years. It should be noted that the specified amortisation periods only take into account the supporting structure for the roofing. For a complete balance sheet, the costs for photovoltaic systems must also be taken into account.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort/Danksagung.....	II
Kurzfassung.....	IV
Abstract.....	V
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen der Photovoltaiktechnik und bautechnische Aspekte bei der Integration an Verkehrsflächen.....	4
2.1 Nutzen der Photovoltaiktechnik bei der ökologischen Energiewende hin zur CO ₂ -Neutralität.....	4
2.2 Grundlagen der Photovoltaiktechnik.....	6
2.2.1 Entstehung von Energie und wie diese für den Nutzen der Menschheit umgewandelt werden kann.....	6
2.2.2 Funktionsweise der Photovoltaik.....	7
2.2.3 Typen von Solarzellen.....	8
2.2.3.1 Mono- & Polykristalline Solarzellen.....	8
2.2.3.2 Dünnschichtsolarzellen.....	9
2.2.3.3 Solarzellenentwicklung.....	9
2.2.4 Aufbau von Photovoltaikmodulen.....	10
2.2.5 Bestandteile einer Photovoltaikanlage.....	10
2.2.5.1 Photovoltaikmodule.....	11
2.2.5.2 Wechselrichter.....	11
2.2.5.3 Tragsystem.....	12
2.2.5.3.1 Fest installierte Photovoltaikmodule.....	12
2.2.5.3.2 Beweglich installierte Photovoltaikmodule.....	13
2.2.5.4 Systeminfrastruktur von Photovoltaikanlagen.....	14
2.2.5.5 Energiespeichersysteme.....	14
2.2.6 Einflussfaktoren auf den Energieertrag einer Photovoltaikanlage.....	15
2.2.6.1 Sonneneinstrahlung.....	15
2.2.6.2 Umwelteinflüsse.....	19
2.2.6.3 Modulqualität.....	20
2.2.7 Möglichkeiten und Herausforderungen der Photovoltaik.....	21
2.2.7.1 Ökologische Nachhaltigkeit der Photovoltaik.....	21

2.2.7.2	Technologische Fortschritte und Herausforderungen der Photovoltaik..	21
2.2.7.3	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik.....	22
2.2.7.4	Auswahl des Standorts und dem notwendigen Platzbedarf.....	23
2.2.7.5	Soziale Aspekte in Bezug zur Photovoltaik	24
2.3	Flächen zur Energieerzeugung mittels Photovoltaik.....	25
2.3.1	Gebäudehüllen und alternative Bauwerksflächen	26
2.3.2	Verkehrs- und Infrastrukturflächen	28
2.3.3	Wasser und Landwirtschaftliche Flächen.....	30
2.4	Forschung zur Umsetzung von Photovoltaikanlagen.....	31
2.5	Technische Integration der Photovoltaiktechnik an den Verkehrsflächen	32
2.5.1	Auswirkungen und Anforderungen an die Photovoltaiktechnik und der Tragkonstruktion durch den Verkehr	34
2.5.2	Auswirkungen und Anforderungen an die Verkehrsflächen durch die zusätzliche Nutzung der bereits versiegelten Flächen.....	35
2.6	Tragkonstruktion-Konzepte aus der Bautechnik.....	36
2.6.1	Tragsysteme.....	36
2.6.1.1	Rahmentragwerke.....	36
2.6.1.2	Fachwerke.....	37
2.6.1.3	Bogentragwerke.....	37
2.6.1.4	Seiltragwerke.....	38
2.6.2	Materialien für die Tragsysteme.....	38
2.6.3	Anforderung an die Produktion und Montage für Tragkonstruktionen...	38
3	Umweltbilanzierung von Tragkonstruktionen für Photovoltaikanlagen über Parkflächen.....	40
3.1	Analyse zu bestehenden Tragsystemen über Parkflächen.....	41
3.2	Statische Berechnung der Tragkonstruktionskonzepte	45
3.2.1	Definition der Parkfläche	45
3.2.2	Lastannahmen und Einwirkungen	47
3.2.2.1	Lasten durch Aufbauten der Photovoltaikanlage	48
3.2.2.2	Schneelast.....	49
3.2.2.3	Windlast.....	49
3.2.2.4	Anpralllasten durch Fahrzeuge.....	50
3.2.3	Tragkonstruktionskonzepte und deren Nachweis der Tragfähigkeiten...	50
3.2.3.1	Auskragende massive Stahlkonstruktion.....	54

3.2.3.2	Auskragende massive Holzkonstruktion	57
3.2.3.3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband.....	60
3.2.3.4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	63
3.2.3.5	Unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	66
3.2.3.6	abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben.....	69
3.3	Umweltbilanzierung der Tragkonstruktionskonzepte	72
3.3.1	Energiebilanzierung der Tragkonstruktionskonzepte.....	73
3.3.1.1	Energieaufwand bei der Herstellung der Tragkonstruktion	74
3.3.1.2	Energieertrag durch die Photovoltaikanlage	76
3.3.1.2.1	Energieertrag bei 10° Modulneigung mit Ost-West Ausrichtung	78
3.3.1.2.2	Energieertrag bei 10° Modulneigung mit Süd Ausrichtung.....	79
3.3.1.2.3	Energieertrag bei 0° Modulneigung	80
3.3.1.3	Gegenüberstellung und Berechnung der Energieamortisation der Tragkonzepte	80
3.3.2	CO ₂ -Äquivalent Bilanzierung der Tragkonstruktionskonzepte.....	85
3.3.2.1	CO ₂ -Äquivalent Emission bei der Herstellung der Tragkonstruktion.....	85
3.3.2.2	CO ₂ -Äquivalent Einsparung durch die Photovoltaikanlage	87
3.3.2.3	Gegenüberstellung und Berechnung der CO ₂ -Äquivalent Amortisation der Tragkonzepte	88
3.4	Diskussion der Umweltbilanzierung	93
3.4.1	Energiebilanzierung der Tragsysteme	93
3.4.2	CO ₂ -Äquivalent Bilanzierung der Tragsysteme.....	96
4	Schlussfolgerung	99
5	Abkürzungsverzeichnis	102
6	Abbildungsverzeichnis	103
7	Tabellenverzeichnis	107
8	Literaturverzeichnis	109
9	Anhang.....	116
9.1	Anhang A – Schnee und Wind Belastungen für den Standort Salzburg	116
9.2	Anhang B – Vollständige Nachweisführung und Berechnung der Tragstrukturen	118

9.3	Anhang C – IBO-Richtwerte (Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie)	119
-----	---	-----

1 EINLEITUNG

Der Kampf gegen den Klimawandel und seine negativen Auswirkungen wie Hochwasser, Murenabgänge, Hitzeperioden oder Wasserknappheit ist entscheidend für die langfristige Sicherung unserer Lebensgrundlage. Ein zentrales Ziel dabei ist die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energieträger, um CO₂-Neutralität zu erreichen. Einen wichtigen Beitrag hierzu kann die Photovoltaik leisten, die Sonnenenergie direkt in elektrischen Strom umwandelt. Um eine weitere Versiegelung natürlicher Flächen zu vermeiden, sollte der verbundene Flächenbedarf für Photovoltaikanlagen vorrangig durch die Nutzung bereits versiegelter Flächen gedeckt werden. Dazu gehören Gebäude sowie Verkehrsflächen wie Straßen, Schienentrassen, Geh- und Radwege und Parkplätze. Bei der Integration von Photovoltaikanlagen in Verkehrsflächen muss darauf geachtet werden, negative Wechselwirkungen wie die Verschattung der Module oder die Beeinträchtigung der Verkehrsteilnehmer:innen zu vermeiden. Zwei Hauptansätze bieten sich an: die vertikale Anbringung von PV-Modulen an den Rändern, beispielsweise in Form von Lärmschutzwänden, oder die Installation als Überdachung über der Fläche. Bei der Ausführung als Dachlösungen müssen eigene Tragkonstruktionen installiert werden, um einen freien Lichtraum unterhalb zu ermöglichen. Diese Konstruktionen können aus verschiedenen Materialien und nach unterschiedlichen baustatischen Konzepten entworfen werden.

Bei der Herstellung von Tragkonstruktionen wird Energie benötigt und Treibhausgasemissionen werden ausgestoßen. Diese Energie muss später durch den Energieertrag der Photovoltaikanlage ausgeglichen werden. Die Nutzung von Photovoltaik spart im Vergleich zum bestehenden Energiemix, der teilweise durch fossile Brennstoffe erzeugt wird, CO₂-Äquivalent-Emissionen (Eine Maßeinheit, die verwendet wird, um die Wirkung verschiedener Treibhausgase auf das Klima miteinander zu vergleichen. Sie drückt die Menge eines Treibhausgases in Bezug auf die Menge an CO₂ aus, die dieselbe Erwärmungswirkung hat. Dies ermöglicht es, die Klimawirkung verschiedener Gase wie Methan oder Lachgas in eine einheitliche Größe umzurechnen) ein. Dies kann mit den Emissionen bei der Tragwerkserstellung gegenübergestellt werden. Je nach baustatischem System und verwendeten Baustoffen variieren die verursachten Energie- und Emissionsmengen erheblich und beeinflussen die ökologische Bilanz. Um zukünftige Tragkonstruktionen für Überdachungen im Rahmen des Photovoltaikausbaus zu wählen und

zu gestalten, muss eine Bilanzierung der Energie- und CO₂-Äquivalenz-Emissionen für die gängigen baustatischen Systeme und Materialien erstellt werden.

Diese Bilanzierung und die Berechnung der Amortisationsdauer (Prozess der vollständigen Abtragung einer anfänglichen Belastung über einen bestimmten Zeitraum hinweg) ermöglichen die Festlegung ökologischer Auswahlkriterien. Zudem kann die grundsätzliche Frage beantwortet werden, welche Tragkonzepte durch den Ertrag der Photovoltaikanlage kompensiert werden können und wie lange dieser Ausgleich dauert. Ziele dieser Arbeit sind die Analyse und Bewertung verschiedener baustatischer Tragkonstruktionskonzepte in Bezug auf die ökologischen Aspekte CO₂-Äquivalenz und Energie. Die Bilanzierung und Amortisationsdauer sollen für die jeweiligen Tragkonzepte berechnet werden. Die Wirtschaftlichkeit der Tragsysteme wird in dieser Arbeit nicht separat analysiert, da dies bereits in einem Forschungsprojekt der D-A-CH-Kooperation (Haider et al. 2021) für hochrangigen Straßen mit PV-Überdachung ausführlich untersucht wurde. Diese Studie bewertet die Anforderungen, Vor- und Nachteile sowie die Wirtschaftlichkeit eines auf einem Stahlrahmen basierenden Konzepts. Eine Bilanzierung der Energie- und CO₂-Äquivalente ist im Ergebnisbericht zu dieser Studie nicht enthalten.

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen der Photovoltaik und Tragkonstruktionskonzepte aus der Bautechnik erläutert. Dazu gehören die Nutzung der Photovoltaik bei der Energiewende, das Funktionsprinzip der Photovoltaik mit ihren Komponenten, die Vor- und Nachteile, der Flächenbedarf sowie die technische Integration der Photovoltaik an Verkehrsflächen. Basierend auf diesen Konzepten und einer Marktanalyse zu vorhandenen Tragsystemen für Photovoltaiküberdachungen in Abschnitt 3.1 werden beispielhafte Tragkonzepte aus Holz und Metall für eine Parkplatzanlage baustatisch ausgelegt. Die untersuchten Tragkonzepte umfassen eine auskragende massive Stahlkonstruktion, eine auskragende massive Holzkonstruktion, einen Stahlrahmen mit Aussteifungsverband, einen Holzrahmen mit Aussteifungsverband, einen unterspannten Stahlrahmen mit Aussteifungsverband sowie eine abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben. Zur Bewertung der Tragkonstruktionen werden Parkflächen herangezogen, da diese geringere Anforderungen und Belastungen aufweisen, weil auf Parkflächen keine dynamischen Belastungen aus dem Verkehr herrschen. Dadurch erscheint eine niederschwellige Umsetzung möglich. In Abschnitt 3.2 werden die Massen der Tragstrukturen berechnet und mit materialabhängigen Energie- und Emissionsdaten multipliziert. Die Energie- und CO₂-Äquivalent-Einsparungen durch die Photovoltaikanlage werden in Abschnitt 3.3 ermittelt. Mit den gewonnenen Daten werden

abschließend Bilanzierungen und Amortisationszeiten errechnet sowie eine Bewertung der errechneten Daten in Kapitel 3.4 durchgeführt.

2 GRUNDLAGEN DER PHOTOVOLTAIKTECHNIK UND BAUTECHNISCHE ASPEKTE BEI DER INTEGRATION AN VERKEHRSFLÄCHEN

2.1 NUTZEN DER PHOTOVOLTAIKTECHNIK BEI DER ÖKOLOGISCHEN ENERGIEWENDE HIN ZUR CO₂-NEUTRALITÄT

Zur Bekämpfung des Klimawandels, eines der drängendsten globalen Probleme des 21. Jahrhunderts, sind erhebliche Anstrengungen erforderlich. Die Erderwärmung verändert die Umwelt und verursacht einschneidende Wetterextreme wie Hochwässer, Murenabgänge, Hitzeperioden und Wasserknappheit. Um den Klimawandel abzuschwächen oder im besten Fall zu stoppen, muss die Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur auf 1,5° begrenzt werden. Dies kann nur durch langfristige Emissionsneutralität erreicht werden, was bedeutet, dass die Abgabe von Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid gleich oder geringer ist als die Aufnahme durch natürliche oder künstliche Systeme. In Europa wird diese Vorgabe durch den sogenannten „Grünen Deal“ im Klimaschutzgesetz geregelt, der bis zum Jahr 2030 eine Schadstoffreduktion um 55 % und bis zum Jahr 2050 CO₂-Neutralität vorsieht. (Europäisches Parlament 2023, online)

In Österreich wird der Energiebedarf zu etwa 66 % aus fossilen Brennstoffen gedeckt (Stand September 2022). Vor allem in den Sektoren Verkehr, Heizen und Produktion werden nicht erneuerbare Energieträger verwendet. Der primäre Strombedarf wird zu 75 % aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt (Stand September 2022). Damit der gesamte Energiebedarf in Österreich aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden kann, muss der Strombedarf um 90 % steigen. Dies basiert auf der Annahme, dass in der Industrie, wo Energiequellen mit hoher Energiedichte benötigt werden, überwiegend Wasserstoff zum Einsatz kommt. In der Strombedarfsanalyse wird jener Wasserstoff nur zu einem Viertel direkt in Österreich produziert. Daraus ergibt sich ein Strombedarf von 140 TWh. (Österreichs E-Wirtschaft 2022, S. 8–9)

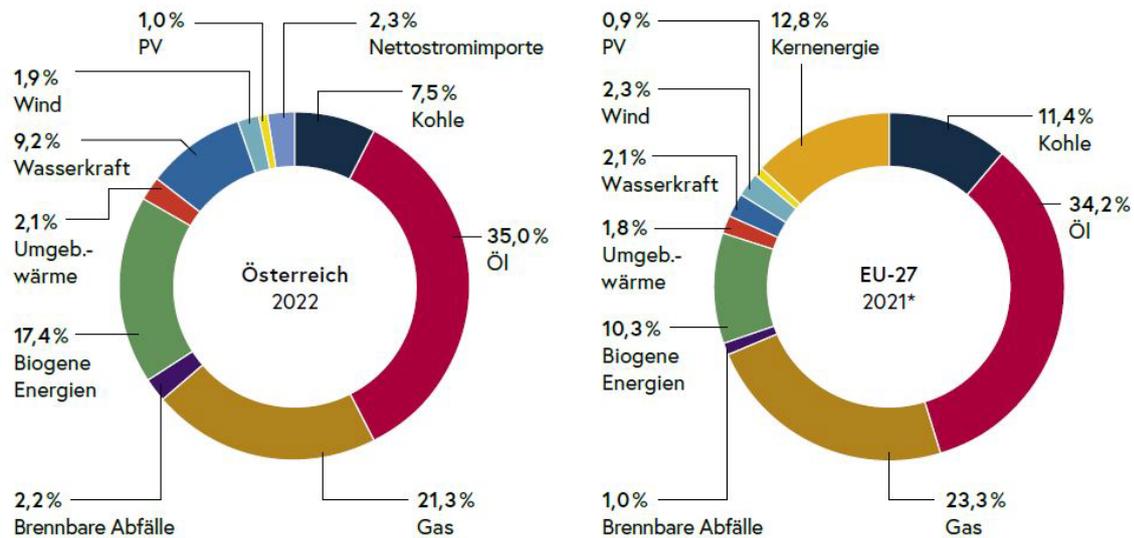


Abb. 1: Bruttoinlandsverbrauch im Vergleich - Anteile der Energieträger in Österreich und EU-27 in Prozent (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) 2023, S. 12)

Um den Strombedarf in Österreich von 140 TWh Erzeugungsmenge bzw. 70 GW installierter Leistung aus erneuerbaren Energiequellen zu decken, ist ein Ausbau von Wasserkraft, Photovoltaik, Windkraft, Geothermie und anderen alternativen Quellen notwendig (Österreichs E-Wirtschaft 2022, S. 12).

In einem Positionspapier des WWF Österreichs, Global 2000 und Greenpeace werden folgende Potenziale beim Ausbau von erneuerbaren Energiequellen angeführt:

- Wasser: 2 TWh bis 2030
- Wind: 6 TWh bis 2030 und zusätzlich 7 TWh bis 2050
- Photovoltaik: 11,5 TWh bis 2030 und zusätzlich 20 TWh bis 2050
- Bio: 3,2 TWh
- Geothermie: 7,7 TWh bis 2050

Die Potenziale bei der Wasserkraft, sind stark ausgeschöpft. Dadurch wird der Ausbau der Energieerzeugung durch Wind und Sonne eine wichtige Rolle bei der klimaneutralen Energieerzeugung spielen. (Umweltverband WWF Österreich 2021, S. 4–5)

Der Photovoltaikausbau muss dabei im Einklang mit der Natur erfolgen. Es ist wichtig, den Flächenverbrauch für die Energiegewinnung durch die Photovoltaikpaneele gering zu halten oder ganz zu vermeiden. Um diesen Widerspruch aufzulösen, müssen bereits versiegelte Flächen für die Energiegewinnung genutzt werden. Gebäude, Parkflächen, Straßen,

Autobahnen und Bahntrassen können hier in Betracht gezogen werden. (Umweltverband WWF Österreich 2021, S. 2)

Leistungsschwankungen bei der Energieerzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen sind ein wichtiger Faktor. Im Gegensatz zu Kohle-, Gas- und Atomkraftwerken, die eine konstante Leistung aufweisen, ist die Leistungserbringung bei natürlichen Kraftwerken starken Schwankungen ausgesetzt. Photovoltaikanlagen können Strom nur bei Tageslicht erzeugen und Windräder nur bei Wind. Diese starken Schwankungen muss das Stromsystem der Zukunft auffangen können. Dies erfordert ein hohes Maß an Speicherkapazität und ein dezentrales Energiesystem, da kleine Kraftwerke verteilt sind. (Kurwan und Tönjes Annika 2023, online)

2.2 GRUNDLAGEN DER PHOTOVOLTAIKTECHNIK

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Grundlagen der Photovoltaiktechnik detailliert behandelt. Es wird auf die Funktionsweise, die verschiedenen Möglichkeiten und Herausforderungen sowie die Einflussfaktoren auf den Energieertrag eingegangen.

2.2.1 ENTSTEHUNG VON ENERGIE UND WIE DIESE FÜR DEN NUTZEN DER MENSCHHEIT UMGEWANDELT WERDEN KANN

Auf der Sonnenoberfläche finden mehrere physikalische Prozesse statt. Die Energiegewinnung beruht hierbei auf der Kernfusion, bei der Wasserstoffatome zu Heliumatomen verschmelzen. Ein überwiegender Teil der Masse der Wasserstoffatome wird bei der Kernschmelze mit der Einstein'schen Energie-Masse-Gleichung $E = m \cdot c^2$ zu Energie umgewandelt. Diese Energie wird als elektromagnetische Strahlung ins Weltall abgegeben und erreicht die Erdoberfläche. (Watter 2022, S. 12)

Die Strahlungsenergie, welche auf die Erde trifft, kann mithilfe unterschiedlicher Technologien in elektrische oder Wärmeenergie umgewandelt werden. Wärmeenergie wird durch Sonnenkollektoren erzeugt, die die einfallende Strahlungsenergie in Warmwasser umwandeln. Elektrische Energie kann durch organischen Farbstoffen, Solarthermie oder Solarzellen erzeugt werden. Organische Farbstoffe ermöglichen die technische Photosynthese, bei der Zellen aus organischem Material direkt elektrische Energie erzeugen. Bei der Solarthermie wird solare Strahlung mithilfe von Spiegeln gebündelt, um Wasser an einem konzentrierten Punkt zu verdampfen. Der entstehende Wasserdampf treibt Turbinen an, die Strom erzeugen. (Crastan und Höckel 2022, S. 454–457) Die direkte Stromerzeugung über

Solarzellen wird im Abschnitt 2.2.2 Funktionsweise der Photovoltaik auf der Seite 7 genauer erläutert.

2.2.2 FUNKTIONSWEISE DER PHOTOVOLTAIK

Die Energie aus der solaren Strahlung, die von der Sonne auf die Erde trifft, besteht aus Photonen. In den Photovoltaikpaneelen sind Solarzellen aus Halbleitermaterialien wie Silizium verbaut. Diese Solarzellen bestehen aus zwei Schichten, die jeweils positiv und negativ geladen sind, was als Positiv-Negativ-Übergang bezeichnet wird. Die von der Sonne abgestrahlten Photonen treffen auf die Solarzelle und geben Energie an die Solarzelle ab. Dieser sogenannte photovoltaische Effekt löst Elektronen aus dem Halbleitermaterial heraus, wodurch freie Elektronen und Elektronenlöcher entstehen. Durch die gegengesetzt geladenen Schichten und den Elektronenlochpaaren entsteht ein elektrisches Spannungsfeld. Über die Kontakte an den Solarzellen fließen die Elektronen und Elektronenlöcher ab, wodurch Gleichstrom erzeugt wird. Die Funktionsweise der Photovoltaik ist in der Abb. 2 auf der Seite 7 schematisch dargestellt. Ein ganzes Photovoltaikpanel besteht aus mehreren miteinander in Serie und parallel verbundenen Solarzellen. (Watter 2022, S. 17–19)

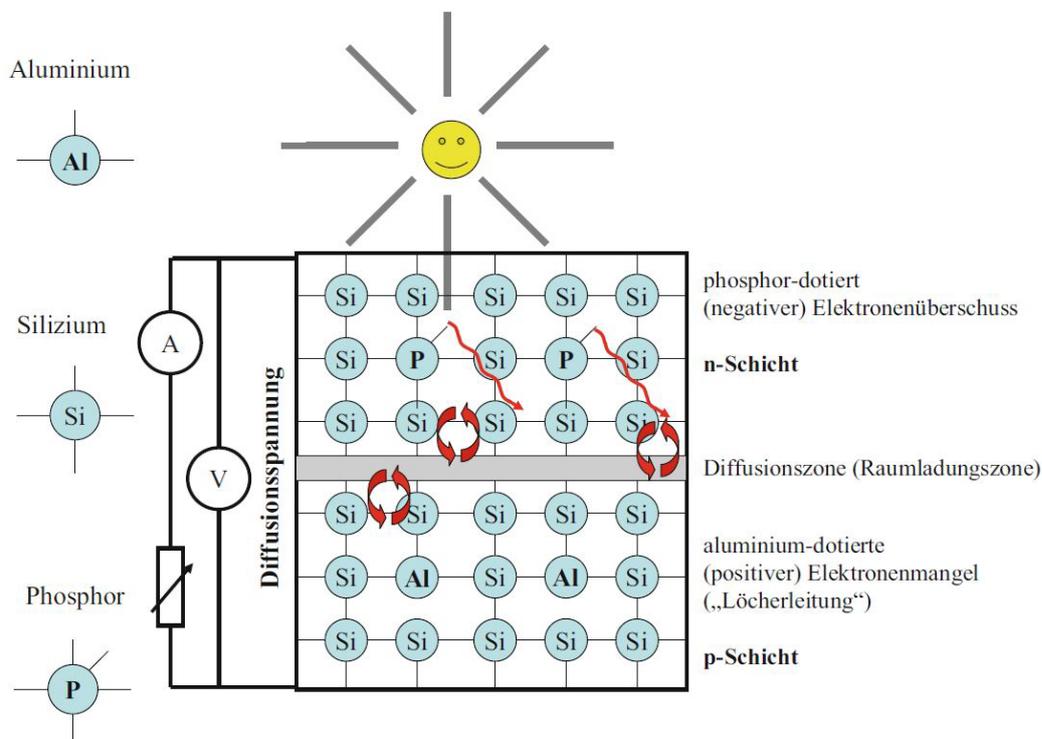


Abb. 2: schematischer Aufbau des Photovoltaikeffekts (Watter 2022, S. 20)

2.2.3 TYPEN VON SOLARZELLEN

Man unterscheidet bei den Solarzellentechnologien mehrere Typen. Die marktführende Technologie der Solarzellentypen ist mit einer über 80-prozentigen Mehrheit die kristalline Solarzelle. Eine weitere Technologie, die ihre Anwendung findet, ist die Dünnschichtsolarzelle. Die Forschung im Bereich der Solarzellen entwickelt sich in verschiedene Richtungen, wobei intensiv an neuen Technologien gearbeitet wird. Dabei sind Multijunction-Zellen, konzentrierte Solarzellen, organische Solarzellen und Farbstoff Solarzellen im Fokus der Forschung. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 43)

2.2.3.1 MONO- & POLYKRISTALLINE SOLARZELLEN

Die am Photovoltaikmarkt am weitesten verbreitete kristalline Solarzelle kann in zwei Typen unterteilt werden: monokristalline und polykristalline Zellen. Dies ist auf ihre Struktur zurückzuführen. Monokristalline Zellen haben ein einheitliches Gefüge, während polykristalline Zellen ein größeres Korngefüge aufweisen. Damit die Elektronenpaare fließen können, sind bei der polykristallinen Struktur Aluminiumverbindungen zwischen den Zellen verbaut. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 43–44)

Siliziumdioxid dient im Herstellungsprozess als Rohstoff und wird durch den chemischen Prozess der Reduktion mit Kohlenstoff aus Quarzsand hergestellt. Nach weiteren Reinigungsprozessen wird es zu solar reinem Silizium verarbeitet. Die Unterscheidung in Mono- und Polystruktur erfolgt im Kristallisationsprozess. Monokristalline Strukturen werden durch Einschmelzen oder Aufschmelzen von solar reinem Silizium und anschließend hinzugeben eines Keims, wodurch Einkristalle gebildet werden, hergestellt. Polykristalline Strukturen werden durch Schmelzen und anschließendem Gießverfahren hergestellt. Im Erstarrungsprozess entsteht eine grobkristalline Struktur im Siliziumblock. Beide kristalline Solarzellentypen werden anschließend in Scheiben geschnitten. Die Scheiben werden auf einer Seite positiv und auf der anderen Seite negativ angereichert, was mithilfe von Bor und Phosphor erfolgt. Bei beiden kristallinen Solarzellen werden die Scheiben positioniert und der Kontakt zueinander durch Siebdruck hergestellt. Im letzten Produktionsschritt werden die Solarzellen mit einer Antireflexionsbeschichtung versehen. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 44–49)

2.2.3.2 DÜNNSCHICHTSOLARZELLEN

Die Unterscheidungsmerkmale der Dünnschichtsolarzellen zu den kristallinen Solarzellen liegen in der Schichtstärke und dem Herstellungsprozess. Glas-, Metall- oder Kunststofffolien dienen als Unterlage, auf denen das Halbleitermaterial aufgebracht wird. Zum Einsatz kommen Silizium, Kupferverbindungen oder Cadmiumtellurit. Der genaue Herstellungsprozess unterscheidet sich je nach Unterlage und Halbleitermaterial. Alle Herstellungsprozesse vereint jedoch der wesentliche Vorteil der geringen Halbleiterschichtdicke und dem fehlenden Zerspanungsprozess. Daraus ergibt sich ein geringer Rohstoffverbrauch. Dies kann in Zukunft angesichts der Ressourcenknappheit ein wesentlicher Vorteil sein. Der wesentliche Nachteil der Dünnschichtsolarzellen im Vergleich zu den kristallinen Solarzellen ist der geringe Wirkungsgrad. Dadurch ist die Flächeninanspruchnahme höher, um dieselbe Energiemenge zu erzeugen. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 50–52)

2.2.3.3 SOLARZELLENENTWICKLUNG

Die Herstellung von Solarzellen hat sich in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert. Die Wirkungsgrade wurden gesteigert und die Herstellungskosten für Solarmodule durch verbesserte Produktionsanlagen und Skalierungseffekte deutlich reduziert. Es werden jedoch auch neuartige Solarzellen entwickelt. Multijunction-Zellen zielen darauf ab, den Wirkungsgrad der Energiegewinnung zu erhöhen. Dabei werden mehrere Halbleiterschichten übereinander mit unterschiedlichen Abständen angeordnet. Der Herstellungsprozess ist jedoch kostenintensiv. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 54–55)

Mithilfe von konzentrierenden Solarzellen kann Sonnenlicht in einer zuvor angebrachten Einheit gebündelt und anschließend auf die Solarzelle projiziert werden. Dadurch kann die kostenintensive Solarzelle besser genutzt werden und es wird eine geringere Anzahl an Solarzellen benötigt. Der Aufwand dieses Konzepts ist jedoch höher, da die Solareinheit dem Sonnenlicht ausgerichtet werden muss und zusätzlich eine Kühlung erforderlich ist. Der Konzentrationsfaktor der gebündelten Strahlung ist bei ca. 500. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 55–56)

Im Gegensatz zu den oben genannten Technologien benötigen organische Solarzellen keine Halbleiterrohstoffe wie Silizium. Stattdessen werden Kohlenstoffverbindungen als Halbleitermaterial verwendet. Zwei verschiedene Moleküle fungieren als Elektronenspender und Elektronenempfänger. Bei organischen Solarzellen bewegen sich die Elektronen

langsamer zwischen den freien Elektronen und den Elektronenlöchern. Der Einsatz von Energie während der Produktion der Solarzellen ist wesentlich kleiner. Allerdings ist die Leistungsfähigkeit ebenfalls geringer und auch die Dauer der Leistungserbringung ist auf drei Jahre beschränkt. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 56–57)

Eine weitere Technologie ist die Farbstoffsolarzelle. Als Trägermaterial fungieren jeweils zwei Glasplatten, die mit Elektronen versehen sind. Dazwischen befindet sich eine Lösung, die den Elektronentransport bewerkstelligt. Ähnlich zu den organischen Zellen besitzen sie eine geringe Leistungsfähigkeit, bei niedrigen Produktionskosten. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 57–58)

2.2.4 AUFBAU VON PHOTOVOLTAIKMODULEN

Die im Punkt 2.2.3 ab der Seite 8 beschriebenen Solarzellen werden zu größeren Paketen zu Modulen verbunden, indem sie in Reihe und parallel geschaltet werden. Einzelne Solarzellen erzeugen unter Einwirkung von Strahlungsenergie von der Sonne, nur eine geringe Spannung. Um die erzeugten Spannungen für technische Geräte nutzbar zu machen, müssen die Solarzellen verschaltet werden, sodass die Spannungen addiert und die gewünschte elektrische Leistung erreicht wird. In Reihe geschaltete Solarzellen addieren die Spannungen, während parallel geschaltete Solarzellen die Stromstärke addieren. Die Anzahl der in Reihe und parallel geschalteten Solarzellen in einem Modul hängt von der gewünschten Stromstärke und Spannung ab. Nach der Verschaltung werden die Solarzellen durch Kunststoffschichten verkapselt, um sie vor Umwelteinflüssen zu schützen. An der Vorderfläche wird ein vorgespanntes Glas mit einer Lichtdurchgangsrate von über 95 % verwendet. An der Rückseite wird entweder eine Kunststofffolie oder eine weitere Glasschicht verwendet, um teilweise lichtdurchlässige Flächen zu schaffen, die beispielsweise als Fassadenelemente dienen können. Um die Stabilität der Module zu gewährleisten, werden zusätzlich Profile aus Aluminium an den Rändern befestigt. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 64–67)

2.2.5 BESTANDTEILE EINER PHOTOVOLTAIKANLAGE

Um aus Strahlungsenergie, die von der Sonne auf die Erde gelangt, elektrische Energie zu erzeugen, müssen verschiedene Bestandteile im Verbund zusammenwirken (siehe Abb. 3 auf der Seite 11). Die nachfolgenden Kapitel beschreiben diese Bestandteile.

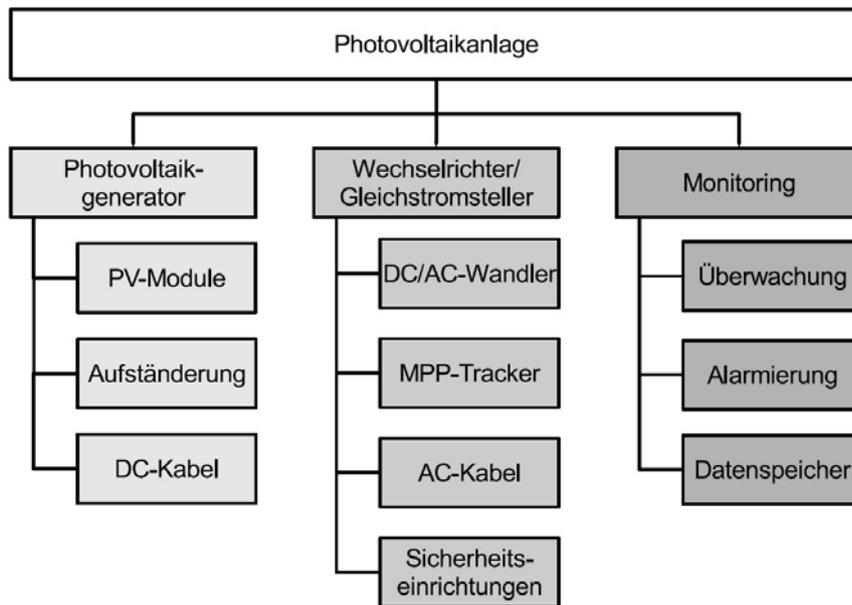


Abb. 3: Bestandteile einer Photovoltaikanlage (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 62)

2.2.5.1 PHOTOVOLTAIKMODULE

Die Photovoltaikmodule und deren Aufbau werden im Punkt 2.2.3 und 2.2.4 detailliert erläutert. Ähnlich wie bei der Funktionsweise der einzelnen Module, bei denen die Solarzellen miteinander verbunden sind, werden auch Photovoltaikmodule miteinander verschaltet. Je nach benötigter Stromstärke und Spannung werden sie in Reihe oder parallel gekoppelt. Die Photovoltaikmodule werden über Gleichstromverkabelung an den vorgesehenen Steckpunkten verbunden. (Crastan und Höckel 2022, S. 497)

2.2.5.2 WECHSELRICHTER

Die Grundfunktion eines Wechselrichters in einer Photovoltaikanlage besteht darin, die von den Photovoltaikmodulen erzeugte Gleichspannung in Wechselspannung zu transformieren. Alle gängigen Endverbraucher arbeiten mit Wechselspannung. Alle gängigen Endverbraucher arbeiten mit Wechselspannung. Durch gezielte Steuerung lässt sich eine Sinuskurve der Stromspannung erzeugen. Dadurch entsteht der einspeise fähige Wechselstrom. Der erzeugte Strom kann entweder direkt von einem Stromabnehmer verbraucht oder der überschüssige Strom in das öffentliche Netz eingespeist werden. Dafür werden jeweils spezielle Wechselrichter benötigt. Je nach Größenordnung der Photovoltaikanlage wird der erzeugte Strom in das öffentliche Nieder- oder Mittelspannungsnetz eingespeist. Weitere Funktionen des Wechselrichters sind die Kontrolle, Regulierung und Monitoring des transformierten Stroms. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 71–73)

2.2.5.3 TRAGSYSTEM

Das Tragsystem der Photovoltaikmodule wird je nach Einsatzort und Belastung ausgewählt. Es gibt grundsätzlich zwei Kategorien: fest installierte und bewegliche Systeme, die an den Sonnenstand ausgerichtet werden können. Beide Systeme haben ihre Vor- und Nachteile, die im Folgenden detailliert beschrieben werden.

2.2.5.3.1 FEST INSTALLIERTE PHOTOVOLTAIKMODULE

Fest installierte Photovoltaiksysteme sind fest mit dem Untergrund verankert. Sie werden mit einem zuvor festgelegten Neigungswinkel und einer bestimmten Ausrichtung an die Himmelsrichtung fixiert. Die Konstruktion des Tragsystems ist im Vergleich zu den beweglichen Photovoltaikpaneelen einfacher, da keine mechanischen Komponenten, Steuerungs- und Messsysteme benötigt werden. Der Energieertrag richtet sich dabei nach dem Neigungswinkel, Himmelsrichtung und Standort der Photovoltaikanlage. In Mitteleuropa wird der höchste Energieertrag über das Jahr verteilt bei einer südlichen Ausrichtung und einem Neigungswinkel von 30° zur Horizontalen erzielt. Bei einer nicht horizontalen Installation der Paneele muss auf die gegenseitige Wechselwirkung durch Verdunkelung geachtet werden. Durch Schattierungen auf Photovoltaikpaneelen kann die Leistung stark abfallen. Daher müssen jene Paneelflächen oft in einer aufgelösten Struktur angeordnet werden. In gewissen Anwendungsfällen ist die Orientierung und der Winkel der Paneele durch das Einsatzgebiet vorbestimmt. Auf Dachflächen werden Photovoltaikpaneele üblicherweise auf die Dachhaut und bei Gebäudefassaden auf die Wandfläche abgestimmt. Bei ebenen Dächern oder freien Arealen, bei denen die Richtung und Neigung nicht bereits vorgegeben sind, können diese frei getroffen werden. Es gibt Möglichkeiten, die Orientierung und den Neigungswinkel von Photovoltaikpaneelen auszuwählen. Die Auswahl muss aufgrund des Standorts, dem Ziel des Energieertrages und weiterer Randbedingungen wie Zusatznutzen, Belastung, eventuelles Ableiten von Regenwasser usw. erfolgen. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 69)

Fix montierte Solarmodule bieten wesentliche Vorteile. Es sind keine Mechanik- oder Steuerungskomponenten zur Ausrichtung notwendig. Dies senkt die Errichtungskosten aber auch die Betriebs- und Wartungskosten erheblich. Der Nachteil dieses Trägersystems liegt in der geringeren Leistungserbringung. Der Nachteil dieses Trägersystems liegt in der geringeren Leistungserbringung, da die maximale Leistung nur bei vertikalem Einstrahlungswinkel auf die Solarpaneele erreicht wird. Den Großteil des Tages sinkt die Leistungserbringung stark, was zu geringeren Erträgen führt. Die Produktionskosten der

Module sinken jedoch durch den Ausbau und den optimierten Herstellungsprozess signifikant. Dadurch werden die geringeren Erträge durch die niedrigeren Produktions-, Wartungs- und Instandhaltungskosten kompensiert. (Wohlfahrt, 52 & 57)

2.2.5.3.2 BEWEGLICH INSTALLIERTE PHOTOVOLTAIKMODULE

Beweglich installierte Photovoltaiksysteme werden bei den Anwendungsfällen eingesetzt, bei denen die Leistungserbringung auf dem zur Verfügung stehenden Raum im Mittelpunkt steht. Das Funktionsprinzip dieser Systeme ist die kontinuierliche Ausrichtung der Solarfläche zur Sonne. Dies kann in zwei Grundkonzepte unterteilt werden: einachsige und zweiachsige Sonnennachführung (siehe Abb. 4 auf der Seite 14). (Wohlfahrt, S. 52)

Zweiachsige Führungen sind auf Stützen angeordnet und ermöglichen eine kontinuierliche Ausrichtung orthogonal zum Einfallswinkel der Sonne. Der entscheidende Vorteil dieses Systems ist die maximale Leistungserbringung auf dem zur Verfügung stehenden Raum. Andererseits fallen hierbei hohe Installations- und Wartungskosten an. Die Auslegung des Trägersystems muss hohen Kräften durch Windbeanspruchung standhalten. (Wohlfahrt, S. 52–53)

Die einfachere Bauart ist die einachsige Führung und Montage der Module. Sie können vertikal, horizontal oder geneigt ausgeführt werden. Die mechanisch bewegliche Aufhängung mit nur einer angetriebenen Achse ist leichter auszuführen und zu dimensionieren. Die Auswahl des Systems hängt vom Standort der Photovoltaikanlage ab. Je weiter der Standort nördlich oder südlich vom Äquator liegt, desto vorteilhafter ist eine horizontale Achsführung in Nord-Süd-Richtung. Aufgrund der geneigten Erdachse und der ausgeprägteren Jahreszeiten in den nördlichen und südlichen Regionen trifft die solare Strahlung zu manchen Jahreszeiten flach oder steil auf die Erdoberfläche. Um diesen saisonalen Effekt optimal in Leistung umzuwandeln, ist eine horizontale Achsführung die ertragreichste Variante. Je näher der Standort am Äquator liegt, desto ertragreicher ist eine horizontale Führung mit Ost-West-Ausrichtung. Somit kann der tägliche Effekt der unterschiedlichen Tageszeiten am besten abgebildet werden. Je nach Standort und Ertragsanforderung kann die Achsführung auch geneigt oder vertikal ausgeführt werden. Die genaue Auswahl der Ausführung hängt von den zuvor genannten Standortbedingungen und der Kosten-Nutzen-Rechnung ab. Hierfür wird die Ertragssteigerung mit den anfallenden Mehrkosten in Relation gestellt. (Wohlfahrt, S. 52–54)

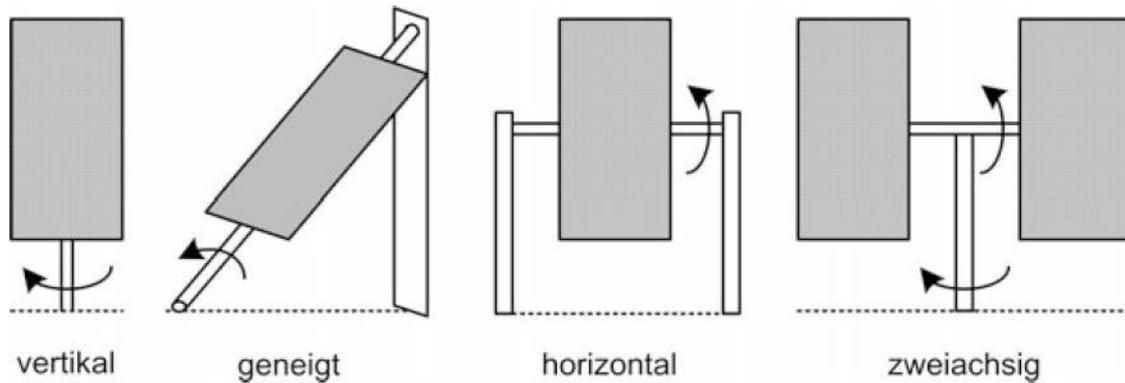


Abb. 4: Systemkonzepte für beweglich installierte Photovoltaikpaneele (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 70)

2.2.5.4 SYSTEMINFRASTRUKTUR VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN

Neben Photovoltaikmodulen, Wechselrichter und Trägersystem sind noch weitere Komponenten in einer Anlage verbaut. Zusätzlich wird ein Steuerungs- und Überwachungssystem für den sicheren Betrieb der Anlage benötigt. Damit können die Leistungserbringung aufgezeichnet und bei Störungen schnell Maßnahmen ergriffen werden. Diese Funktionen werden mittlerweile mithilfe des Wechselrichters bewerkstelligt. Am Ende einer Photovoltaikanlage wird die überschüssige produzierte Energie über den Netzanschluss in das öffentliche Netz eingespeist. Alle Verbindungen zwischen den einzelnen Solarmodulen und dem Wechselrichter erfolgen über Gleichstromkabel. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 61–64)

2.2.5.5 ENERGIESPEICHERSYSTEME

Die Energieerzeugung aus überwiegend erneuerbaren Energiequellen bringt Herausforderungen mit sich. Erneuerbare Energiequellen unterliegen starken Leistungsschwankungen. Strom aus Photovoltaikanlagen kann nur bei Sonneneinstrahlung gewonnen werden und der tatsächliche Ertrag hängt vom Wetter ab. Windenergie kann bei Windflaute ausfallen. Das Stromnetz muss hingegen immer im Gleichgewicht zwischen Erzeuger und Verbraucher gehalten werden. Um dieses Problem bewerkstelligen zu können, müssen mehrere Mechanismen ineinandergreifen. Zum einen muss das Stromnetz sicher gesteuert werden, zum anderen müssen Stromschwankungen zwischen den Regionen ausgeglichen werden. Dafür muss das Netz im europäischen Raum weiter ausgebaut werden, damit hohe Stromleistungen von ertragsstarken in verbrauchsintensive Gebiete übertragen werden können. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Speicherung von überschüssiger Energie. Mit der gespeicherten Energie können kurzfristige und langfristige Leistungsschwankungen

bei den Erzeugern abgefangen werden. Je nach notwendiger Speichermenge und Zeitdauer der Energiespeicherung können unterschiedliche Energiespeicher herangezogen werden. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024, online)

Eine Auflistung verschiedener Speichertechnologien mit deren Speichermengenpotenzial und Speicherdauer ist in der Abb. 5 auf der Seite 15 ersichtlich. Ein wesentlicher Nachteil von Energiespeicher sind die hohen Kosten und Energieverluste, die bei der Speicherung auftreten. (Watter 2022, S. 397)

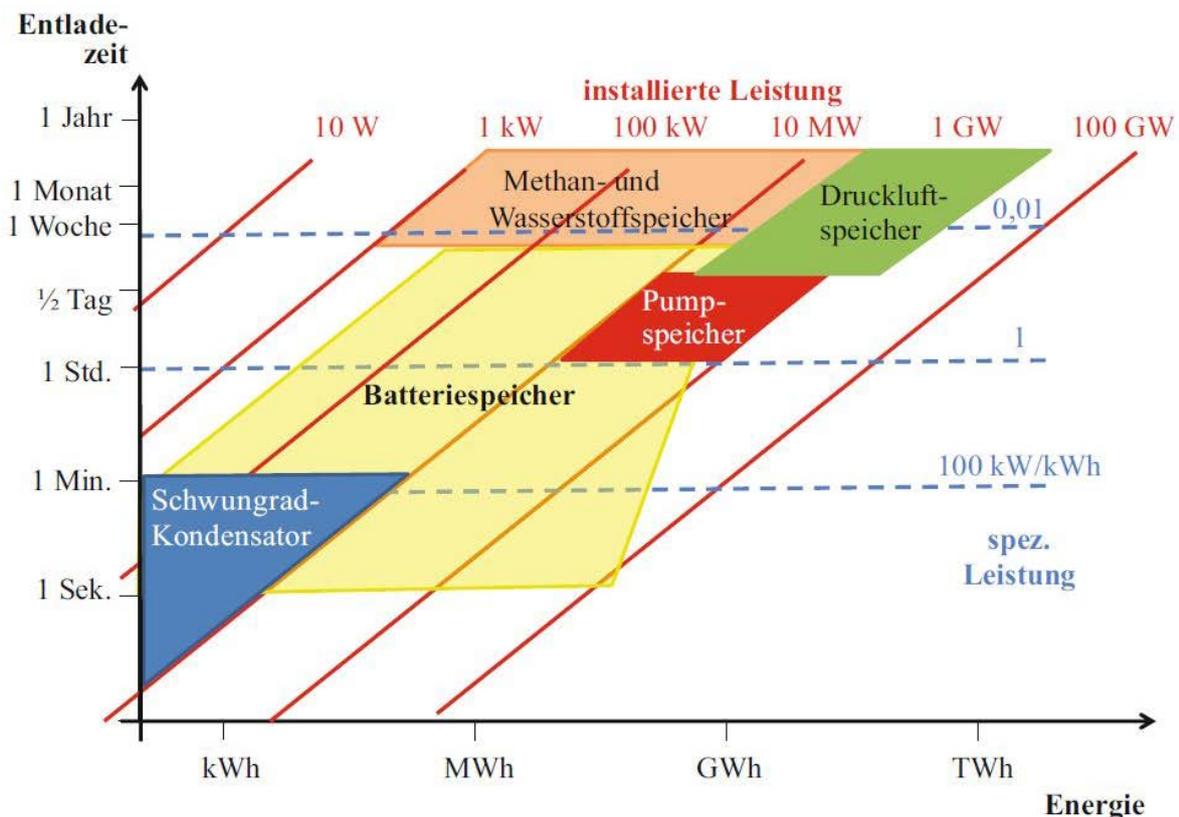


Abb. 5: Energiespeichersystem deren Speicherkapazität und -dauer (Watter 2022, S. 398)

2.2.6 EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN ENERGIEERTRAG EINER PHOTOVOLTAIKANLAGE

Es gibt verschiedene Faktoren, die den Energieertrag von Photovoltaikanlagen beeinflussen. Diese Faktoren lassen sich in die Kategorien Sonneneinstrahlung, Umwelteinflüsse und Modulqualität einteilen. Die einzelnen Faktoren und ihre Kombinationen, die den Energieertrag bestimmen, werden in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert.

2.2.6.1 SONNENEINSTRahlung

Die in Photonen gespeicherte Energie, die auf die Erde gelangt, kann mithilfe von PV-Modulen in elektrische Energie umgewandelt werden. Durch verschiedene Prozesse werden

die ankommenden Photonen an der Erdatmosphäre absorbiert oder reflektiert. Die Prozentsätze der eintreffenden Strahlungsenergie, die an den verschiedenen Schichten der Atmosphäre und der Erdoberfläche reflektiert oder absorbiert werden, sind in der Abb. 6 auf der Seite 16 dargestellt. Ein Drittel der Strahlungsenergie wird unmittelbar an der Atmosphäre und der Erdoberfläche reflektiert. Nur rund 50 % der gesamten Energie gelangt an die Erdoberfläche und teilt sich dort etwa zur Hälfte in Direkt- und Diffusstrahlung. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 18–19)

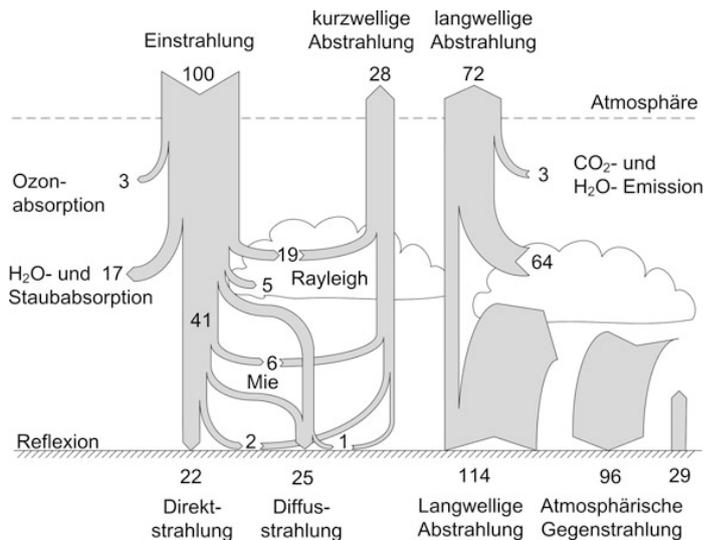


Abb. 6: Auswirkungen der Atmosphäre auf die Energiebilanz der Erde (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 18)

Die Strahlungsenergie, welche auf die Erdoberfläche trifft, wird in zwei Kategorien eingeteilt. Zum einen trifft ein Teil der Strahlung ohne Umwege direkt auf die Oberfläche, in diesem Fall auf ein Photovoltaikmodul. Zum anderen wird Strahlungsenergie, die an umliegenden Objekten reflektiert wird, indirekt auf die Module projiziert. Diese beiden Phänomene werden Direkt- und Diffusstrahlung genannt. Für die elektrische Energieerzeugung kann überwiegend nur der direkte Anteil der Strahlung genutzt werden. Der energetische Nutzen der diffusen Strahlungsenergie zur Energieerzeugung durch Photovoltaikanlagen ist nur gering. Der direkte und diffuse Anteil der Strahlungsenergie in Deutschland ist in der Abb. 7 auf der Seite 17 angeführt. (Watter 2022, S. 13)

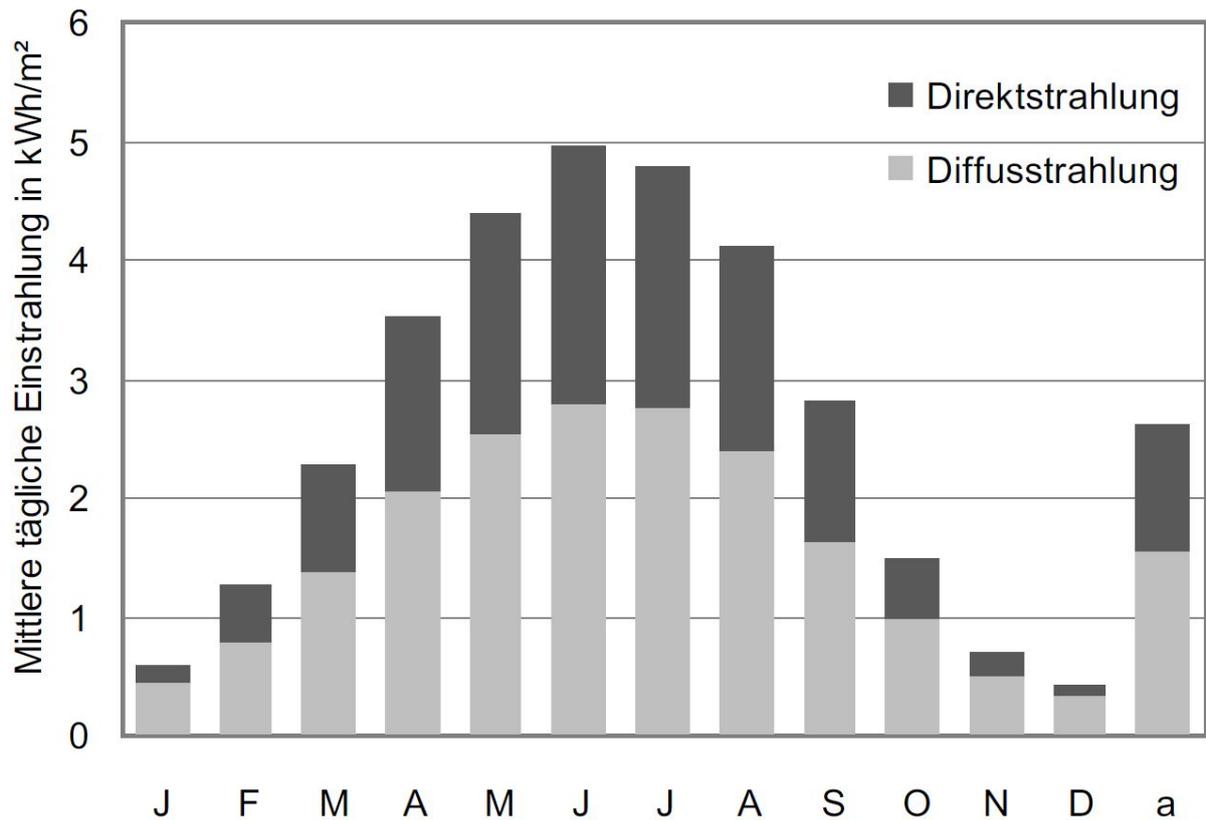


Abb. 7: Aufteilung der Direkt- und Diffusstrahlung in Deutschland (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 23)

Ein weiterer Einfluss auf die Strahlungsenergie, die auf Erdoberfläche gelangt, ist der Einstrahlwinkel, der durch mehrere Faktoren stark beeinflusst wird. Der Einstrahlwinkel verändert sich im Tag-Nacht-Zyklus, verursacht durch die Erdrotation und der Jahreszeitenabfolge, bedingt durch die Schräglage der Erdachse. Zudem bewegt sich die Erde in einer elliptischen Umlaufbahn um die Sonne, wodurch sich der Abstand der Erde zur Sonne über die Jahreszeiten verändert. Im Sommer ist die Erde am weitesten von der Sonne entfernt und im Winter am nächsten. In der Abb. 8 auf der Seite 18 ist der Sonnenbahnverlauf für einen beispielhaften Winter- und Sommertag dargestellt. Im Winter steht die Sonne über den Tagesverlauf niedrig, was eine verminderte solare Einstrahlung auf horizontale Flächen bedeutet. Auch die Einstrahlungsdauer ist in den Wintermonaten stark verkürzt. Über das Jahr verteilt liegt die jährliche solare Einstrahlung bei ca. 1000 kWh/m². (Watter 2022, S. 9–13)

Beeinflusst durch den Einstrahlungswinkel und den daraus resultierenden weiteren Weg der Strahlung durch die Erdatmosphäre, wird die Strahlungsintensität geringer. Dieser Prozess wird mit der Air-Mass-Zahl (AM) beschrieben. Dabei ist der AM1-Wert jener Wert der

senkrecht und der AM1,5-Wert jener Wert bei dem die Strahlung geneigt auf die Erdoberfläche gelangt. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 19–20)

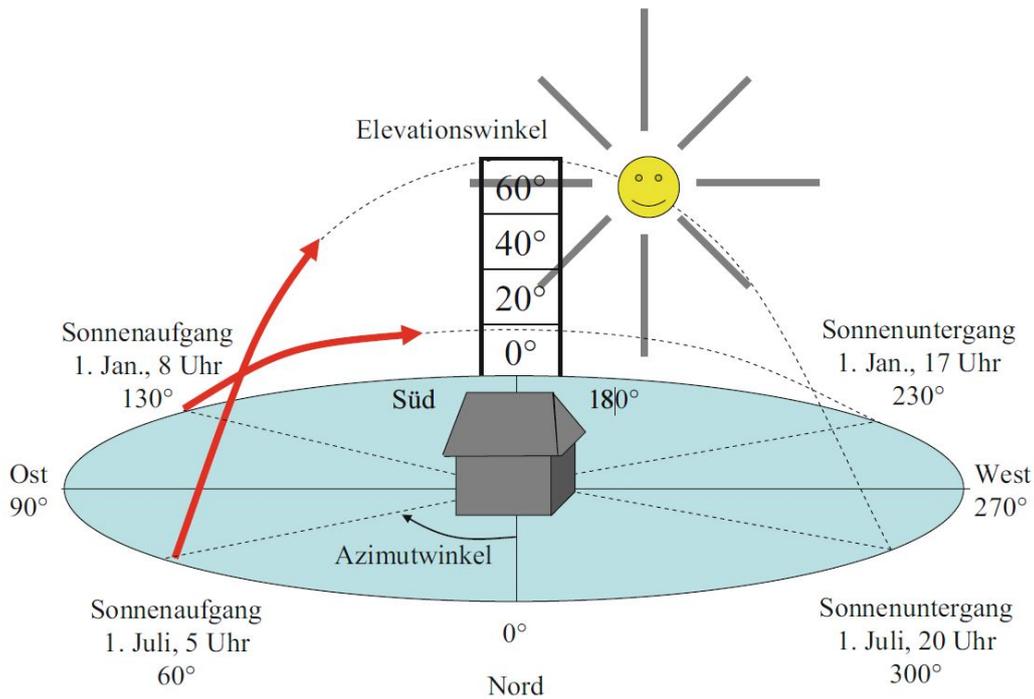


Abb. 8: Sonnenbahn für den 1. Januar und 1. Juli (Watter 2022, S. 13)

Im Abschnitt 2.2.5.3 ab der Seite 12 werden die Vor- & Nachteile von fest installierten und nachgeführten Trägersystemen behandelt. Bei fest installierten Photovoltaikmodulen ist die Ausrichtung entscheidend für den Energieertrag einer Anlage. In Mitteleuropa ist eine Ausrichtung nach Süden mit einem Anstellwinkel von 30° den höchsten Energieertrag. In der Abb. 9 auf der Seite 18 ist zu erkennen, dass bei einer steileren Ausrichtung der Paneele auf 60° der Energieertrag im Winter steigt, jedoch im Sommer stark abfällt. (pvaustria 2024, online)

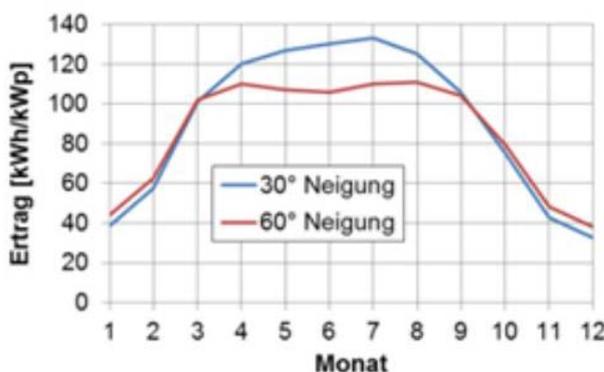


Abb. 9: Energieertrag einer nach Süden ausgerichteten Photovoltaikanlage mit 30° und 60° (pvaustria 2024, online)

Eine Ausrichtung nach Süden mit einem Anstellwinkel von 30° bedeutet jedoch auch einen großen Platzbedarf. Die nachgereihten Module müssen mit einem größeren Abstand angeordnet werden, um gegenseitige Verschattung zu vermeiden. Daher gibt es alternative Aufstellmöglichkeiten, die auf derselben Fläche einen höheren Energieertrag erzielen. Bei Anlagen, bei denen die Module nach Ost und West ausgerichtet sind, werden die Module jeweils mit einem geringen Winkel gegengleich montiert. Da keine gegenseitige Verschattung der Module auftritt, können die geringen Erträge aus dem flachen Anstellwinkel durch eine höhere Modulanzahl ausgeglichen oder übertroffen werden. Leistungssteigerungen von bis zu 40 % sind möglich. Die Spitzenleistung um die Mittagszeit wird geglättet und die Leistung am Morgen und Abend erhöht (siehe Abb. 10 auf der Seite 19). Dadurch wird die Leistungserzeugung besser an den Verbrauch angepasst, was die Notwendigkeit der Zwischenspeicherung von Energie verringert. (pvaustria 2024, online)

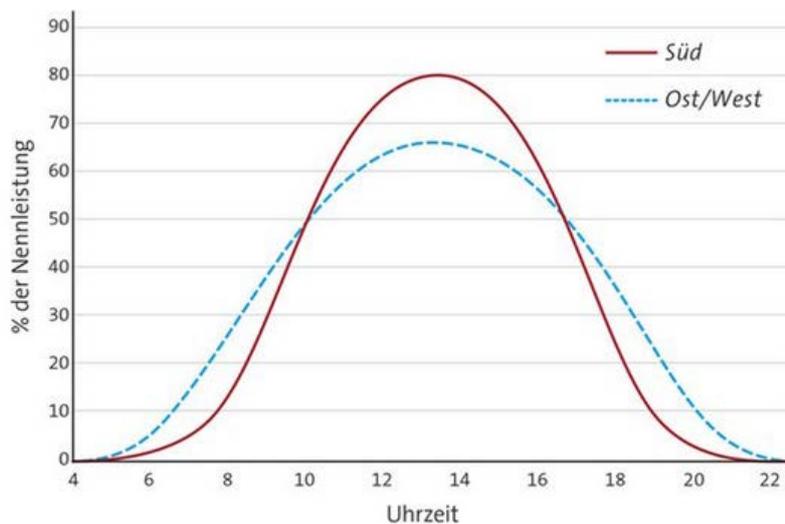


Abb. 10: Vergleich des Energieertrags einer Süd und Ost/West ausgerichteten Photovoltaikanlage (pvaustria 2024, online)

2.2.6.2 UMWELTEINFLÜSSE

Photovoltaikmodule reagieren negativ auf hohe Temperaturen. Der Energieertrag sinkt bei höheren Umgebungstemperaturen aufgrund des Halbleitermaterials. Hohe Temperaturen beeinträchtigen die Bewegung der Elektronen im Halbleitermaterial. In den Sommermonaten steigen die Erträge durch den steileren Einfallswinkel der Sonnenstrahlung, sinken jedoch durch die hohen Umgebungstemperaturen. (Stan 2024, S. 77)

Wetterbedingungen beeinflussen Photovoltaikanlagen zusätzlich. Wolken reduzieren die Strahlungsenergie erheblich. Verschattungen einzelner Photovoltaikzellen sind ebenfalls

problematisch. Wie im Punkt 2.2.4 auf der Seite 10 beschrieben, werden die einzelnen Solarzellen in Reihe geschaltet. Sobald eine einzige Solarzelle verschattet wird, sinkt die Stromstärke aller miteinander geschalteten Zellen und Module. Der Energieertrag der gesamten Anlage sinkt dadurch. Die verschattete Zelle wirkt wie ein großer Widerstand. Abhilfe schaffen eingebaute Bypässe in den Modulen und intelligente Wechselrichter, die diesem Phänomen entgegenwirken können. Jede Verschattung führt jedoch zu Leistungsverlusten. An bewölkten Tagen sinkt der Leistungsertrag daher stark. (pvaustralia 2024, online)

2.2.6.3 MODULQUALITÄT

Die auf die Moduloberfläche auftreffende Strahlungsenergie kann nur zu einem Teil verwertet werden. Photovoltaikmodule erzielen im Einsatz ca. einen 15-prozentigen Wirkungsgrad bei der polykristallinen Technologie. Monokristalline Technologien können einen 20-prozentigen Wirkungsgrad erreichen. Im Punkt 2.2.3.3 auf der Seite 9 angeführte Solarzellenentwicklung wird die Hintereinanderschaltung von Solarzellen beschrieben. Durch diese Technologie kann die Energie von Photonen mit anderen Bandabständen gewonnen werden. (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 39–41)

Aus den ursprünglich 100 % der Strahlungsenergie, welche auf die Erdoberfläche trifft, werden nur rund 15 % genutzt. Die Hälfte der Photonenenergie bleibt ungenutzt oder kann aufgrund geringer Energiedichte nicht umgewandelt werden. Durch Verluste aus Diffusion, Reflexion, Verschattung und Widerstände wird ein weiteres Drittel nicht verwertet. Aus der erzeugten elektrischen Energie durch die Module werden weitere 5 % durch Verluste in den Leitungen und dem Wechselrichter reduziert. (Watter 2022, S. 27) Eine genaue Auflistung der Verluste befindet sich in der Abb. 11 auf der Seite 20.

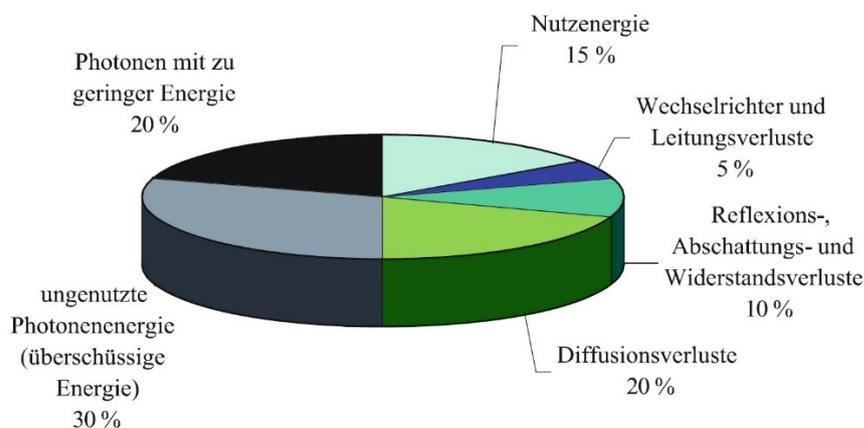


Abb. 11: Energieverluste von Photovoltaikanlagen (Watter 2022, S. 27)

2.2.7 MÖGLICHKEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN DER PHOTOVOLTAIK

Die Photovoltaik ist ein wichtiger Bestandteil der Umstellung von fossilen auf erneuerbare, CO₂-neutrale Energieträger. Sie bietet umweltfreundliche und soziale Vorteile, bringt jedoch auch Herausforderungen mit sich. Zum einen erfordert sie viel Platz, zum anderen gibt es technologische Hürden, die überwunden werden müssen. In den folgenden Unterpunkten werden die Vor- und Nachteile der Photovoltaik genauer betrachtet.

2.2.7.1 ÖKOLOGISCHE NACHHALTIGKEIT DER PHOTOVOLTAIK

Photovoltaikanlagen verursachen während der Nutzung keine Umweltauswirkungen, jedoch während der Herstellung, Installation und Wiederaufbereitung. Die für diese Prozesse benötigte Energie wird innerhalb von maximal zwei Jahren durch die erzeugte Energie kompensiert. Photovoltaikanlagen haben eine Lebensdauer von 25 bis 30 Jahren (Umweltbundesamt Deutschland 2024, online). Dadurch werden für die gesamte Lebenszykluskette nur 43 bis 63 g CO₂-Äquivalent pro erzeugte kWh verursacht (Hengstler et al. 2021, S. 38). Würde diese Energiemenge durch nicht erneuerbare Energiequellen bereitgestellt, entstünden 746 g CO₂-Äquivalent pro kWh, was eine erhebliche CO₂-Reduktion durch Photovoltaik bedeutet (Lauf et al. 2023).

Die am häufigsten verbauten kristallinen Photovoltaikmodule bestehen überwiegend aus Glas, Aluminium und Kunststoff. Durch mechanische Zerkleinerung können die Materialien voneinander getrennt und einfach wiederverwendet werden. Über 90 % der Inhaltsstoffe können nach aktuellem Stand der Technik hierbei recycelt werden. Bei den kristallinen Systemen ist das einzig umweltbelastende Material das in geringen Mengen eingesetzte Blei (Umweltbundesamt Deutschland 2024, online). Die optionalen Speichersysteme für Photovoltaikstrom werden hier nicht behandelt, da der Recyclingprozess stark vom Speichersystem abhängig ist.

2.2.7.2 TECHNOLOGISCHE FORTSCHRITTE UND HERAUSFORDERUNGEN DER PHOTOVOLTAIK

Wirkungsgrade von Photovoltaikanlagen steigen aufgrund von technologischen Fortschritten stetig. Wirkungsgrade stiegen bei markterhältlichen Modulen um bis zu 5 % Punkte. Darunter fallen kristalline Module und auch Dünnschichtmodule (Hengstler et al. 2021, S. 50–51). Wie im Punkt 2.2.3 Typen von Solarzellen ab der Seite 8 beschrieben, werden die Technologien stetig weiterentwickelt. Durch flexible und transparente Module können Photovoltaikanlagen

in immer mehr Anwendungsgebiete, zum Beispiel in Gebäuden oder Verkehrswegen, integriert werden. Dadurch stehen immer mehr Flächen für Photovoltaikmodule zur Verfügung.

Kristalline Silizium-Module werden laufenden Effizienzsteigerungen unterzogen. Dabei werden alternative Materialien mit höherem Gesundheits- und Umweltschutz verbaut und der Produktionsprozess verbessert, um Material- und Energieeinsparungen zu erzielen. Bei Dünnschichtmodulen wird die Energieausbeute der kristallinen Siliziummodule angeglichen. (Hengstler et al. 2021, S. 53–54)

Die wetterbedingten und tageszyklusabhängigen Einflussfaktoren auf den Energieertrag sind ausführlich im Abschnitt 2.2.6 ab der Seite 15 angeführt. Dies erfordert wesentliche Anpassungen im Energiesystem und den erheblichen Ausbau von Speicheranlagen. Die Erläuterung, Notwendigkeit und Systeme von Energiespeichern sind im Abschnitt 2.2.5.5 ab der Seite 14 erläutert.

2.2.7.3 WIRTSCHAFTLICHKEIT VON PHOTOVOLTAIK

Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen ist kostengünstig. Die Entstehungskosten aktueller Technologien wie Atomkraftwerke oder Gaskraftwerke spiegeln jedoch nicht die verursachten Gesamtkosten wider. Bei der aktuellen Preisgestaltung von fossilen Energieträgern oder Atomstrom werden die Spätfolgekosten, wie CO₂-Emissionen und den Umweltauswirkungen, nicht berücksichtigt. Jene Kosten werden nicht vom Verbraucher oder dem Erzeuger bezahlt, sondern von der Allgemeinheit. Diese Nichtberücksichtigung bedeutet eine erhebliche Förderung jener Energiequellen. Der massive Ausbau von Photovoltaikanlagen verursacht zusätzliche Kosten, die nicht einer Photovoltaikanlage zuzuordnen sind. Die im Punkt 2.2.6 ab der Seite 15 dargestellten Einflussfaktoren auf den Energieertrag einer Photovoltaikanlage, die daraus resultierende notwendige Speicherung von Energie und die dezentrale Lage der Erzeuger verursachen erhebliche Kosten im Stromnetz. Zum einen muss das Stromnetz ausgebaut werden, da die Erzeuger breiter am Land gestreut sind (dezentrales Energiesystem) und zum anderen müssen erhebliche Summen in den Ausbau von Energiespeichern investiert werden. Dies ist der ökologischen Energiewende zuzuschreiben. (Wirth, S. 7)

Die Kosten einer Photovoltaikanlage setzen sich aus den Errichtungs-, Finanzierungs-, Nutzungs- und Entsorgungskosten zusammen. Wenn diese Kosten durch die erzeugte

Energiemenge in kWh teilt werden, errechnen sich die Energiegestehungskosten. Kosten für Strom aus Photovoltaik sind nach aktuellem Stand zwischen 5 bis 13 ct/kWh, je nach Größenordnung der Photovoltaikanlagen (Stand 2024). Durch weitere Skalierungseffekte und Forschung in der Photovoltaik können die Kosten weiter sinken. Der Großteil der Errichtungskosten entfällt auf die Photovoltaikmodule. Diese Kosten sind im Zeitraum von 2010 bis 2020 um 90 % gesunken, inflationsbereinigt. In der Abb. 12 auf der Seite 23 sind die Kosten für Photovoltaikmodule in Abhängigkeit von der Verdoppelung der erzeugten Menge dargestellt. (Wirth, S. 8–9)

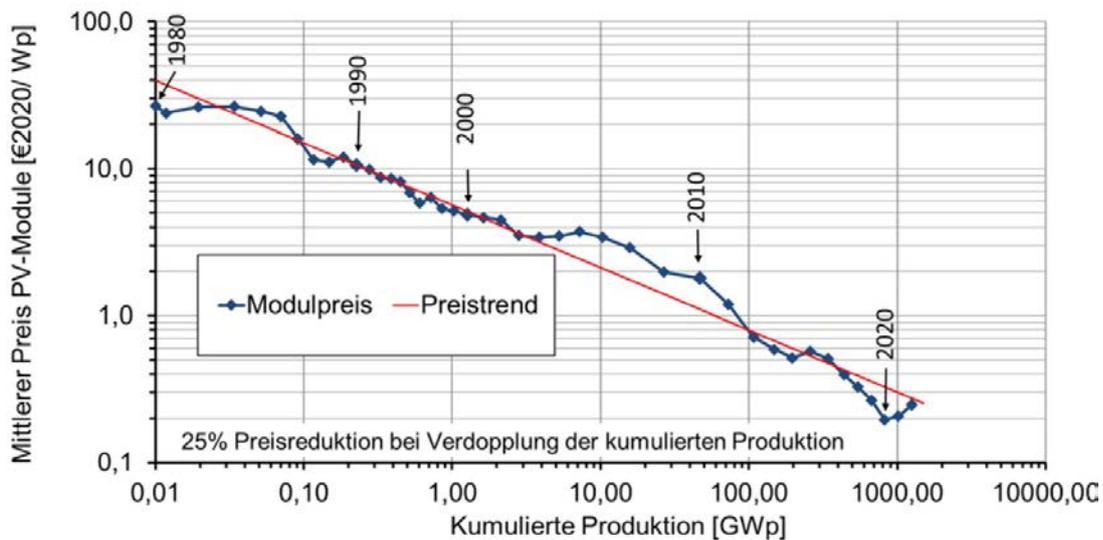


Abb. 12: Preisentwicklung für Photovoltaikmodule (Wirth, S. 8)

2.2.7.4 AUSWAHL DES STANDORTS UND DEM NOTWENDIGEN PLATZBEDARF

Bei der Standortwahl sollte darauf geachtet werden, dass Photovoltaikanlagen mit bestehenden Gebäuden, Verkehrsflächen oder Agrarflächen kombiniert werden, um zusätzliche Flächeninanspruchnahme zu minimieren. Breit gestreute Einsatzbereiche sind von großer Bedeutung, um den notwendigen Photovoltaikausbau zu bewerkstelligen. Die Entwicklungsmöglichkeiten einer sekundären Nutzung der Stromproduktion durch Photovoltaik müssen in Kategorien eingeteilt werden. Die Integrationsmöglichkeiten müssen in maximales, technisch umsetzbares und ökonomisches Potenzial gegliedert werden. Einsatzgebiete bei denen Photovoltaikanlagen integriert werden können sind landwirtschaftliche Flächen, künstlich angelegte Wasserstellen, Gebäude und Verkehrsflächen jeglicher Art. Ein wichtiger Punkt bei der Integration ist, dass keine gegenseitigen negativen Wechselwirkungen zwischen der Stromgewinnung und der eigentlichen Primärnutzung entstehen. (Wirth, S. 31–34)

Den Einfluss der Standortwahl auf den Energieertrag einer Photovoltaikanlage wird im Punkt 2.2.6 ab der Seite 15 genau erläutert. Die sekundäre Nutzung durch Photovoltaikanlagen auf Verkehrsflächen wird im Punkt 2.3 ab der Seite 25 beschrieben, einschließlich aller potenziellen Verkehrsflächen.

2.2.7.5 SOZIALE ASPEKTE IN BEZUG ZUR PHOTOVOLTAIK

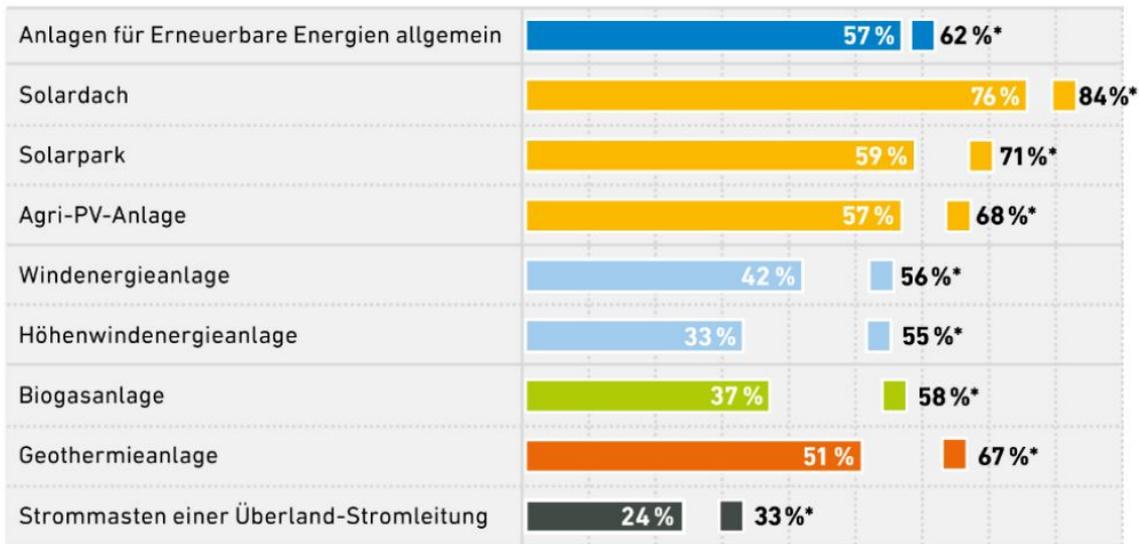
Die Energiewende hin zur CO₂-Neutralität schafft Arbeitsplätze. Die Produktion und Herstellung von Photovoltaikmodulen und Systemkomponenten erfolgt überwiegend in Asien, insbesondere in China. Dies ist jedoch nicht auf geringeren Mitarbeitergehälter zurückzuführen, da die Produktion überwiegend automatisiert abläuft. Die Photovoltaikanlagenproduktion wurde in China stark subventioniert was den heimischen Markt schrumpfen ließ. Jedoch werden in der Installation, Wartung und im Betrieb der Anlagen neue Mitarbeiter:innen benötigt, was auch im europäischen Raum Arbeitsplätze schafft. (Wirth, S. 22–23)

Um die Energiewende unabhängig von anderen Regionen zu bewerkstelligen, muss die heimische Produktion von Photovoltaikanlagen stark ausgebaut werden. Allein in Deutschland werden jährlich rund 40 Millionen Module benötigt, was ein hohes wirtschaftliches Potenzial bedeutet. (Wirth, S. 97)

Die hohe Akzeptanz von Anwohnern für Photovoltaikanlagen zur Energiegewinnung in unmittelbarer Nähe zu ihrem Wohnort spiegelt sich in der Abb. 13 auf der Seite 25 wider. Photovoltaikanlagen haben je nach Einsatzgebiet eine Zustimmung von 68 % bis 84 %. Dabei haben Anlagen die auf Dächer positioniert sind, die mit Abstand größte Zustimmung. Andere erneuerbare Energie wie Windkraft-, Biogas- und Geothermieanlagen besitzen eine weit geringere Akzeptanz. Dies wird ersichtlich durch die über zwei Millionen installierten Photovoltaikanlagen in Deutschland. Die hohe Zustimmungsrates für Photovoltaikanlagen in der Gesellschaft kann die Energietransformation stark beschleunigen. (Wirth, S. 36–37)

Zustimmung zu Erneuerbare-Energien-Anlagen in der Umgebung des eigenen Wohnorts

Zur Stromerzeugung in der Nachbarschaft bis 5 km finden eher gut bzw. sehr gut ...



* Befragte mit entsprechenden Anlagen in der eigenen Nachbarschaft.

Quelle: Umfrage von YouGov im Auftrag der
 Agentur für Erneuerbare Energien, n=1.012; Stand: 11/2023
 © 2023 Agentur für Erneuerbare Energien e.V.



Abb. 13: Anwohnerzustimmung für erneuerbare Energiegewinnung unmittelbar in der Nähe zu Ihrem Wohnort (Wirth, S. 37)

2.3 FLÄCHEN ZUR ENERGIEERZEUGUNG MITTELS PHOTOVOLTAIK

Die im Abschnitt 2.1 auf der Seite 4 angeführte Energiewende hin zu CO₂-Neutralität und den damit verbundenen Ausbau der Photovoltaik erfordert immense Flächen für die Photovoltaikmodule. Dieser Ausbau erfordert klar definierte Leitlinien, um den maximalen ökologischen Nutzen zu bewerkstelligen und eine soziale Akzeptanz in der breiten Bevölkerungsschicht zu erlangen. Zu jenen Leitaspekten gehören Ästhetik, Umweltverträglichkeit, hohe nationale Wertschöpfung und Einklang mit der Landwirtschaft. Um jene Aspekte am besten abdecken zu können ist eine Doppelnutzung für Photovoltaikflächen zu favorisieren. Das bedeutet, dass bereits und zukünftig geplante Flächen mit der Aufgabe der Energiegewinnung ergänzt werden. Diese Energiegewinnung wird in die bestehende Eigenschaft der Flächen integriert, wodurch Synergie-Effekte entstehen. Dies kann je nach Einsatzgebiet Vorteile bringen. Mit dieser Vorgehensweise werden keine zusätzlichen Flächen ausschließlich für die Energiegewinnung notwendig. Mögliche Flächenpotenziale für Österreich zur Photovoltaikintegration werden in den nachfolgenden Kapiteln genauer behandelt. (Fechner 2020, S. 7–8)

2.3.1 GEBÄUDEHÜLLEN UND ALTERNATIVE BAUWERKSFLÄCHEN

In den letzten Jahren wurden primär Photovoltaikanlagen installiert, welche auf bestehende Dachkonstruktionen montiert werden. Jedoch kommen immer mehr PV-Module zur direkten Gebäudeintegration auf den Markt. Dadurch können Photovoltaikmodule architektonisch besser integriert werden und werden von Nutzerinnen und Nutzern besser akzeptiert. Zum einen gibt es mittlerweile Dacheindeckungen, bei denen das Paneel direkt integriert ist. Zum anderen gibt es teiltransparente Module, die für Fensterflächen herangezogen werden können. Weitere integrierte Lösungen sind Leichtbaumodule, Module für vorgehängte, hinterlüftete Fassaden und Verschattungselemente mit Photovoltaiktechnik. Durch diese neuartigen Produkte können auch potenzielle Flächen, die bisher nicht in Erwägung gezogen wurden, zur Energiegewinnung genutzt werden. Bisher ungenutzte Flächen können dadurch auch technisch und wirtschaftlich erschlossen werden, um das volle Potenzial der Photovoltaik auszuschöpfen und die Energiewende voranzutreiben. (Wirth, S. 33–34) In der Abb. 14 auf der Seite 26 sind potenzielle Photovoltaikanlagen an Gebäude dargestellt.

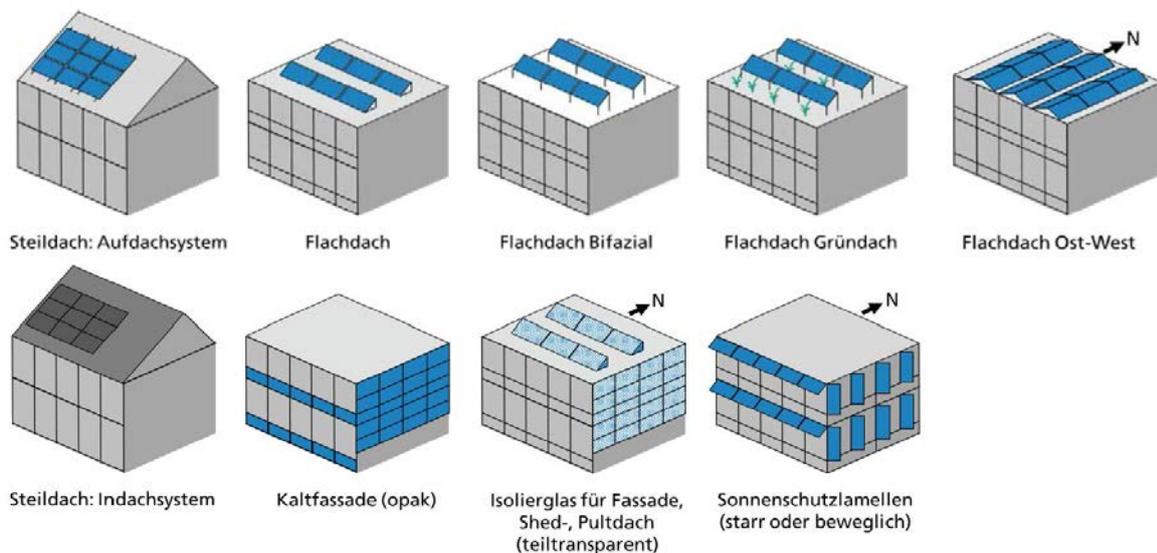


Abb. 14: aufgeständerte und integrierte Photovoltaikanlagen an Gebäuden (Wirth, S. 34)

In Österreich gibt es nach dem Stand aus 2018 rund 2,4 Millionen Gebäude. Dabei sind 76 % der Gebäude Wohngebäude, 10 % Garagen, 9 % Nichtwohngebäude und 4 % Hallen. Diese Gebäude nehmen eine Gesamtgrundfläche von 713 km² ein. Aus Statistiken zu den durchschnittlichen Dachtypen, wie Flachdächer und Satteldächer der jeweiligen Gebäudekategorien, lässt sich die Gesamtdachfläche aller Gebäude hochrechnen. Daraus ergeben sich in Österreich Dachflächen von gesamt 738 km². Die Potenziale der nutzbaren Fassadenflächen lassen sich nur grob abschätzen. Dabei geht die Schätzung von ca.

32 bis 86 km² nutzbarer Photovoltaikfläche aus. Die berechneten Photovoltaikflächen werden anschließend mit Solarkatasterangaben und einem Strahlungskorrekturfaktor in ein physikalisch-theoretisches Photovoltaik-Erzeugungspotenzial übergeführt. In der Abb. 15 auf der Seite 28 ist im blauen Balken jener Wert als Gesamtwert und den jeweiligen Gebäudetypen gegliedert. Daraus ergibt sich in Österreich ein theoretisches Potenzial von 18,6 TWh bis zum Jahr 2030. (Fechner 2020, 14–19)

Es gibt jedoch Gründe, warum das physikalisch-theoretische Potenzial nicht vollkommen ausgeschöpft werden kann. Die Gründe teilen sich in technische, wirtschaftliche und sozial-ökologische Aspekte. Zu den technischen Abminderungsfaktoren zählen Denkmalschutz, Sicherheitsbestimmungen an Montage und Wartung, Flächennutzungskonflikte wie Solarthermie und statische und gebäudetechnische Rahmenbedingungen. Hauptfaktoren der Potenzialminderung sind wirtschaftliche Gründe. Vorrangig hier ist die Eigenverbrauchsabdeckung und die niedrige Einspeisevergütung. Besitzer*innen von Immobilien nützen daher nicht die vollständige maximale Dachfläche aus. Weitere wirtschaftliche Faktoren sind Kapitalmangel, geringe Investitionsförderungen und leerstehende Gebäude, welche abgerissen oder umgebaut werden müssen. Sozial-ökologische Gründe, weshalb die vollen Photovoltaikpotenziale nicht ausgeschöpft werden können, sind Themen wie Überzeugung von Miteigentümer:innen bei Mehrparteienhäusern, hoher Durchführungsaufwand und ökologische Bedenken. Zu den ökologischen Bedenken zählt unter anderem der Einsatz von limitierten Rohstoffen. (Fechner 2020, S. 20)

Aus den zuvor genannten Gründen können überschlagsmäßige Berechnungen und Abminderungsfaktoren für die jeweiligen Potenziale abgeschätzt werden. Daraus ergeben sich als technisches Potenzial 13,4 TWh, als wirtschaftliches Potenzial 8,1 TWh und als realisierbares Potenzial unter Berücksichtigung sozialer Gründe 4 TWh auf den Gebäudehüllen in Österreich, bis zum Jahr 2030. Die genaue Statistik mit den abgeminderten Potenzialen ist in der Abb. 15 auf der Seite 28 ersichtlich. Wenn die realisierbaren Potenziale auf den Gebäuden mit den aus Punkt 2.1 auf der Seite 4 ungefähr benötigten 11,5 TWh aus der Energieerzeugung mittels Photovoltaik bis 2030 verglichen werden, kommt man zum Schluss, dass eine reine Montage auf Gebäuden nicht ausreicht. Dafür müssten die Grundvoraussetzungen geändert werden, sodass die oben genannten Abminderungsfaktoren nicht mehr in diesem Ausmaß wirksam sind und die technischen Potenziale von 13,4 TWh umgesetzt werden können. Um das Ziel von 11,5 TWh bis zum Jahr 2030 und weitere

20 TWh bis zum Jahr 2050 (vgl. 2.1 auf der Seite 4) zu erreichen, müssen auch alternative Flächen neben Gebäudehüllen in Betracht gezogen werden. (Fechner 2020, S. 27–28)

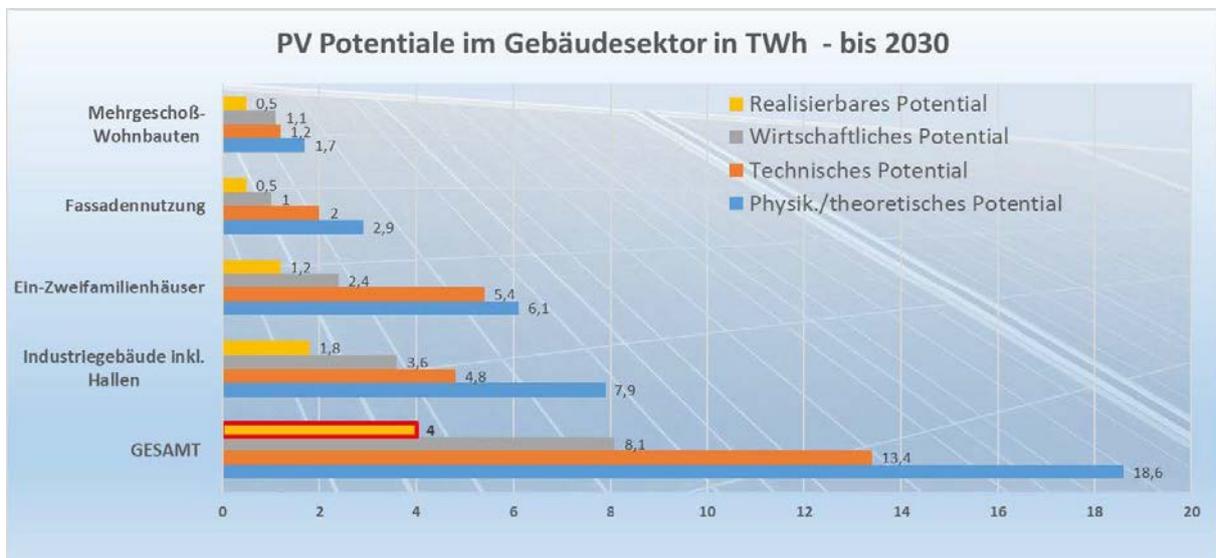


Abb. 15: Potenziale der Photovoltaik an Gebäuden in Österreich in TWh bis zu Jahr 2030 (Fechner 2020, S. 27)

2.3.2 VERKEHRS- UND INFRASTRUKTURFLÄCHEN

Photovoltaikanlagen können an verschiedenen Verkehrsflächen integriert werden. Dazu gehören Straßenflächen wie Autobahnen, Landstraßen und niederrangige Straßen. Außerdem können Module an Parkflächen, Radwegen und Gehwegen installiert werden. Zusätzlich bieten Schienentrassen vielfältige Möglichkeiten zur Integration von Photovoltaik. Der wesentliche Vorteil der Ergänzung von Verkehrs- und Infrastrukturflächen mit Photovoltaik ist, dass versiegelte Flächen für die Energiegewinnung genutzt werden können, wodurch der Flächenbedarf für die Energiewende geringer wird. Weitere Vorteile und Herausforderungen bei der Integration von Photovoltaikanlagen an Verkehrsflächen werden im Abschnitt 2.5 ab der Seite 32 genauer ausgeführt. (Heinrich, online)

Es gibt hauptsächlich drei Installationsformen. Alle zuvor genannten Verkehrsflächen können mit Paneelen überdacht werden, wofür eine eigene Tragkonstruktion benötigt wird. Eine weitere Methode ist die vertikale Integration von Photovoltaikmodulen an Lärmschutzwänden entlang von Verkehrswegen. Zusätzlich können die Module direkt in den Straßenbelag integriert werden. (Heinrich 2024, S. 1–2)

1985 km² Straßenfläche und 92 km² Schienenflächen gibt es nach dem Stand von 2019 in Österreich (statista, online). In Österreich gibt es ca. 15.000 großflächige Parkplätze, die unter

Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und sozial-ökologischer Aspekte mit Photovoltaikmodulen überdacht werden könnten. Wenn diese Parkflächen aufgrund ihrer Sonnenexposition bewertet werden und dabei nur bei rund der Hälfte eine wirtschaftliche Überdachung mittels Photovoltaikanlagen Sinn ergibt, entsteht dabei ein Potenzial von 4,2 TWh. (Fechner 2020, S. 38)

Lärmschutzwände mit integrierten Photovoltaikanlagen können bei Ost-West- und Nord-Süd-Straßen angebracht werden. Bei den Ost-West-Straßen können klassische Module, wie in Punkt 2.2.4 auf der Seite 10 beschrieben, installiert werden. Bei Nord-Süd-Straßen können transparente bifaziale Module (siehe Abb. 16 auf der Seite 29) eingesetzt werden (Heinrich, online). Möglichkeiten zur Montage von Photovoltaik an Lärmschutzwänden sind in der Abb. 17 auf der Seite 29 dargestellt. Das Potenzial an Lärmschutzwänden in Österreich bei Autobahnen ist ca. 0,32 TWh. Aufgrund von Ausrichtung, Anstellwinkel und Beschattung durch umliegende Störfaktoren ungefähr die Hälfte der 1358 km mit Photovoltaik technisch ausgestattet werden. Bei Schienentrassen sind ca. 900 km Lärmschutzwände verbaut. Zusätzlich zu den bisherigen Lärmschutzwänden können alle weiteren Verkehrsflächen mit Lärmschutzphotovoltaik ergänzt werden. (Fechner 2020, S. 37)

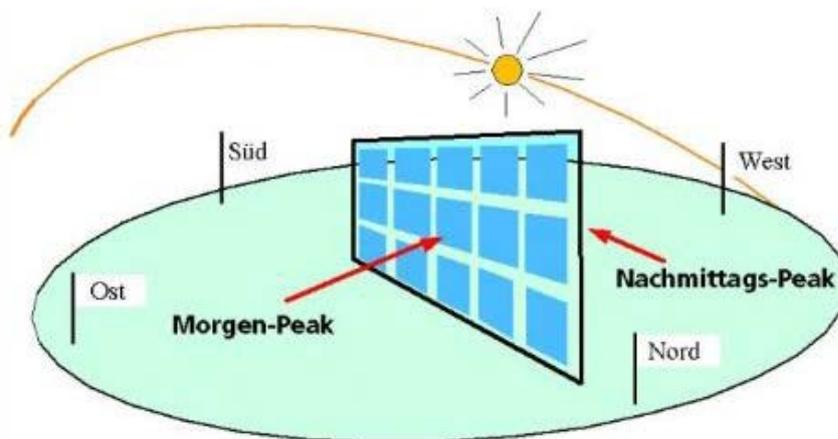


Abb. 16: Funktionsprinzip der bifazialen Photovoltaikmodule (Technische Plattform Photovoltaik 2022, S. 2)

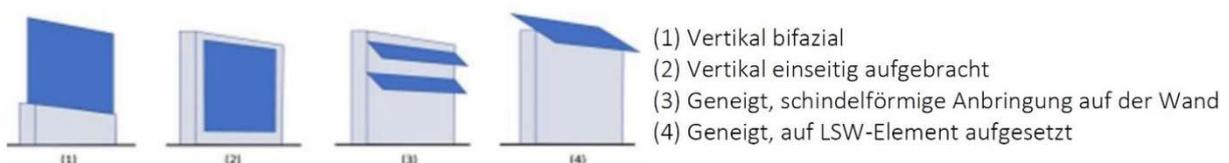


Abb. 17: Montagearten von Photovoltaik an Lärmschutzwänden (Technische Plattform Photovoltaik 2022, S. 2)

2.3.3 WASSER UND LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN

Photovoltaikanlagen auf freien Flächen weisen Konfliktpotenziale auf. Zum einen stehen sie mit landwirtschaftlichen Interessen der Versorgungssicherheit mit Lebensmitteln in Widerspruch und zum anderen mit Naturschutzinteressen. Dadurch können jedoch positive Nebeneffekte entstehen. Studien zeigen, dass Photovoltaikanlagen anstelle von exzessiver Landwirtschaftsnutzung regionale Biodiversität erhöhen können. Allerdings kann auch eine landwirtschaftliche Nutzung mit Photovoltaikanlagen ausgestatteten Flächen im Einklang betrieben werden. Dies ist unter dem Begriff Agri-Photovoltaik bekannt. Durch richtige Installation können die Erträge in der Landwirtschaft vergrößert werden. Photovoltaikmodule können dabei klassisch lichtundurchlässig oder lichtteildurchlässig ausgeführt werden. Sie können über Kopf in größerer Höhe oder senkrecht installiert werden. Vorteile sind dabei die teilweise Verschattung der landwirtschaftlichen Kulturen, die das Austrocknen reduzieren bzw. den Wasserbedarf minimieren. Ebenfalls können Weideflächen mit Photovoltaikanlagen ausgestattet werden. Es entstehen daher viele positive Synergieeffekte, wobei Freiflächenphotovoltaikanlagen immer im Einklang mit diesen Interessen umgesetzt werden müssen. Durch Potenzialanalysen ergeben sich in Österreich technisch gesehen rund 28 bis 32 TWh für landwirtschaftlich extensiv genutzte Flächen. Extensiv genutzte Flächen sind jene, welche durch minimale Pflege wie Häckseln, vor starkem Bewuchs durch Sträucher und Bäume, geschützt werden. Es werden hier keine Ernteerträge gewonnen. Wie beschrieben kann durch Kombination der Landwirtschaft und Energieerzeugung dieses Potenzial erhöht werden. (Fechner 2020, S. 31–35)

Es gibt eine weitere Möglichkeit Photovoltaikanlagen in die Natur zu integrieren, indem sie auf Gewässern platziert werden. Hierfür wird ein schwimmendes Trägersystem auf stillen Wasseroberflächen positioniert. Darauf werden anschließend Photovoltaikmodule fixiert. Speziell in Österreich kann hier das Potenzial der Speicherseen in den Alpen ausgeschöpft werden. Dadurch wird die eigentliche Hauptaufgabe der Energiespeicherung durch eine Energieerzeugung ergänzt. Der Vorteil in den höher gelegenen Gebieten ist der gesteigerte Energieertrag aus den Photovoltaikanlagen. Die dünnere Atmosphäre lässt mehr Sonnenstrahlung an der Oberfläche ankommen und weiter wird im Winter Sonnenstrahlung an den umliegenden Schneeflächen gespiegelt, welche zusätzlich auf die Photovoltaikflächen trifft. (Fechner 2020, S. 42)

2.4 FORSCHUNG ZUR UMSETZUNG VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN

Das Forschungsprojekt „PV-Straßenüberdachung – Konzept PV – Süd – K“ ist eines der größten Projekte zur Installation von Photovoltaikanlagen an Verkehrsflächen in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Die bisherigen Ergebnisse wurden in einem Zwischenbericht zusammengefasst, der vom AIT Austrian Institute of Technology (AIT), Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE und Forster Industrietechnik GmbH erstellt wurde. Das Projekt untersucht die Photovoltaiküberdachung von hochrangigen Straßen wie Autobahnen im D-A-CH Raum und deren Auswirkungen auf die Infrastruktur. Zentrale Punkte der Studie sind die bautechnischen Aspekte der Tragstruktur, die Grundlagen der Photovoltaik und die Einflüsse auf den Straßenverkehr. Im abschließenden Zwischenstand wurden alle Themen in einer wirtschaftlichen Betrachtung zusammengeführt. Diese Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt alle Komponenten der Anlage, einschließlich der Tragstruktur, Skalierungseffekte und positive Einflüsse auf die Fahrbahn. Es wurde angenommen, dass der erzeugte Strom zu 100 % als Eigenverbrauch genutzt wird, wodurch der Zukauf dieser Strommenge entfällt (Haider et al. 2021). Die Wirtschaftlichkeitsrechnung (vgl. Abb. 18 auf der Seite 31) für das betrachtete Stahlrahmenkonzept mit einer Stützweite von 17 m zeigt, dass sich die Anlage erst bei hohen Bezugstarifen amortisiert. Ab einem Bezugstarif von 20 cent/kWh rechnet sich die Anlage nach knapp unter 25 Jahren. Wenn man den Strompreis der Industrie (vgl. Abb. 19 auf der Seite 32) der letzten 10 Jahre betrachtet, sieht man, dass erst im Jahr 2023 der Preis auf ca. 25 cent/kWh stieg. Im Durchschnitt der vorherigen Jahre lag der Bezugspreis bei knapp unter 10 cent/kWh.

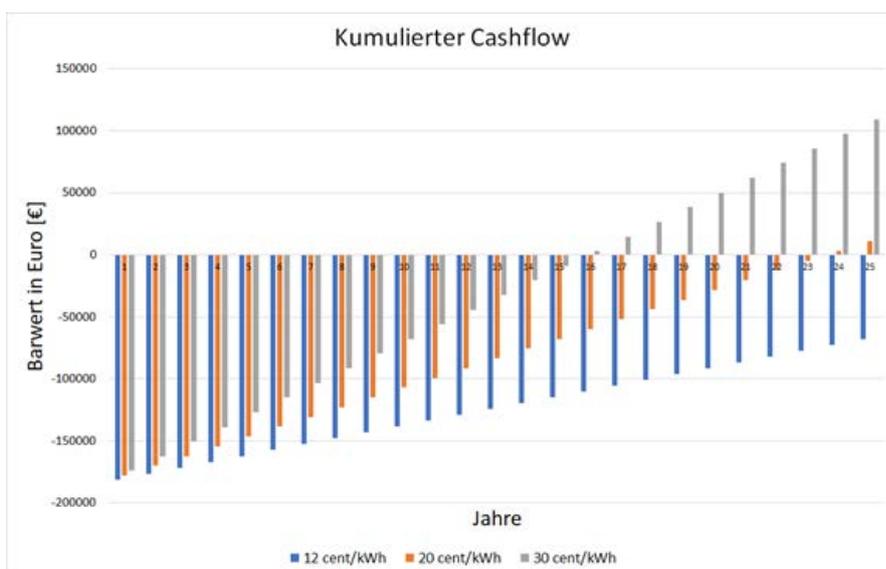


Abb. 18: Kumulierter Cashflow bei einer demonstrativen Photovoltaiküberdachung auf hochrangigen Straßen mit unterschiedlichen Strom Bezugstarifen (Haider et al. 2021, S. 183)

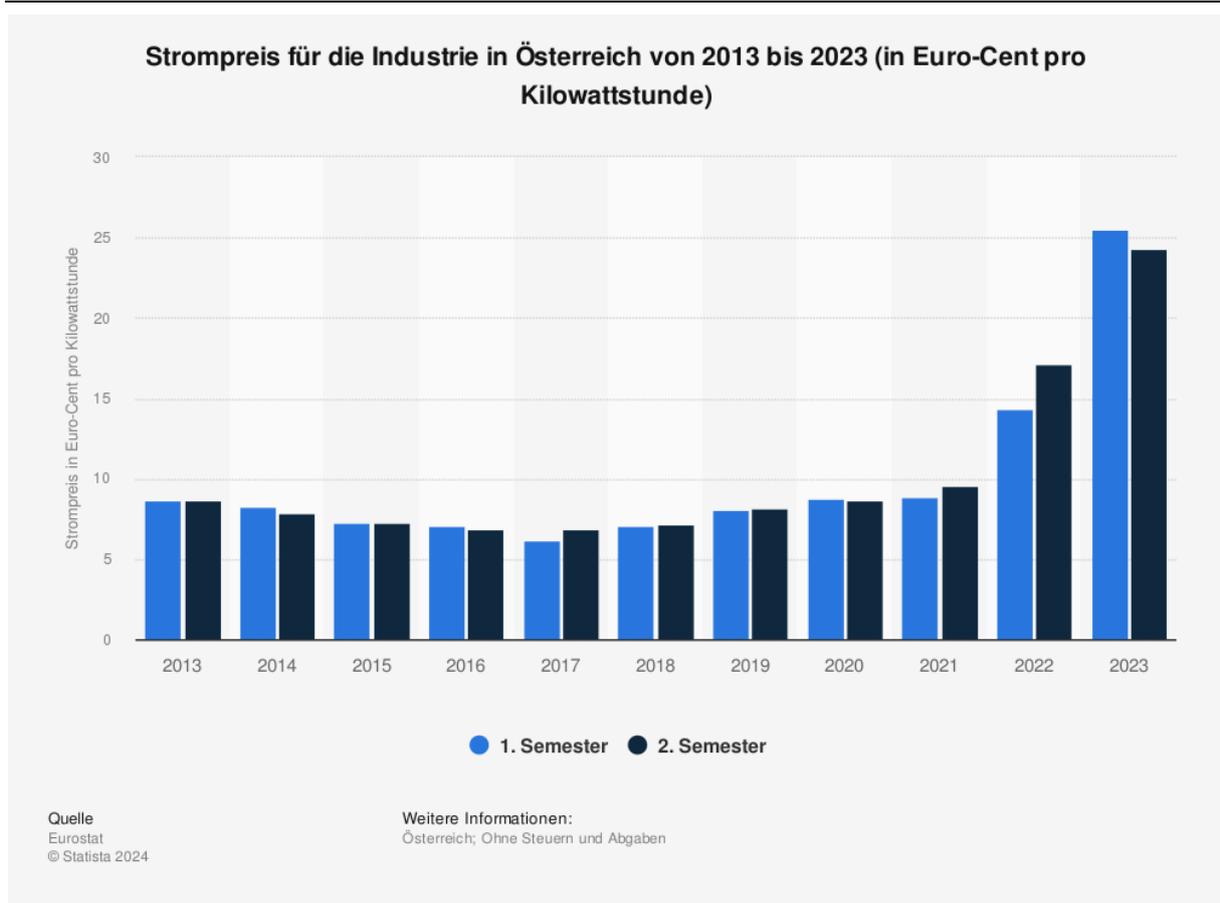


Abb. 19: Strompreis für die Industrie in Österreich von 2013 bis 2023 (Pawlik 2024)

Die Studie „Life Cycle Assessment for Photovoltaic Structures - Comparative Study of Rooftop and Free-Field“ führt eine Umweltbilanzierung von Photovoltaikanlagen auf Dächern und Freiflächen durch. Sie analysiert die Umweltauswirkungen der Trägerstrukturen beider Systeme mittels einer Lebenszyklusanalyse. Betrachtet werden das Global Warming Potenzial (GWP) und die Energie Payback Time (EPBT). Die Ergebnisse zeigen, dass Aufdachanlagen aufgrund der kleineren Unterkonstruktion umweltfreundlicher als Freiflächenanlagen sind. Auch die Materialwahl zwischen Holz und Metall beeinflusst die Umweltbilanzierung wesentlich. (Neumüller et al.)

2.5 TECHNISCHE INTEGRATION DER PHOTOVOLTAIKTECHNIK AN DEN VERKEHRSFLÄCHEN

Wie im Punkt 2.3.2 auf der Seite 28 angegeben gibt es drei wesentliche Möglichkeiten Photovoltaik an den Verkehrsflächen zu integrieren. Diese Konzepte sind die Überdachung der Verkehrsflächen, die Integration von Photovoltaikmodulen an Lärmschutzwänden und die direkte Integration in die Fahrbahnoberfläche. (J.D. Huyeng et al. 2022, S. 1209)

Bei der Überdachung besteht ein hohes theoretisches Potenzial. Die Tragstruktur stellt jedoch die größten Hindernisse dar. Zum einen muss die Struktur hohen Anforderungen an die Verkehrssicherheit genügen und den Belastungen durch den darunterliegenden Verkehr standhalten. Dies verursacht hohe Installationskosten, die je nach Tragsystem 85 bis 90 % der Gesamtkosten betragen. Die Überdachung kann praktisch an allen Verkehrsflächen eingesetzt werden, die eine ausreichende Sonneneinstrahlung im Jahresmittel aufweisen. Dabei muss auf die entsprechende Ausrichtung und Modulneigung geachtet werden, wie im Abschnitt 2.2.6 Einflussfaktoren auf den Energieertrag einer Photovoltaik ab der Seite 15 geachtet werden. (J.D. Huyeng et al. 2022, S. 1210–1213)

Photovoltaikmodule an Lärmschutzwänden können an bestehenden und neuen Systemen integriert werden. Wie in der Abb. 17 auf der Seite 29 ersichtlich, können Module vertikal an der Lärmschutzwandfläche angebracht, direkt integriert oder an der Oberkante in einen Winkel aufgesetzt werden. Die wesentliche Voraussetzung an die Module sind bei dieser Methode die schalltechnischen Eigenschaften, die den Anforderungen der Hauptaufgabe des Schallschutzes gerecht werden. (J.D. Huyeng et al. 2022, S. 1210–1213)

Bei der dritten Möglichkeit, Photovoltaik an den Verkehrsflächen zu integrieren, werden Module direkt in die Fahrbahn eingelassen. Diese Module müssen hohen Beanspruchungen durch den rollenden Verkehr, Witterungseinflüssen und dabei auftretenden Temperaturschwankungen sowie Korrosionsbelastung durch Niederschläge und Streusalze standhalten. Die Module müssen mit einer Anti-Rutsch-Beschichtung versehen werden. Fahrbahnverschmutzungen und Schattenbildung durch die Fahrzeuge haben einen direkten negativen Einfluss auf den Stromertrag der Anlagen. Aufgrund der hohen Anforderungen kommt diese Installationsart nach dem aktuellen Stand der Technik und den hohen Zusatzkosten nur für gering frequentierte und gering belastete Flächen wie Seitenstreifen, Geh- und Fahrradwegen infrage. (J.D. Huyeng et al. 2022, S. 1210–1213)

Die Auswirkungen und Anforderungen an die Photovoltaikmodule und an die Verkehrsfläche werden in den nachfolgenden Unterkapiteln 2.5.1 und 2.5.2 auf der Seite 34 genauer betrachtet. Für die weitere Betrachtung werden die Lärmschutzintegration und die Überdachung berücksichtigt.

2.5.1 AUSWIRKUNGEN UND ANFORDERUNGEN AN DIE PHOTOVOLTAIKTECHNIK UND DER TRAGKONSTRUKTION DURCH DEN VERKEHR

Wenn Photovoltaik an Verkehrsflächen integriert wird, entstehen verkehrsbedingte Auswirkungen und Anforderungen an die Photovoltaik. Beim Einsatz an Lärmschutzeinrichtungen entlang von Straßen und Schienentrassen sind die wesentlichen Anforderungen Schallabsorption und Schalldämmung, damit die primäre Eigenschaft der Lärmschutzeinrichtung weiterhin gegeben ist. (Forster, online)

Ein weiterer wichtiger Punkt, der für Lärmschutzeinrichtungen und Überdachungen gegeben sein muss, ist eine blendfreie Oberfläche der Module. Zudem darf kein rasch abwechselnder Licht-Schatten-Wechsel aufgrund der Modulanordnung für die Verkehrsteilnehmer:innen entstehen (Haider et al. 2021, S. 170–171). Die einzelnen Photovoltaikmodule müssen so ausgelegt sein, dass sie möglichen Steinschlägen, die durch Fahrzeuge aufgewirbelt werden können, standhalten. Zusätzliche Verschmutzung durch Reifen- und Bremsabrieb muss entweder durch die Module selbst oder durch den Anstellwinkel der Module einen Selbstreinigungseffekt bei Niederschlag erzielen. (Technische Plattform Photovoltaik 2022, S. 1–2)

Die Tragkonstruktion inklusive der Photovoltaikmodule muss erhöhten Belastungen standhalten. Die dynamischen Belastungen durch den darunter liegenden Verkehr auf die Konstruktion sind wesentlich höher. Vom Einsatzgebiet abhängig sind die dynamischen Belastungen und daraus folgenden Geschwindigkeiten des Verkehrs. Bei Autobahnen und Schienentrassen sind die Belastungen wesentlich höher, während sie bei Parkflächen deutlich geringer sind. Andere übliche Belastungen wie Wind- und Schneelasten müssen je nach Standort berechnet werden. Die Konstruktion muss so ausgeführt sein, damit Regenwasser möglichst einfach abgeleitet werden kann und notwendige Wartungsarbeiten leicht zugänglich durchgeführt werden können (Haider et al. 2021, S. 23–25). Brand- und Anpralllasten, die durch darunterliegende Verkehrsmittel verursacht werden können, müssen beim Tragsystem berücksichtigt werden. Es darf kein Systemversagen über einen größeren Teil der Tragkonstruktion auftreten. (Haider et al. 2021, 108)

Im D-A-CH Raum wird in den Wintermonaten vermehrt Streusalz im Winterdienst eingesetzt. Die Kombination von Niederschlagswasser und Salz verursacht eine erhebliche Korrosionsbelastung an der Tragkonstruktion und den Photovoltaikmodulen. Die Oberflächen

müssen daher vor dieser aggressiven Umgebung geschützt werden, um eine lange Haltbarkeit zu gewährleisten. (Technische Plattform Photovoltaik 2022, S. 2)

2.5.2 AUSWIRKUNGEN UND ANFORDERUNGEN AN DIE VERKEHRSFLÄCHEN DURCH DIE ZUSÄTZLICHE NUTZUNG DER BEREITS VERSIEGELTEN FLÄCHEN

Neben den Auswirkungen auf die Photovoltaik gibt es auch Auswirkungen auf die Verkehrsflächen. Bei einer Überdachung der Verkehrsflächen und teilweise bei der Lärmschutzwandintegration entsteht der positive Effekt der Verschattung der Fahrbahnoberfläche. Aufgrund dieser Verschattung wird die Fahrbahn in den Sommermonaten zusätzlich gekühlt. Dies wirkt sich positiv auf die Lebensdauer der Oberfläche aus. Es entstehen weniger Beschädigungen auf der Fahrbahn und daraus folgend geringere Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten. Dies wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung des gesamten Infrastrukturprojektes. Die Lebensdauererweiterung der Fahrbahn kann in die Kostenrechnung der Photovoltaikanlage mit eingerechnet werden und die hohen Investitionskosten amortisieren sich dadurch schneller. Die Lebensdauer der Fahrbahn kann durch eine Überdachung um 20 bis 30 % verlängert werden. (Haider et al. 2021, S. 160–163)

Eine Überdachung mit Photovoltaik hat Auswirkungen auf die Schallemission einer Verkehrsfläche. Je nach Dachform und optionale zusätzliche Lärmschutzwand erhöht oder verringert sich der Schallpegel in der unmittelbaren und fernerer Umgebung. Daher ist bei einer Installation einer Photovoltaiküberdachung eine schallschutztechnische Untersuchung durchzuführen. Dies ist vor allem bei höherer Verkehrsgeschwindigkeit wie an Autobahnen oder Schienentrassen notwendig. (Haider et al. 2021, S. 169)

Ein weiterer Synergieeffekt zwischen der Verkehrsfläche und einer Photovoltaiküberdachung ist der Schutz vor Niederschlägen auf Fahrbahnen. In den Wintermonaten ist bei Schneefall ein geringerer Einsatz von Schneeräumung notwendig, da der anfallende Schnee durch Photovoltaikmodulen abgeschirmt wird. Dies reduziert die Kosten für den Winterdienst. (Haider et al. 2021, S. 9)

In Zukunft wird die Elektromobilität eine immer bedeutendere Rolle spielen. Daher ist die Stromerzeugung an den direkten Verbrauchsstellen über Ladeinfrastruktur von hoher Priorität. Die Energiegewinnung auf versiegelten Flächen kann für Auftraggeber:innen zusätzliche Einnahmen generieren. (Heinrich 2024, S. 2)

2.6 TRAGKONSTRUKTION-KONZEPTE AUS DER BAUTECHNIK

Photovoltaikmodule, die über Verkehrsflächen installiert werden, weisen die höchsten Sicherheitsanforderungen auf, besitzen jedoch aufgrund der großen Flächen das größte Potenzial. Die Sicherheitskriterien verursachen allerdings auch hohe Installationskosten für das Tragsystem. Um die Kosten zu senken und eine einfache Montage und Fertigung zu ermöglichen, muss die Tragstruktur relativ einfach gehalten werden (J.D. Huyeng et al. 2022, S. 1210). Die im Punkt 2.5 auf der Seite 32 angeführte negative Auswirkung bei Verschattung der Module muss auch bei der Tragkonstruktion beachtet werden. Die Anordnung der Module muss so erfolgen, dass sie sich nicht gegenseitig verschatten. Zudem muss bei der Montage von Masten und Tragkonstruktionselementen darauf geachtet werden, dass sie keine Verschattung der PV-Module verursachen.

2.6.1 TRAGSYSTEME

In diesem Kapitel werden mögliche Tragkonstruktion-Konzepte aus der Bautechnik dargestellt und beschrieben, welche für Überdachungen mit Photovoltaikmodulen infrage kommen.

2.6.1.1 RAHMEN TRAGWERKE

Rahmentragwerke tragen die Lasten hauptsächlich über eine Biege Wirkung ab. Sie können in mehrere Unterkategorien unterteilt werden (siehe Abb. 20 auf der Seite 37). Die einfachste Variante ist ein Biegeträger auf zwei eingespannten Stützen (a). Das System ist einfach zu montieren und benötigt keine zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen, erfordert jedoch große Fundamente, um die horizontalen Lasten abzutragen. Bei einem Zweigelenksrahmen (b) sind die Fundamentmassen wesentlich kleiner. Zweigelenksrahmen (c) sind in der Baustellenmontage wesentlich schwieriger zu handhaben. Die geringsten Rahmenquerschnitte und daraus resultierende gute Ausnutzungsgrade sind bei einem eingespannten Rahmen (d) zu erzielen. Hier sind die Baustellenmontage und der Transport eine Herausforderung (Rybicki und Prietz 2021, S. 226–227). Biegeträger können durch eine Seilkonstruktion und einen Druckstab zusätzlich unterspannt werden. Dadurch sinkt die Biegebeanspruchung im Träger und der Querschnitt kann verringert werden (Jahnke 2023, S. 103).

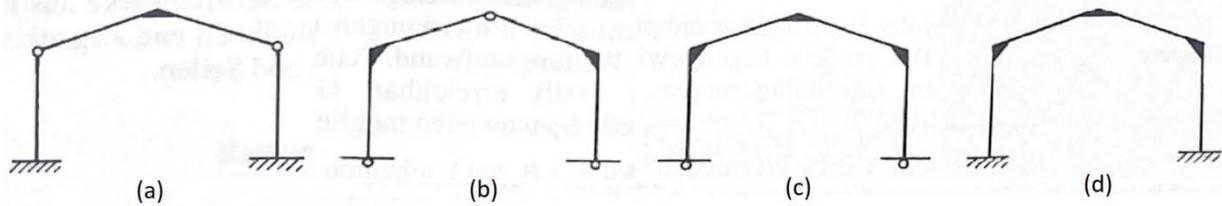


Abb. 20: statische Systeme von Rahmentragwerken (Rybicki und Prietz 2021, S. 226–227)

2.6.1.2 FACHWERKE

Fachwerke (siehe Abb. 21 auf der Seite 37) sind so strukturiert, dass nur Zug- und Druckkräfte in den einzelnen Stäben als Schnittgrößen auftreten. Dadurch können die Stabquerschnitte kleiner ausgeführt und Material eingespart werden. Bei größeren Stützweiten ist diese Eigenschaft von Vorteil. Die Produktion und Herstellung dieser Tragsysteme ist wesentlich aufwendiger als bei einfachen Biegeträgern. (Dinkler 2022, S. 71)

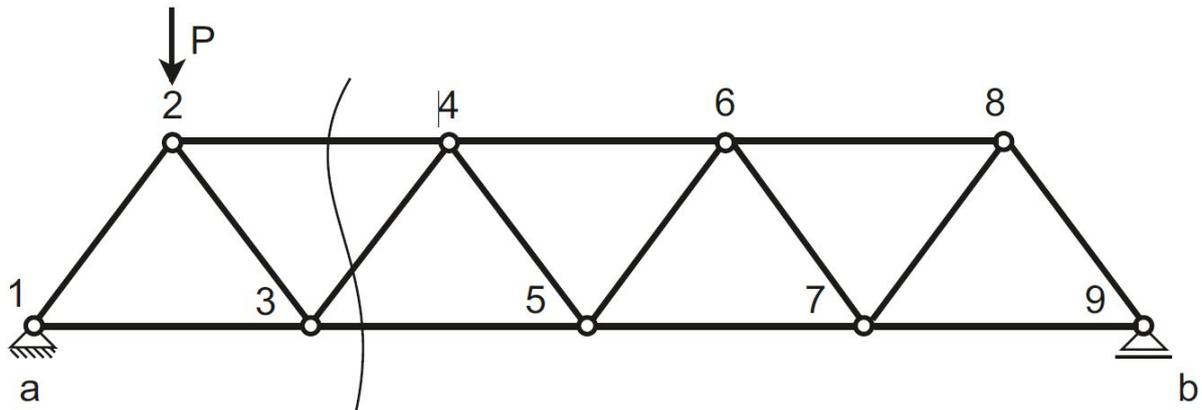


Abb. 21: statisches System eines Fachwerks (Dinkler 2022, S. 74)

2.6.1.3 BOGENTRAGWERKE

Für weite Spannweiten sind Bogentragwerke (siehe Abb. 22 auf der Seite 38) zu präferieren. Durch ihre Gewölbewirkung treten im Bauteil hauptsächlich Druckspannungen auf, was zu geringen Bauteildicken führt. Ein wesentlicher Nachteil ist ihre Formgebung, die der Gewölbewirkung zugrunde liegt und daher relativ unflexibel auf definierte Bauräume angepasst werden kann. Zusätzliche Berechnungen für den Stabilitätsnachweis sind erforderlich. (Dinkler 2022, S. 100)

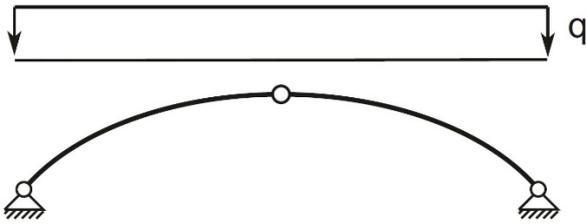


Abb. 22: statisches System eines Bogentragwerks (Dinkler 2022, S. 104)

2.6.1.4 SEILTRAGWERKE

Ausnützungsgrad und Spannweite sind bei Seiltragwerken (siehe Abb. 23 auf der Seite 38) am höchsten. Die Lastabtragung funktioniert nur über Zugkräfte in den Seilen. Zusätzlich werden noch Druckpfeiler im statischen System benötigt (Dinkler 2022, S. 106). Ein Nachteil bei Seilkonstruktionen ist der vergrößerte Platzbedarf und die hohen Fundamentlasten auf Zug.



Abb. 23: statisches System eines Seiltragwerks (Dinkler 2022, S. 106)

2.6.2 MATERIALIEN FÜR DIE TRAGSYSTEME

Drei wesentliche Materialien kommen im Bauwesen für Tragkonstruktionen zum Einsatz. Stahl hat zwar ein hohes spezifisches Gewicht, jedoch eine hohe Tragfähigkeit, wodurch schlanke Querschnitte verwendet werden können. Durch Recycling können die Tragsysteme nach ihrer Lebensdauer wiederverwendet werden. Ein wesentlicher Nachteil ist die geringe Feuerwiderstandsklasse ohne zusätzliche Vorkehrungen sowie das Korrosionsrisiko. Vollholz und Holzwerkstoffe besitzen hingegen ein geringes Eigengewicht, was hohe Spannweiten ermöglicht. Die gute Brandwiderstandsdauer und die hohe Umweltfreundlichkeit sind weitere positive Entscheidungskriterien. Stahlbeton kommt aufgrund des hohen Eigengewichts und der schlechten Umweltbilanz bei der Herstellung von Zement für eine leichte Tragstruktur für Photovoltaiküberdachungen nicht infrage. (Rybicki und Prietz 2021, S. 227–228)

2.6.3 ANFORDERUNG AN DIE PRODUKTION UND MONTAGE FÜR TRAGKONSTRUKTIONEN

Die Produktion der Tragkonstruktionskomponenten einschließlich des Zusammenbaus in transportfähige Baugruppen soll in einer Vorfertigung in einer Produktionshalle erfolgen, um

eine hohe Präzision und Qualität zu gewährleisten und die Montagezeit auf der Baustelle zu verkürzen. Bestehende Verkehrsflächen, an denen Photovoltaikanlagen nachgerüstet werden, können nur kurzzeitig für die Umbauarbeiten gesperrt werden. Die Vorortmontage erfolgt mit Kränen, indem die Baugruppen eingehoben werden. Die Montagestöße müssen so ausgeführt werden, dass sie auf der Baustelle ohne großen Aufwand und Überwachungsprozess in kurzer Zeit montiert werden können. (Haider et al. 2021, S. 122)

3 UMWELTBILANZIERUNG VON TRAG- KONSTRUKTIONEN FÜR PHOTOVOLTAIKANLAGEN ÜBER PARKFLÄCHEN

Um den Klimawandel zu bremsen, ist die Umstellung der gesamten Energiewirtschaft auf nachhaltige Energiesysteme ein zentrales Ziel in Österreich und der Europäischen Union. Der Ausbau der erneuerbaren Energiequellen muss stetig erhöht werden, um dieses Ziel zu erreichen. Dabei spielt die Energiegewinnung aus der Sonne durch Photovoltaik eine entscheidende Rolle. Wie im Punkt 2.1 auf der Seite 4 angeführt, benötigt Österreich bis zum Jahr 2030 zusätzlich rund 11,5 TWh und zusätzliche 20 TWh bis zum Jahr 2050 aus der Photovoltaik, um die Ziele für eine nachhaltige Energieerzeugung zu erreichen (Umweltverband WWF Österreich 2021, S. 4–5).

Beim Ausbau der Energiegewinnung mittels Photovoltaik besteht die Problematik des großen Flächenbedarfs für die Module. Die Bereitstellung von Flächen muss dabei im Einklang mit Mensch und Natur erfolgen und im besten Fall positive Synergieeffekte nutzen. Neben der Gebäudeintegration von Photovoltaikanlagen rücken versiegelte Flächen wie Straßen, Parkflächen und Schienenflächen in den Vordergrund.

In Österreich gibt es ca. 15.000 großflächige Parkflächen, die bei einer Belegung von 50 % ein theoretisches Energiepotenzial von jährlichen 4,2 TWh aufweisen (Fechner 2020, S. 38). Parkflächen weisen wesentliche Vorteile im Vergleich zu höherrangigen Verkehrsflächen wie Landstraßen, Autobahnen und Schienentrassen auf. Durch die langsamen Geschwindigkeiten und vereinzelt Fahrten der Verkehrsteilnehmer:innen auf Parkflächen sind die Belastungen infolge der verkehrsinduzierten Windbelastungen geringer bzw. vernachlässigbar. Die geringeren Belastungen verursachen wesentlich geringere Anforderungen an die Tragkonstruktion und die Solarmodule. Dadurch können die Tragkonstruktionen einfacher und mit geringeren Querschnitten ausgeführt werden, was die Wirtschaftlichkeit verbessert und die Umsetzung wahrscheinlicher macht.

Viele Grundlagen zur Integration von Photovoltaiküberdachungen über Verkehrsflächen wurden im D-A-CH-Forschungsprojekt „PV-Straßenüberdachung – Konzept PV – Süd – K“ ausgearbeitet (vgl. Abschnitt 2.4 auf der Seite 31). Die nachfolgende Arbeit nutzt ausgewählte publizierte Anforderungen, Berechnungen und Ergebnisse aus dem Ergebnisbericht dieser

Studie. Dieses Forschungsprojekt behandelt eine detaillierte wirtschaftliche Betrachtungsweise. Umweltaspekte wie die Bilanzierung von Energie und CO₂-Äquivalent-Emissionen, verursacht durch die notwendige Tragkonstruktion bei der Überdachung von Verkehrsflächen, werden nicht genauer betrachtet.

Im Rahmen des Nachhaltigkeitsgedankens müssen beim Ausbau der Photovoltaik an Verkehrsflächen die Tragelemente in die Umweltbilanz einer Anlage einbezogen werden. Bei der Überdachung von Parkflächen mit Photovoltaikmodulen müssen die entstandenen CO₂-Emissionen und der Energieaufwand bei der Herstellung der Tragkonstruktion mit dem Ertrag der Anlage gegenübergestellt werden. In dieser Arbeit wird eine Umweltbilanzierung für verschiedene Tragsystemkonzepte durchgeführt, wobei die Amortisationszeit für die Tragsysteme in Bezug auf CO₂-Emissionen und Energieeffizienz berechnet und ausgewertet wird. Umweltbilanzierungen sind in den Normen ÖNORM EN ISO 14040 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen sowie ÖNORM EN ISO 14044 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen geregelt. In dieser Arbeit wird eine Betrachtungsweise in Bezug auf die Bilanzierung von CO₂-Äquivalenz und Energie getroffen. Die Normen werden jedoch als Anhaltspunkte verwendet und nicht strikt angewendet.

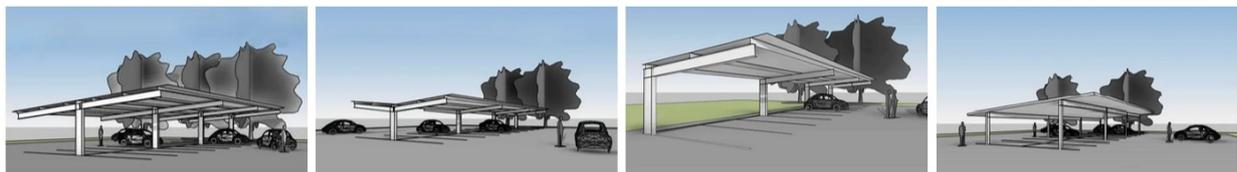
Für die abschließende Bilanzierung der beiden Umweltaspekte werden vorbereitende Schritte benötigt. Basierend auf den Tragkonzepten aus der Bautechnik (vgl. Abschnitt 2.6 auf der Seite 36) wird eine Marktanalyse zu vorhandenen Tragsystemen für Photovoltaiküberdachungen über Parkflächen durchgeführt. Die Systeme werden herstellerunabhängig ausgewählt, um die Möglichkeiten aus der Bautechnik von relevanten Tragstrukturen abzubilden. Anschließend werden beispielhafte Tragkonzepte für eine Beispielparkplatzanlage baustatisch ausgelegt und die Energie- und CO₂-Äquivalent-Einsparungen durch die Photovoltaikanlage ermittelt. Mit den gewonnenen Daten werden abschließend Bilanzierungen und Amortisationszeiten errechnet. Eine wirtschaftliche Betrachtung der Tragsystemkonzepte, wie im D-A-CH-Forschungsprojekt „PV Straßenüberdachung – Konzept PV – Süd – K“, wird in dieser Arbeit nicht gesondert durchgeführt.

3.1 ANALYSE ZU BESTEHENDEN TRAGSYSTEMEN ÜBER PARKFLÄCHEN

Im Abschnitt 2.6 auf der Seite 36 werden grundlegende Tragstrukturkonzepte aus der Bautechnik aufgeführt und in Kurzform beschrieben. In der Bautechnik wird zwischen

massiven Rahmentragwerken mit und ohne Unterspannung, aufgelösten Fachwerken, Bogentragwerken und Seiltragwerken unterschieden. Als Materialien kommen Holz, Stahl und Stahlbeton zum Einsatz. Es existieren mehrere Tragstrukturen, welche von Herstellern zur Überdachung von Parkflächen angeboten werden. In diesem Abschnitt wird daher eine Ist-Analyse der am Markt befindlichen Tragsysteme zur Photovoltaiküberdachung durchgeführt, wobei fünf Beispielsysteme von Herstellern vorgestellt und analysiert werden. Die Systeme werden Herstellerunabhängig ausgewählt. Sie werden exemplarisch ausgesucht, um die relevanten Tragsysteme aus der Bautechnik abzubilden. Tragsysteme wie eingespannte Stützen mit auskragenden Trägern oder Rahmensysteme werden von diversen Herstellern angeboten.

Das Unternehmen Hörmann GmbH & Co. KG bietet neben dem Hallenbau auch Überdachungen mit Photovoltaikanlagen über Parkflächen an. Dabei werden Einzel-, Doppelreihen und Komplettüberdachungen angeboten. In der Abb. 24 auf der Seite 42 sind die Lösungsansätze für Einzel- und Doppelreihen von Parkplätzen abgebildet. Die Systeme T, Y und L basieren auf eingespannten Stützen mit auskragenden Trägern. Diese Systeme zeichnen sich durch stützenfreie Parkflächen aus, die eine maximale Flexibilität bei der Nutzung ermöglichen. Als Werkstoffe kommen Stahl, Holz-Stahl Kombinationen und reines Holz zum Einsatz. (Hörmann GmbH & Co. KG, online)



T-Variante

Y-Variante

L-Variante

Basic-Variante

Abb. 24: Hörmann Überdachungsvarianten für Parkflächen (Hörmann GmbH & Co. KG, online)

Da die Hörmann GmbH & Co. KG im Hallenbau spezialisiert ist, bietet das Unternehmen auch komplette Überdachungen inkl. Photovoltaikanlagen von Parkflächen an (siehe Abb. 25 auf der Seite 43). Dabei werden komplette Dächer inkl. Eindeckungen hergestellt und mit Photovoltaik ausgestattet, zudem gehören auch teiltransparente Photovoltaikmodule ohne Dacheindeckungen zum Angebot. Das Unternehmen passt die Anlagen individuell an die Kundenanforderungen an und ist daher flexibel bei der Gestaltung der Tragkonstruktion. (Hörmann GmbH & Co. KG, online)



Abb. 25: Hörmann Komplettüberdachung einer Parkflächen (Hörmann GmbH & Co. KG, online)

Das Unternehmen 6B Ark GmbH erstellt architektonisch ansprechende Carport-Lösungen aus Holz/Stahl oder Stahl/Stahl Kombinationen (siehe Abb. 26 auf der Seite 43). Dabei werden auf einem Betonfundament eingespannte Stützen aus Stahl oder Beton angebracht. Darauf aufbauend werden auskragende Holz- oder Stahlkonstruktionen montiert. Neben dem Schutz der Fahrzeuge wird durch die Photovoltaikanlage Energie gewonnen. (6B Ark GmbH, online)



Abb. 26: Rendering einer Carportüberdachung inkl. Photovoltaik des Unternehmens 6B Ark GmbH (6B Ark GmbH, online)

Bei SOPAGO (siehe Abb. 27 auf der Seite 44) werden Stahlstützen auf Schraubfundamenten an den Parkflächen angeordnet. Darauf werden durchlaufende Holzleimbinder fixiert. Die modulartige Satteldachkonstruktion mit 10° Neigung in Ost-West-Ausrichtung ermöglicht eine gleichmäßige Energieerzeugung über den Tag. Bifaciale-Module (siehe Abb. 16 auf der Seite 29) erhöhen den Energieertrag und lassen Licht teilweise durch. Durch die Modulbauweise kann das System einfach an die Größe der Parkfläche angepasst werden und leicht erweitert werden. (SOPAGO GmbH, online)



Abb. 27: Parkplatzphotovoltaik der Firma SOPAGO GmbH (SOPAGO GmbH, online)

Park-Solar bietet Photovoltaiküberdachungen auf Basis einer Seilkonstruktion an (siehe Abb. 28 auf der Seite 44). Das Prinzip beruht auf einem abgespannten Seiltragwerk mit Druckstützen. Es werden stehende Druckpfeiler angeordnet. Darüber werden zugbelastete Bänder, an der die Module befestigt werden, montiert und seitlich abgespannt. In Querrichtung werden aussteifende Verbände angebracht. Der Materialeinsatz ist durch die hoch beanspruchte Seilkonstruktion gering im Vergleich zu massiven Tragkonstruktionen. Die Module werden horizontal angebracht. (PARK-SOLAR GmbH, online)



Abb. 28: Seiltragkonstruktion mit Photovoltaik von Park-Solar (PARK-SOLAR GmbH, online)

Eine Spezialkonstruktion für Photovoltaikanlagen ist das Solarfaltdach Horizon von dhp technology AG (siehe Abb. 29 auf der Seite 45). Das System beruht auf einer Seilkonstruktion mit einem patentierten Faltmechanismus für die Photovoltaikmodule. Zum Einsatz kommen glasfreie Leichtbaumodule. Durch das geringe Gewicht der Module und dem Faltmechanismus können große Spannweiten realisiert werden. Bei erhöhten Windgeschwindigkeiten, Schnee oder Hagel werden die Module über den Faltmechanismus auf den Seilen eingefahren und in einer Schutzposition vor den Wettereinwirkungen

geschützt. Durch die Leichtbauweise kann der Materialeinsatz um 50 % reduziert werden, im Vergleich zu ähnlichen Strukturen. Bei diesem System ist der Schutzvorteil der Fahrzeuge vor Wettereinwirkungen nicht gegeben, da die Module selbst geschützt und eingefahren werden. Dennoch wird eine Verschattung der darunter liegenden Flächen gewährleistet. Das System kann auch in schneereichen Regionen nach dem Schneefall Energie erzeugen, da sie vor Schnee geschützt werden. (dhp technology AG, online)



Abb. 29: Photovoltaikfaldach von dhp technology AG (dhp technology AG, online)

3.2 STATISCHE BERECHNUNG DER TRAGKONSTRUKTIONSKONZEPTE

Um eine Umweltbilanzierung in Bezug auf CO₂-Äquivalent-Emissionen und Energie für Photovoltaiküberdachungen durchzuführen, müssen Vergleichsparameter definiert werden. Dazu zählen eine festgelegte Vergleichsparkfläche mit denselben Lastannahmen und Einwirkungen sowie herstellerunabhängige Tragwerkkonzepte. Diese Parameter ermöglichen den Vergleich der Tragwerkkonzepte und eine objektive Bewertung der ökologischen Auswirkungen. Dies schafft eine Grundlage, um Tragwerke für Photovoltaiküberdachungen nach umweltfreundlichen Aspekten auszuwählen.

3.2.1 DEFINITION DER PARKFLÄCHE

Um eine Vergleichbarkeit der Tragsysteme herzustellen, muss zunächst eine standardisierte Parkfläche festgelegt werden. Diese Definition muss den Grundriss und das Lichtraumprofil umfassen. Das Lichtraumprofil ist der Raum, den Fahrzeuge benötigen, um sicher rangieren zu können. Mindestmaße für die Parkflächen sind für Österreich in der OIB-Richtlinie 4 geregelt. OIB-Richtlinien sind in Österreich zwar nicht direkt rechtlich verbindlich, jedoch werden sie von den einzelnen Bundesländern über die Bauordnung vollständig oder mit Abweichungen übernommen. Die genauen Bestimmungen und welche Versionen Gültigkeit haben, werden von den Bundesländern geregelt. Für die beispielhafte Parkfläche für die

Umweltbilanzierung wird die Version Mai 2023 der OIB-Richtlinie 4 herangezogen (siehe Tabelle 1 auf der Seite 46). In der Version April 2019 wurden keine Änderungen bei den Mindestabmessungen für Parkflächen, Fahrbahngassen oder lichten Höhen bei überdachten Stellplätzen vorgenommen.

Tabelle 1: Mindestwerte für Parkplätze und Fahrbahngassen (Österreichisches Institut für Bautechnik 2023, S. 7)

	Senkrechtaufstellung	Schrägaufstellung		Längsaufstellung
		60°	45°	
Winkel des Stellplatzes zur Fahrgasse	90°	60°	45°	0°
Stellplatzgröße für Personenkraftwagen	2,50 m × 5,00 m	2,50 m × 5,00 m		2,30 m × 6,00 m
Barrierefreie Stellplatzgröße für Personenkraftwagen	3,50 m × 5,00 m	3,50 m × 5,00 m		3,50 m × 6,50 m
Fahrgassenbreite	6,00 m	4,50 m	3,50 m	3,00 m

Die Mindestmaße dürfen durch bauliche Maßnahmen wie Stützen oder Wände nicht reduziert werden. Ladeeinrichtungen für elektrisch betriebene Fahrzeuge können in diesem Bereich angebracht werden. Bei überdachten Stellflächen muss die minimale lichte Höhe 2,10 m betragen, wobei die genauen Abmessungen mit den Anforderungen der Fahrzeuge abgeglichen werden müssen. (Österreichisches Institut für Bautechnik 2023, S. 7–8)

Die Abmessungen der Stellplatzgröße und der Fahrbahngasse werden für die Vergleichsparkfläche aus der OIB-Richtlinie 4 (Version Mai 2023) übernommen. Die lichte Höhe für die Tragkonstruktion der Photovoltaiküberdachung wird auf 2,50 m festgelegt. Laut OIB-Richtlinie 4 muss diese mindestens 2,10 m betragen. Dadurch gibt es mehr Spielraum für größere Fahrzeuge, die untergestellt werden. In der Abb. 30 auf der Seite 47 ist die Parkfläche für die Umweltbilanzierung dargestellt. Es werden vier Parkreihen mit je zwei äußeren Einzelreihen und einer mittigen Doppelreihe gewählt. Die beiden Fahrgassen sind 6 m breit. Für die Tragkonstruktion wird ein 50 cm breiter Streifen in der Mitte der Doppelreihe angeordnet. Der äußere Randstreifen kann je nach Tragkonstruktion verbreitert werden. Dieses Parkkonzept basiert auf herkömmlichen Parkflächen, bei denen je nach Größe zusätzliche doppelte Mittelreihen ergänzt oder die Breite der Reihen angepasst werden. Die Anordnung der Parkreihen und die Anzahl der Parkplätze wurden so gewählt, dass die Vor- und Nachteile der jeweiligen Tragkonzepte aufgezeigt und einander gegenübergestellt werden können. Die jeweiligen Tragkonzepte werden im Abschnitt 3.2.3 ab der Seite 50 dargestellt.



Abb. 30: Parkfläche für Umweltbilanzierung mit Abmessungen in cm

3.2.2 LASTANNAHMEN UND EINWIRKUNGEN

Als Standort für die Vordimensionierung der Tragwerkkonzepte wird Salzburg angenommen. Dies ist besonders wichtig für die Annahmen der Schnee- und Windlasten auf die Tragstruktur, da diese Lasten standortbezogen variieren. Die relevanten Lasten für die Berechnung der Tragkonstruktionen werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Aufgrund der vergleichsweise hohen Schneelast von $1,6 \text{ kN/m}^2$, wie in Punkt 3.2.2.2 auf der Seite 49 angegeben, wurde Salzburg als Beispielstandort ausgewählt. Diese Last deckt einen Großteil der Ortschaften in den Ballungszentren der Landeshauptstädte ab.

Die aerodynamischen Lasten aus dem Verkehr können für Überdachungen an Parkflächen zwar zusätzliche Belastungen verursachen, sind jedoch aufgrund der geringen Geschwindigkeiten minimal. Hierfür kann der Auszug aus der ÖNORM EN 1991-2 Verkehrslasten auf Brücken herangezogen werden. Aus den aerodynamischen Einwirkungen auf benachbarte Bauteile durch Zugvorbeifahrten geht hervor, dass bei geringen Geschwindigkeiten keine zusätzlichen Druck- oder Sogbelastungen auftreten. In der Abb. 31 auf der Seite 48 sind die charakteristischen Beiwerte der durch den Zugverkehr hervorgerufenen Belastungen angegeben. Geschwindigkeiten spielen hierbei erst ab

$v = 120 \text{ km/h}$ eine wesentliche Rolle für die umliegenden Objekte. Da die Geschwindigkeiten auf Parkflächen wesentlich geringer sind, entstehen keine zusätzlichen Lasten.

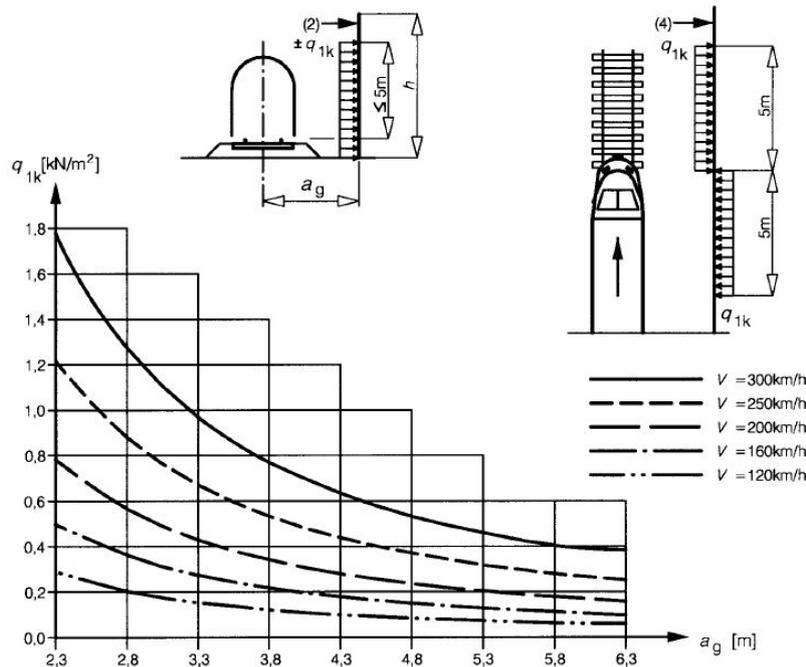


Abb. 31: charakteristische Beiwerte für vertikale Flächen zum Gleis durch vorbeifahrende Züge (ÖNORM EN 1991-2, S. 113)

3.2.2.1 LASTEN DURCH AUFBAUTEN DER PHOTOVOLTAIKANLAGE

Auf die Tragkonstruktion werden die Photovoltaikmodule einschließlich der notwendigen Unterkonstruktion montiert. Als Flächenlast für diese Komponenten wird $50 \text{ kg/m}^2 = 0,5 \text{ kN/m}^2$ angenommen. Für die Module wurde eine Glasstärke von 6 mm mit einem Zuschlag für die Modulrahmen und die Unterkonstruktion verwendet. Damit wird diese Last konservativ angenommen. Dieser Wert wird aus dem Ergebnisbericht der DACH-Studie zur Überdachung von Autobahnen übernommen (Haider et al. 2021, S. 90). Wechselrichter und andere Komponenten einer Photovoltaikanlage werden nicht am Tragsystem angebracht und an einem eigenen Standort positioniert. Dadurch spielen sie für die statische Auslegung der Konstruktion keine Rolle. Leichtbaumodule ohne Glasscheibe, wie sie im Speziaalsystem mit einem Faltsystem vom Hersteller dhp technology AG (siehe Abschnitt 3.1 auf der Seite 41) eingesetzt werden, werden für diese Gegenüberstellung der Tragsysteme nicht berücksichtigt. Beim Einsatz von Leichtbaumodulen verringert sich die Lastannahme des Aufbaus, wodurch Materialeinsparungen erzielt werden.

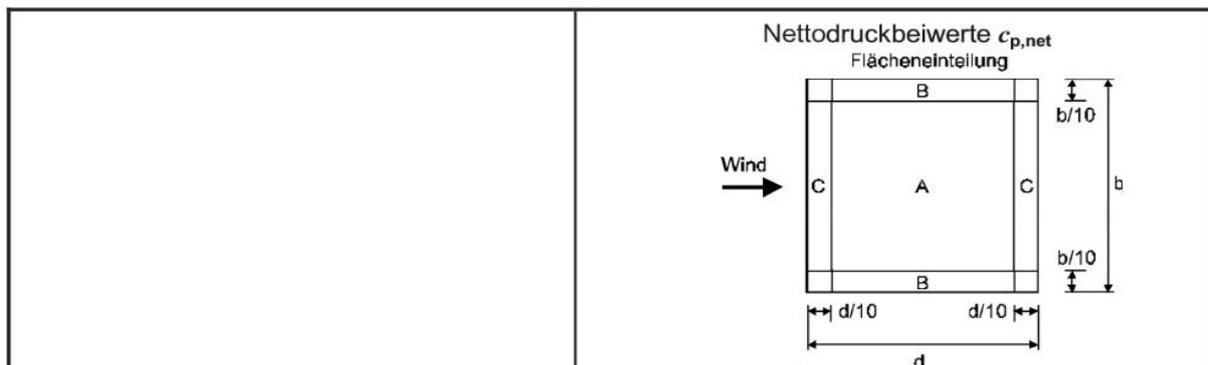
3.2.2.2 SCHNEELAST

Schneelasten werden in Österreich nach der ÖNORM B 1991-1-3 Ausgabe 2022-05-15, standortbezogen festgelegt. Als Vergleichsstandort wird, wie beschrieben, der Ort Salzburg herangezogen. Die charakteristische Schneelast am Boden beträgt in Salzburg $s_k = 1,6 \text{ kN/m}^2$. Die standortbezogene Schneelast wurde mit HORA berechnet (siehe Anhang A – Schnee und Wind Belastungen auf der Seite 116). Laut ÖNORM B 1991-1-3 darf die Schneelast bei Behinderung des Abwehens des Schnees nicht abgemindert werden, und die Dachschneelast ist mit der Bodenschneelast anzusetzen. Bei der Anbringung von Photovoltaikmodulen kann in bestimmten Fällen der Formbeiwert der daneben liegenden Dachfläche angesetzt werden (ÖNORM B 1991-1-3, S. 11–13). Diese Abminderung der Schneelast wird für die Querschnittsberechnungen nicht berücksichtigt, um die Tragfähigkeit der Bauteile auf der sicheren Seite zu bewerten.

3.2.2.3 WINDLAST

Die Windlasten werden in Österreich nach der ÖNORM B 1991-1-4 Ausgabe 2023-04-01 je nach Standort berechnet. Der Basis Winddruck für Salzburg ist $q_{b,0} = 0,39 \text{ kN/m}^2$ auf einer Seehöhe von 424 m (siehe Anhang A – Schnee und Wind Belastungen auf der Seite 116). Die Beiwerte für Wind bei freistehenden Überdachungen sind der Tabelle 2 auf der Seite 49 zu entnehmen. Die Dächer haben je nach Tragkonstruktionstyp einen Neigungswinkel von 0° oder 10° . Da Fahrzeuge unter den Dachflächen stehen, wird mit einem Versperrungsgrad von $\varphi = 1$ gerechnet. Auf der Dachfläche können die maximalen und minimalen Werte wirken. Der Versperrungsgrad von $\varphi = 1$ erzeugt eine höhere negative, nach oben gerichtete Windbelastung, da die Luft gestaut wird.

Tabelle 2: Windbeiwerte für freistehende Dächer (ÖNORM EN 1991-1-4, S. 58)



Neigungswinkel α	Versperrungsgrad φ	Kraftbeiwert c_f	Bereich A	Bereich B	Bereich C
0°	Maximum alle φ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
10°	Maximum alle φ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	AC) - 1,6 AC)	- 2,6	- 2,7

3.2.2.4 ANPRALLASTEN DURCH FAHRZEUGE

Die Parkfläche wird für PKW ausgelegt. Daraus ergibt sich für den außergewöhnlichen Lastfall eine Anprallkraft von $F_d = 50 \text{ kN}$ auf einer Anprallhöhe von 0,5 m zur Straßenoberkante (siehe Tabelle 3 auf der Seite 50). (ÖNORM EN 1991-1-7, S. 21)

Tabelle 3: Anprallkräfte aus dem Straßenverkehr für Stützkonstruktionen (ÖNORM EN 1991-1-7, S. 21)

Kategorie	Kraft F_{dx}^a kN	Kraft F_{dy}^a kN
Autobahnen und Bundesstraßen	1000	500
Landstraßen außerhalb von Ortschaften	750	375
Innerstädtische Straßen	500	250
Privatstraßen und Parkgaragen für:		
— Pkws ^a	50	25
— Lkws ^b	150	75
^a x = in Fahrtrichtung, y = quer zur Fahrtrichtung. ^b Lkws mit Leergewicht größer als 3,5 t.		

— Die Anprallkraft F von Lkws auf Stützkonstruktionen darf in einer Höhe h zwischen 0,5 m und 1,5 m über Straßenoberkante angesetzt werden. Bei Schutzplanken gelten größere Werte. Die empfohlene Anprallfläche ist $a = 0,5 \text{ m}$ hoch und so breit wie das Bauteil, maximal 1,5 m breit.

— Die Anprallkraft F von Pkws darf in einer Höhe $h = 0,5 \text{ m}$ über Straßenoberkante angesetzt werden. Die empfohlene Anprallfläche ist 0,25 m hoch und so breit wie das Bauteil, maximal 1,50 m breit.

3.2.3 TRAGKONSTRUKTIONSKONZEPTE UND DEREN NACHWEIS DER TRAGFÄHIGKEITEN

Auf Basis der allgemeinen bautechnischen Analyse von Tragwerken (siehe 2.6 auf der Seite 36) sowie unter Berücksichtigung der auf dem Markt erhältlichen Tragsysteme für

Photovoltaikanlagen über Parkflächen werden in diesem Abschnitt beispielhafte Tragkonzepte ausgearbeitet und einer Vordimensionierung unterzogen. Als Parkfläche dient jene, die in Abb. 29 auf der Seite 47 dargestellt ist. Die Fläche zur Anbringung der Photovoltaikmodule umfasst nur den Bereich über den Parkflächen. Der Bereich über den Fahrgassen wird nicht mit Modulen ausgestattet. Es muss darauf geachtet werden, dass im freien Lichtraumprofil keine Tragkonstruktionskomponenten angeordnet werden.

Eine uneingeschränkte Nutzung der Parkfläche, sowohl beim Parken als auch beim Rangieren, ist von entscheidender Bedeutung, um einen störungsfreien Parkplatzbetrieb zu gewährleisten und die Parkfläche vollständig auszunutzen. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf den Entwurf und die Auslegung einer Tragstruktur, um keine bzw. nur geringe Einschränkungen auf die Parkfläche zu verursachen. Vertikale Lasten aus Eigengewicht, Wind und Schnee müssen vom Tragwerk sicher in den Untergrund über Stützen abgeleitet werden. Stützen, die in der Mitte von Doppelreihen oder auf der Stirnseite von Einzelreihen angeordnet werden, haben keinen Einfluss auf die Verkehrsfläche (vgl. Abschnitt 3.2.1 Definition der Parkfläche auf der Seite 45). Aus statischen Gründen können auch zusätzliche Abstützungen in der Verkehrsfläche positioniert werden. Diese haben den Nachteil einer geringen Nutzungseinschränkung der Parkfläche. Tragsysteme mit zusätzlichen Abstützungen können schlanker ausgeführt werden.

Ein weiterer Aspekt bei der Tragkonzeptfindung ist die potenzielle Verschattung der Photovoltaikmodule und der daraus folgende negative Einfluss auf den Energieertrag (vgl. Abschnitt 2.2.6.2 auf der Seite 19). Daher müssen Tragkonzepte so entworfen werden, dass die Tragstruktur keine Verschattung auf die Module verursacht. Dies erfordert, dass die Photovoltaikmodule am höchsten Punkt des Gesamtsystems einschließlich der Tragkonstruktion angeordnet werden. Mögliche überragende Druckstäbe mit einer auf Zug belasteten Abspannung, die eine schlankere Bauweise der Tragstruktur ermöglichen, können nicht umgesetzt werden. Solche unterstützenden Maßnahmen müssen unterhalb der Module erfolgen.

Materialien für Tragsysteme sind im Abschnitt 2.6.2 auf der Seite 38 genauer erläutert. Aus dem Eigengewicht-Tragfähigkeitsverhältnis und der Umweltbilanz sind für diese Anwendung die Materialien Holz und Stahl zu bevorzugen. Stahlbeton wird für die Fundamentierung der Tragsysteme verwendet. Bei den Stützen werden bei den Konzepten vorwiegend Köcherfundamente ausgewählt (siehe nachfolgende Unterkapitel). Dies hat den Hintergrund,

dass sie eine geringere Masse bei gleicher Tragfähigkeit aufweisen. Um eine Vergleichbarkeit von Tragsystemen und deren Materialien zu erreichen, werden für die Tragkonzepte nur gleiche Materialien, entweder Stahl oder Holz, gewählt. Nur Verstärkungsmaßnahmen wie Aussteifungsverbände oder Abstützungen werden bei Holzkonstruktionen aus Stahl ausgeführt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine bessere Gegenüberstellung der jeweiligen Materialien. In der Praxis werden oftmals hybride Systeme umgesetzt, wobei Materialien nach ihren Eigenschaften kombiniert werden. Die hybriden Systeme werden bei der Analyse nicht betrachtet, da zahllose Kombinationen möglich sind. Eine Abschätzung der CO₂- und Energiebilanz ist durch Interpolation trotzdem möglich.

Aus den Tragwerkanalysen der Bautechnik, der Marktanalyse und den in diesem Kapitel angeführten Anforderungen an die Tragkonzepte wurden folgende Konzepte ausgewählt:

1. auskragende massive Stahlkonstruktion
2. auskragende massive Holzkonstruktion
3. Stahlrahmen mit Aussteifungsverband
4. Holzrahmen mit Aussteifungsverband
5. unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband
6. abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben

Diese Tragwerke spiegeln einen Großteil der Tragkonzepte aus der Bautechnik und der auf dem Markt befindlichen Überdachungen mittels Photovoltaikanlagen über Parkflächen wider. Eine Unterspannung der Hauptträger wird nur für die Stahlkonstruktion betrachtet. Die Anschlusspunkte für Abspannungen im Holzbau sind aufwendig, was eine Wirtschaftlichkeit bei den aktuell betrachteten geringeren Spannweiten von 5 m nicht gewährleistet. Da Holz von Grund auf eine gute Umweltbilanz in Bezug auf CO₂-Äquivalent-Emissionen und Energieeinsatz aufweist, wird dieses Konzept in der Analyse nicht gesondert betrachtet.

Die Seilkonstruktion, die an das Konzept von Park-SOLAR GmbH angelehnt ist (siehe Abb. 28 auf der Seite 44), kann systembedingt nur horizontal, mit einer Neigung von 0°, ausgeführt werden. Alle anderen Konzepte wurden jeweils mit einer horizontalen Anordnung, einer Ost-West- und Südausrichtung mit einem Neigungswinkel von 10° betrachtet. Die Auswirkungen der Modulanordnung sind im Abschnitt 2.2.6.1 Sonneneinstrahlung auf der Seite 15 erläutert.

Bei der Vordimensionierung wurden ausschließlich Querschnitte der Tragstrukturen und die Fundamentgrößen ermittelt. Detailnachweise von Anschlüssen oder Sonderkonstruktionen

wurden nicht durchgeführt. Das Ziel dieser Dimensionierung ist es, eine Vergleichbarkeit der CO₂-Emissionen und Energieaufwendungen der jeweiligen Tragelemente herzustellen. Hierbei haben die Querschnittsgröße und die notwendigen Fundierungen den wesentlichsten Einfluss. Materialien für Anschlüsse und Details wie Schrauben, Anschlussbleche oder Verstärkungsmaßnahmen weisen im Vergleich zur eigentlichen Tragstruktur nur einen geringen Materialanteil auf. Die Lasten und Einwirkungen, die auf die Tragstrukturen einwirken, sind im Kapitel 3.2.2 Lastannahmen und Einwirkungen ab der Seite 47 angegeben. Die Einwirkungen auf das Tragwerk umfassen die Gewichte der Aufbaustruktur, einschließlich der PV-Module und deren Unterkonstruktion, das Eigengewicht der Tragkonstruktion, die Lasten aus Wind und Schnee sowie die Sonderlast durch den Anprall eines PKWs auf die Struktur. Die Dimensionierung der Tragstrukturen und Fundamentierung wurde mit der Statiksoftware RFEM 5, Version 5.35.01, der Dlubal Software GmbH durchgeführt.

Die zuvor angeführten Tragsysteme wurden mit den Abmessungen sowie Belastungen in RFEM 5 eingegeben und die Lastfallkombinationen gebildet. Die Stahlquerschnitte wurden anschließend mit dem Zusatzmodul RF-Stahl nach Eurocode 3 ÖNORM B 1993 und die Holzquerschnitte mit dem Modul RF-Holz Pro nach Eurocode 5 ÖNORM B 1995 bemessen. Aus den Lagerreaktionen wurden die erforderlichen Fundamentmassen mit RF Fund Pro ermittelt. Bei der Dimensionierung der Tragsysteme wurde die Dachneigung von 0° und 10° berücksichtigt. Die zwei auskragenden Systeme wurden mit beiden Neigungen gesondert nachgewiesen. Die Dachneigung hatte jedoch keinen merkbaren Einfluss auf die Querschnittsgrößen, da bei beiden Möglichkeiten dieselben Abmessungen ermittelt wurden. Die Rahmensysteme wurden daher nur mit einer horizontalen Dachanordnung berechnet. Bei einer 10° Neigung müsste nur eine Seite der Stütze verlängert werden, was keine Querschnittsänderung verursacht.

Die vollständige Nachweisführung der Vordimensionierung der jeweiligen Tragstrukturen befindet sich im Anhang B – Vollständige Nachweisführung und Berechnungen der Tragstrukturen auf der Seite 118. Relevante Ausschnitte der Berechnung, wie die Ausnutzungsgrade der Querschnitte nach dem Grenzzustand der Tragfähigkeit und die Verformungen des Systems im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, sind in den jeweiligen Kapiteln angeführt. Die Auswertung der Nachweisführung, einschließlich einer Bauteilliste mit Materialien, Abmessungen, Gewichten und der Fundamentierung, wird auch in den Unterkapiteln angegeben.

3.2.3.1 AUSKRAGENDE MASSIVE STAHLKONSTRUKTION

Dieses Tragsystem basiert baustatisch auf eingespannten Stützen mit Kragträgern, die die horizontalen und vertikalen Lasten in das Fundament und Erdreich abtragen. Auf diesen Trägern werden Dachpfetten angebracht. Die Photovoltaikmodule, die auf einer Unterkonstruktion auf der Tragkonstruktion angebracht sind, werden nicht gesondert betrachtet, da sie bei allen Systemen gleich sind. Als Material werden HE-B-Stahlträger aus Baustahl S 235 verwendet. Die Fundamentierung besteht aus Köcherfundamenten mit Beton C25/30 und Betonstahl B550. Dieses System kann horizontal sowie mit einer 10° Ost-West- und 10° Südausrichtung umgesetzt werden. In der Abb. 32 auf der Seite 54 ist die horizontale Ausführung und in der Abb. 33 auf der Seite 55 die Ost-Westausrichtung mit einer Dachneigung von 10° dargestellt. Die gesamte Tragkonstruktion einschließlich Fundamentierung wird in einer Vorfertigung in Einzelteilen produziert, mit Lastkraftwagen zum Aufstellort transportiert und vor Ort über Schraubverbindungen zusammengefügt. Das Tragkonzept hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Abstützungen in der Parkfläche benötigt werden. Dadurch kann die Fläche uneingeschränkt beim Einparken und Rangieren genutzt werden. Durch die auskragenden Träger entstehen hohe Biegemomente im Tragsystem, die zu großen Querschnitten und großen Fundamentmassen führen. Speziell bei der einreihigen Ausführung führt die unsymmetrische Belastung zu einer weiteren Erhöhung der Querschnitte und Massen. Eine vollständige Stückliste mit den Materialien, Querschnitten und Gesamtmassen ist der Tabelle 4 auf der Seite 55 zu entnehmen.

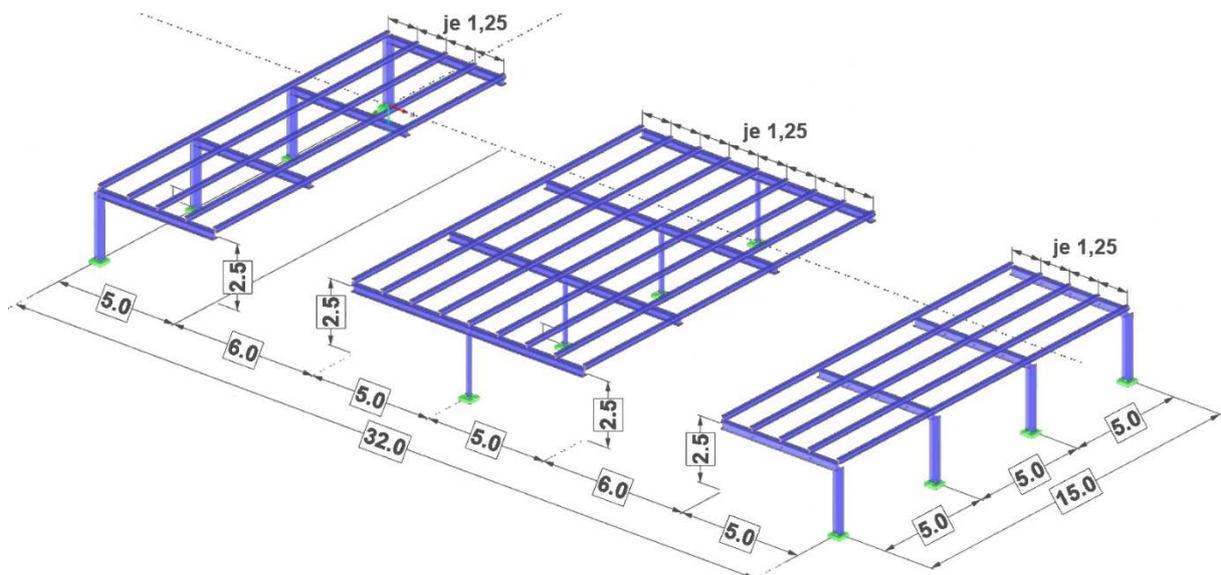


Abb. 32: Konzeptdarstellung - auskragende massive Stahlkonstruktion - Maße in [m] – 0° Dachneigung

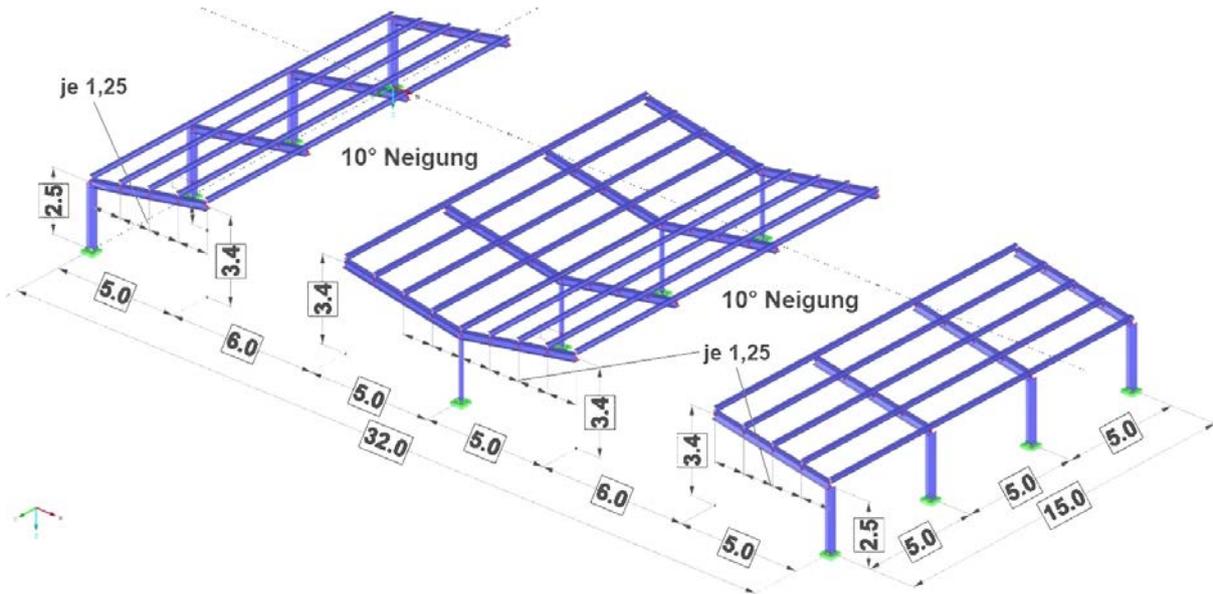


Abb. 33: Konzeptdarstellung - auskragende massive Stahlkonstruktion - Maße in [m] – 10° Dachneigung mit Ost-West-Ausrichtung

Tabelle 4: Stückliste Tragwerk und Fundament – auskragende massive Stahlkonstruktion

Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Länge [m]	Gesamtl. [m]	Quers.-Masse [kg/m]	Masse [kg]	Gesamtm. [t]
1	HE B 260 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Stützen 1-R.	8	2,50	20,00	92,63	231,58	1,853
2	HE B 260 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Stützen 2-R.	4	2,50	10,00	92,63	231,58	0,926
3	HE B 260 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Kragträger 1-R.	8	5,00	40,00	92,63	463,15	3,705
4	HE B 260 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Kragträger 2-R.	4	10,00	40,00	92,63	926,30	3,705
5	HE B 200 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Dachpfetten	57	5,00	285,00	61,31	306,55	17,473
Summe:				81		395,00			27,663
Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Vol. [m³]	Gesamtvol. [m³]	Quers.-Masse [t/m³]	Masse [t]	Gesamtm. [t]
1	Fundament 1 - Beton	Beton C25/30	Fundierung 1-R.	4	4,94	19,76	2,50	12,35	49,400
2	Fundament 2 - Beton	Beton C25/30	Fundierung 1-R.	4	4,16	16,64	2,50	10,40	41,600
3	Fundament 3 - Beton	Beton C25/30	Fundierung 2-R.	2	0,67	1,34	2,50	1,68	3,350
4	Fundament 4 - Beton	Beton C25/30	Fundierung 2-R.	2	1,66	3,32	2,50	4,15	8,300
Summe:				12		41,06			102,650
Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Vol. [m³]	Gesamtvol. [m³]	Quers.-Masse [t/m³]	Masse [t]	Gesamtm. [t]
1	Fundament 1 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung 1-R.	4	-	-	-	-	1,192
2	Fundament 2 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung 1-R.	4	-	-	-	-	0,715
3	Fundament 3 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung 2-R.	2	-	-	-	-	0,099
4	Fundament 4 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung 2-R.	2	-	-	-	-	0,091
Summe:				12					2,097

Die Querschnitte und Fundamente wurden mit dem Statik-Programm Statiksoftware RFEM 5, Version 5.35.01, der Dlubal Software GmbH nachgewiesen. Die gesamte Berechnung befindet sich im Abschnitt 11.2 Anhang B – Vollständige Nachweisführung und Berechnungen der Tragstrukturen ab der Seite 118. Berechnet wurde bei diesem System die Ausführung mit 0° und 10° Neigung (vgl. Abb. 32 und Abb. 33 auf der Seite 54). Die

Neigung hat aufgrund der leicht veränderten Windbelastung einen minimalen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Beide Varianten können jedoch mit denselben Querschnitten und Fundamentgrößen umgesetzt werden. Daher wird nachfolgend beispielhaft nur ein Auszug der Berechnung mit 0° Dachneigung angeführt. Der Ausnutzungsgrad der einzelnen Querschnitte nach dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) ist in der Abb. 34 auf der Seite 56 und die Systemverformung (max. L/200) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GGT) sind in der Abb. 35 auf der Seite 56 dargestellt.

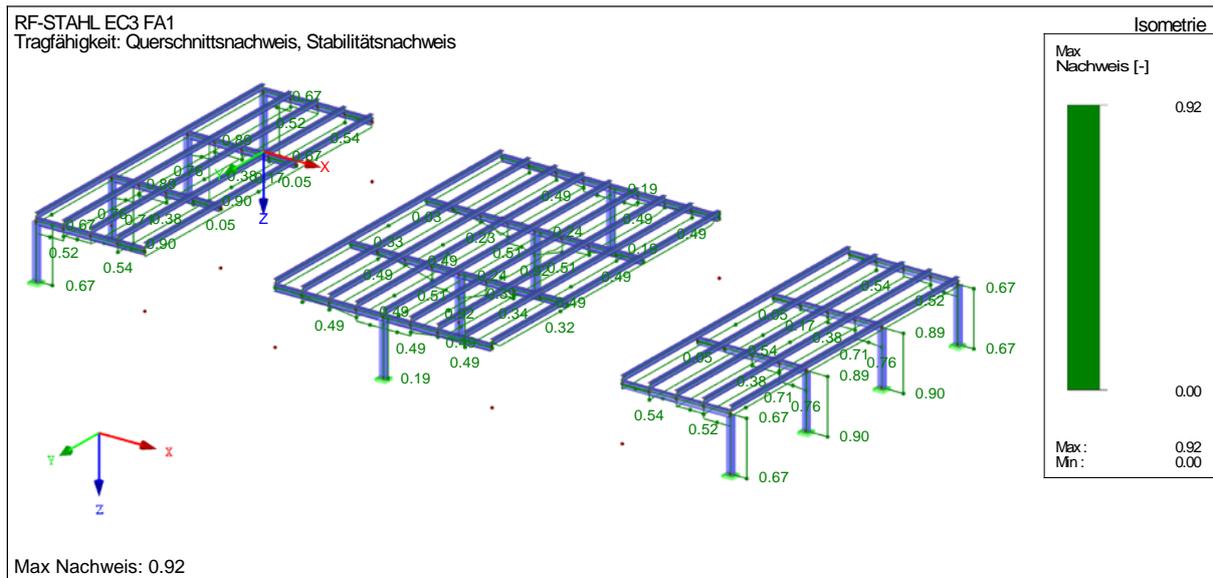


Abb. 34: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – auskragende massive Stahlkonstruktion

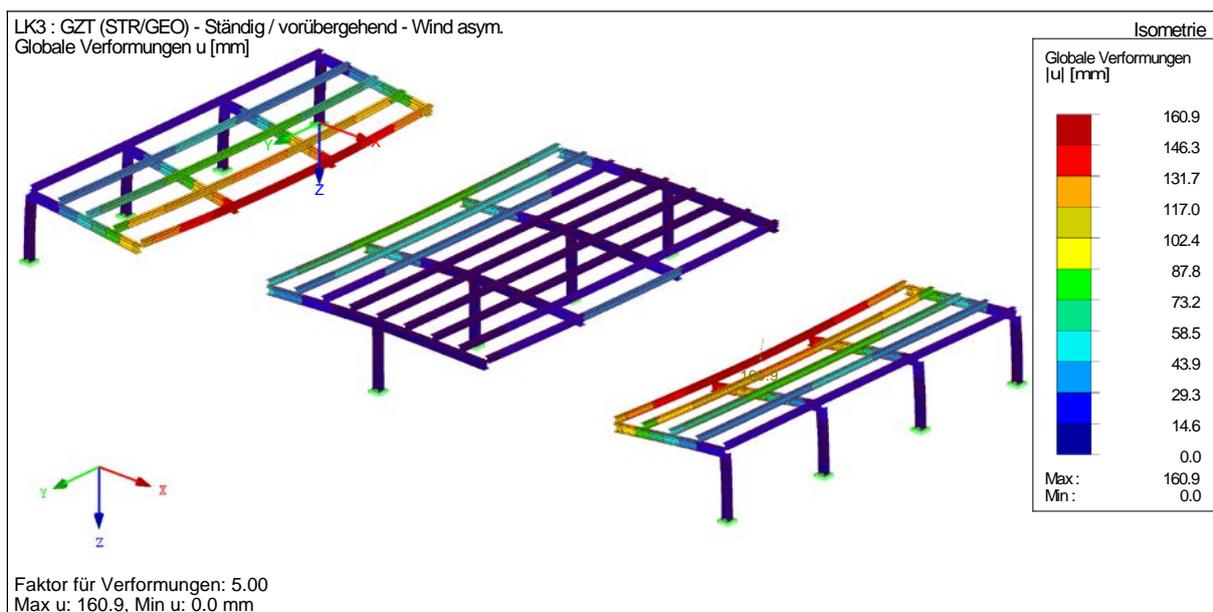


Abb. 35: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. L/200) – auskragende massive Stahlkonstruktion

3.2.3.2 AUSKRAGENDE MASSIVE HOLZKONSTRUKTION

Das Tragkonzept basiert baustatisch auf dem zuvor beschriebenen auskragenden massiven Stahltragwerk, wie in Abschnitt 3.2.3.1 auf der Seite 54. Die Systembeschreibung einschließlich der Ausrichtungen, Montage sowie der Vor- und Nachteile bei der Parkplatzbenutzung und der Trägerquerschnitte kann diesem Abschnitt entnommen werden. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass das Material der Tragstruktur hier aus Holz besteht. Die Fundamentierung unterscheidet sich nur im Volumen und in der Masse. Sie kann ebenso wie das Stahlsystem vorproduziert und mit Schraubverbindungen auf der Baustelle montiert werden. Die Systemdarstellungen mit 0° Neigung und 10° Ost-West-Ausrichtung sind in den Abb. 36 auf der Seite 57 und Abb. 37 auf der Seite 58 visualisiert. Eine vollständige Stückliste ist in der Tabelle 5 auf der Seite 58 zu finden.

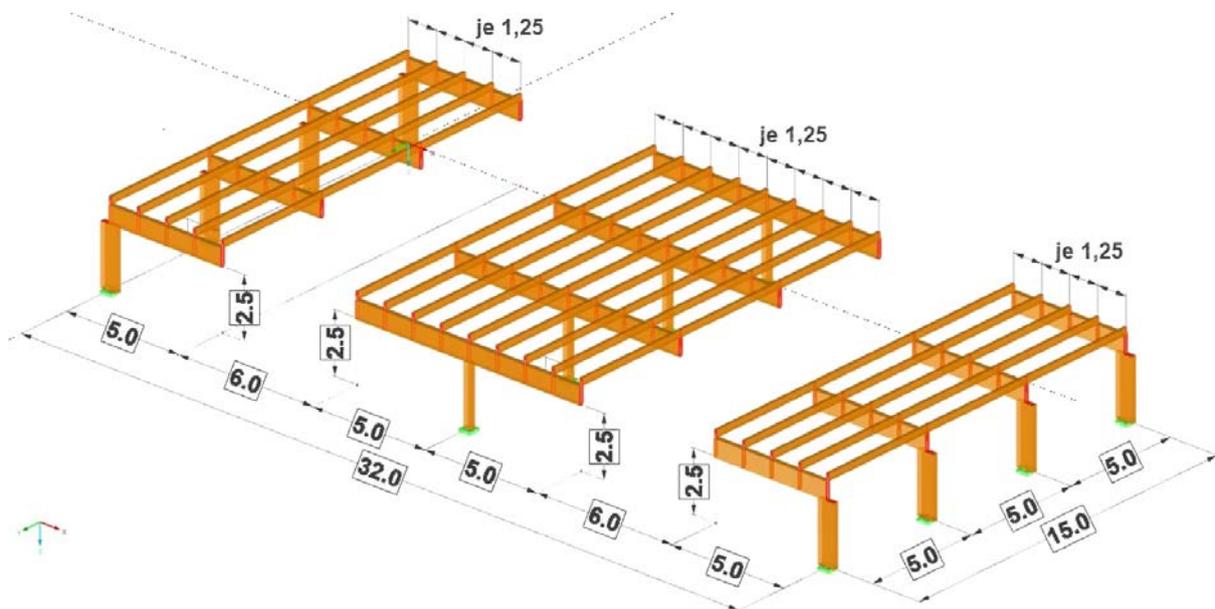


Abb. 36: Konzeptdarstellung - auskragende massive Holzkonstruktion - Maße in [m] – 0° Dachneigung

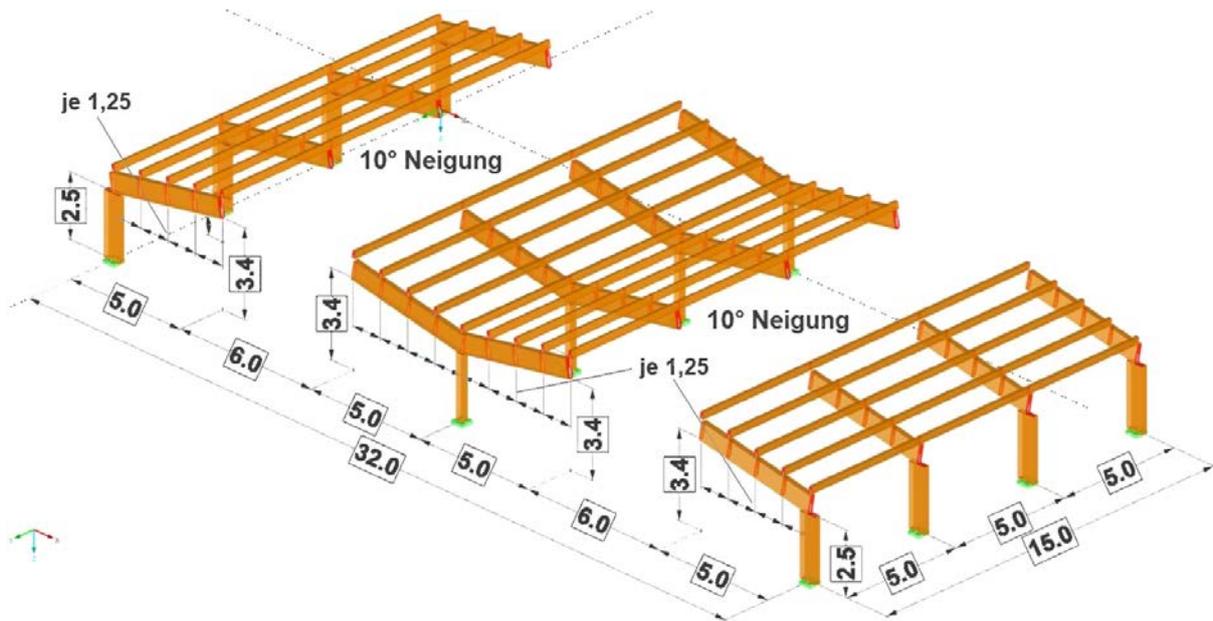


Abb. 37: Konzeptdarstellung - auskragende massive Holzkonstruktion - Maße in [m] – 10° Dachneigung mit Ost-West-Ausrichtung

Tabelle 5: Stückliste Tragwerk und Fundament – auskragende massive Holzkonstruktion

Pos. Nr.	Querschnittsbezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Länge [m]	Gesamtl. [m]	Spez. Gewicht [kg/m]	Masse [kg]	Gesamtm. [t]
1	H-Rechteck 220/720	Holz GL24h	Stützen 1-R.	8	2,50	20,00	87,12	217,80	1,742
2	H-Rechteck 220/720	Holz GL24h	Stützen 2-R.	4	2,50	10,00	87,12	217,80	0,871
3	H-Rechteck 220/720	Holz GL24h	Kragträger 1-R.	8	5,00	40,00	87,12	435,60	3,485
4	H-Rechteck 220/720	Holz GL24h	Kragträger 2-R.	4	10,00	40,00	87,12	871,20	3,485
5	H-Rechteck 140/300	Holz GL24h	Dachpfetten	57	5,00	285,00	29,39	146,95	8,376
Summe:				81		395,00			17,959
Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Vol. [m³]	Gesamtv. [m³]	Quers.-Masse [t/m³]	Masse [t]	Gesamtm. [t]
1	Fundament 1 - Beton	Beton C25/30	Fundierung 1-R.	4	3,11	12,44	2,50	7,78	31,100
2	Fundament 2 - Beton	Beton C25/30	Fundierung 1-R.	4	4,30	17,20	2,50	10,75	43,000
3	Fundament 3 - Beton	Beton C25/30	Fundierung 2-R.	2	1,33	2,66	2,50	3,33	6,650
4	Fundament 4 - Beton	Beton C25/30	Fundierung 2-R.	2	1,95	3,90	2,50	4,88	9,750
Summe:				12		36,20			90,500
Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Vol. [m³]	Gesamtv. [m³]	Quers.-Masse [t/m³]	Masse [t]	Gesamtm. [t]
1	Fundament 1 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung 1-R.	4	-	-	-	-	0,578
2	Fundament 2 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung 1-R.	4	-	-	-	-	0,636
3	Fundament 3 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung 2-R.	2	-	-	-	-	0,099
4	Fundament 4 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung 2-R.	2	-	-	-	-	0,137
Summe:				12					1,450

Die Querschnitte und Fundamente wurden mit dem Statik-Programm Statiksoftware RFEM 5, Version 5.35.01, der Dlubal Software GmbH nachgewiesen. Die gesamte Berechnung befindet sich im Abschnitt 11.2 Anhang B – Vollständige Nachweisführung und Berechnungen der Tragstrukturen ab der Seite 118. Berechnet wurde bei diesem System die

Ausführung mit 0° und 10° Neigung (vgl. Abb. 36 und Abb. 37 auf der Seite 57). Die Neigung hat durch die leicht veränderte Windbelastung einen minimalen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Jedoch können beide Varianten mit denselben Querschnitten und Fundamentgrößen umgesetzt werden. Daher wird nachfolgend beispielhaft nur ein Auszug der Berechnung mit 0° Dachneigung angeführt. Der Ausnutzungsgrad der einzelnen Querschnitte nach dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) sind in der Abb. 38 auf der Seite 59 und die Systemverformung (max. L/200) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GGT) sind in der Abb. 39 auf der Seite 60 dargestellt.

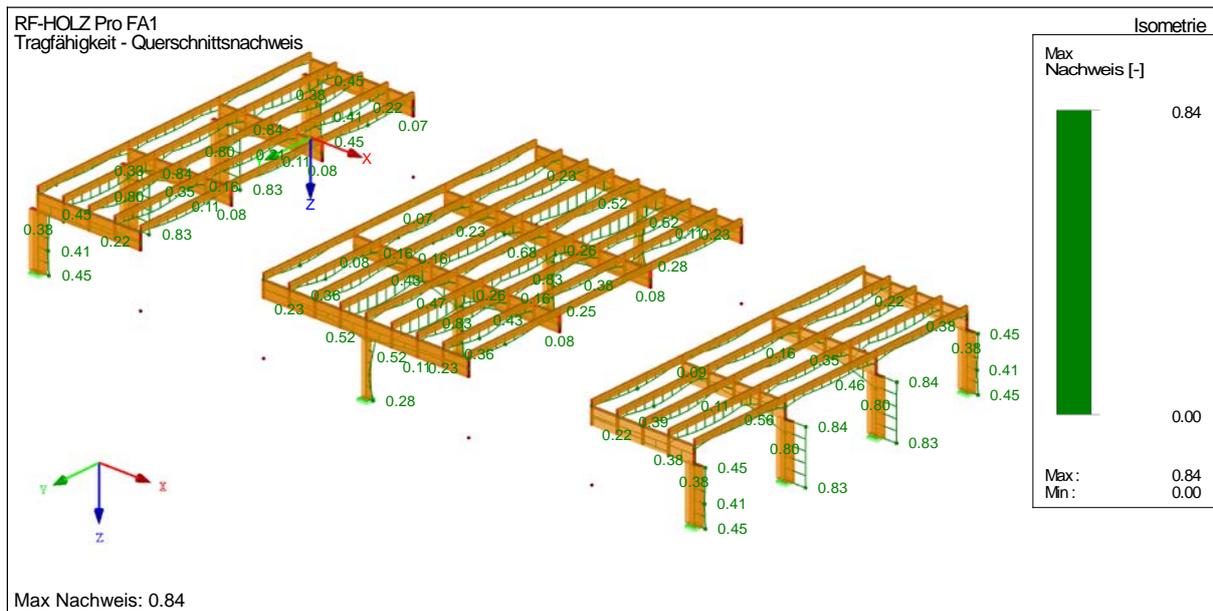


Abb. 38: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – auskragende massive Holzkonstruktion

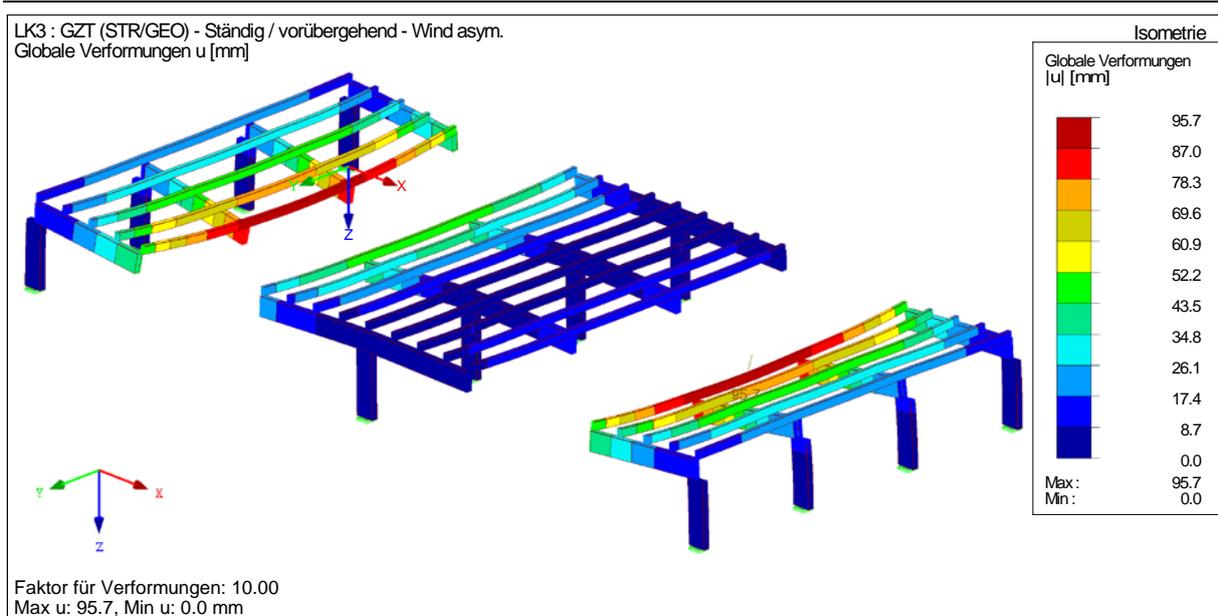


Abb. 39: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. $L/200$) – auskragende massive Holzkonstruktion

3.2.3.3 STAHLRAHMEN MIT AUSSTEIFUNGSVERBAND

Bei diesem Tragsystem werden zusätzliche Stützen in der Parkfläche angeordnet. Zwei Parkplätze mit einer Breite von jeweils 2,5 m werden zusammengefasst, und dazwischen werden Stützen platziert. Durch die zusätzliche Abstützung in der Parkfläche entsteht eine Einschränkung beim Rangieren. In Richtung der Parkfläche wirkt das System als Rahmen. In der Dachebene und quer zu den Parkflächen wurden zur Abtragung von vertikalen Lasten kreuzweise wirkende Zugverbände angeordnet. Das Tragsystem wird gelenkig an die darunterliegenden Köcherfundamente angeschlossen. Für das Tragsystem werden HE-B-Träger aus Baustahl S 235 verwendet. Die vollständige Stückliste des Tragsystems einschließlich der Verbände und der Fundamentierung ist in der Tabelle 6 auf der Seite 61 angeführt. Beim Vergleich dieses Systems mit der auskragenden Version (vgl. Tabelle 4: Stückliste Tragwerk und Fundament – auskragende massive Stahlkonstruktion auf der Seite 55) fallen die geringeren Trägerquerschnitte und kleineren Fundamente auf. Dies ist auf die geringeren Momente zurückzuführen. Das System kann durch Verlängerung der Stützen auf einer Seite mit 0° und 10° Neigung ausgeführt werden. Dadurch ist auch eine Ost-West- und Südausrichtung möglich. Die horizontale Ausführung ist in der Abb. 40 auf der Seite 61 dargestellt. Die Einzelteile werden vorgefertigt und anschließend mit Schraubverbindungen am Parkplatz montiert.

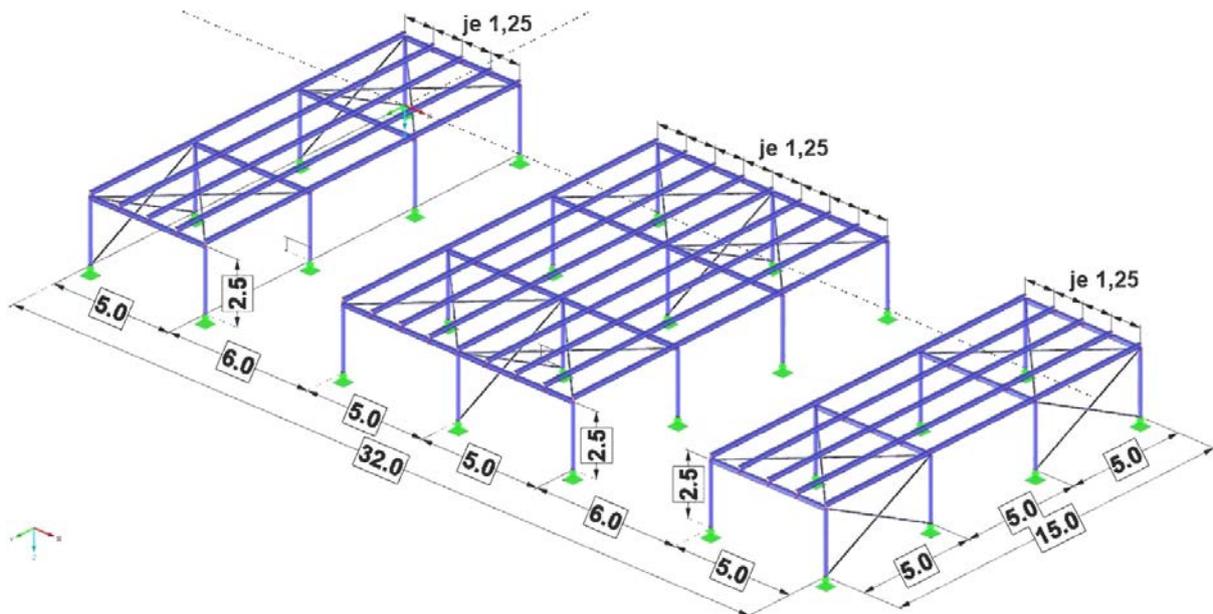


Abb. 40: Konzeptdarstellung – Stahlrahmen mit Aussteifungsverband - Maße in [m] – 0° Dachneigung

Tabelle 6: Stückliste Tragwerk und Fundament – Stahlrahmen mit Aussteifungsverband

Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Länge [m]	Gesamtl. [m]	Quers.-Masse [kg/m]	Masse [kg]	Gesamtm. [t]
1	HE B 100 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Stützen 1-R.	16	2,50	40,00	20,41	51,03	0,816
2	HE B 100 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Stützen 2-R.	12	2,50	30,00	20,41	51,03	0,612
3	HE B 140 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Träger 1-R.	8	5,00	40,00	33,76	168,80	1,350
4	HE B 140 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Träger 2-R.	4	10,00	40,00	33,76	337,60	1,350
5	HE B 140 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Dachpfetten	57	5,00	285,00	33,76	168,80	9,622
10	Rundstahl 9	Baustahl S235	Windverband	12	5,59	67,08	0,50	2,80	0,034
11	Rundstahl 9	Baustahl S235	Dachverband	16	7,07	113,12	0,50	3,54	0,057
Summe:				125		615,20			13,841
Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Vol. [m³]	Gesamtv. [m³]	Quers.-Masse [t/m³]	Masse [t]	Gesamtm. [t]
1	Fundament 1 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	12	0,53	6,36	2,50	1,33	15,900
2	Fundament 2 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	14	1,73	24,22	2,50	4,33	60,550
3	Fundament 3 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	2	1,37	2,74	2,50	3,43	6,850
Summe:				28		33,32			83,300
Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Vol. [m³]	Gesamtv. [m³]	Quers.-Masse [t/m³]	Masse [t]	Gesamtm. [t]
1	Fundament 1 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	12	-	-	-	-	0,322
2	Fundament 2 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	14	-	-	-	-	0,664
3	Fundament 3 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	2	-	-	-	-	0,091
Summe:				28					1,076

Die Querschnitte und Fundamente wurden mit der Statiksoftware RFEM 5, Version 5.35.01, der Dlubal Software GmbH nachgewiesen. Die gesamte Berechnung befindet sich im Abschnitt 11.2 Anhang B – Vollständige Nachweisführung und Berechnungen der Tragstrukturen ab der Seite 118. Bei diesem System wurde nur die Ausführung mit 0°

Neigung berechnet. Aus der Berechnung der beiden Tragsysteme mit auskragenden Trägern in Stahl (vgl. Abschnitt 3.2.3.1 auf der Seite 54) und Holz (vgl. Abschnitt 3.2.3.2 auf der Seite 57) geht hervor, dass die Dachneigung zwischen 0° und 10° nur geringe Unterschiede auf die Belastung hervorruft und die Trägerquerschnitte und Fundamente gleich ausgeführt werden können. Der Ausnutzungsgrad der einzelnen Querschnitte nach dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) ist in der Abb. 41 auf der Seite 62 und die Systemverformung (max. $L/200$) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GGT) sind in der Abb. 42 auf der Seite 63 dargestellt.

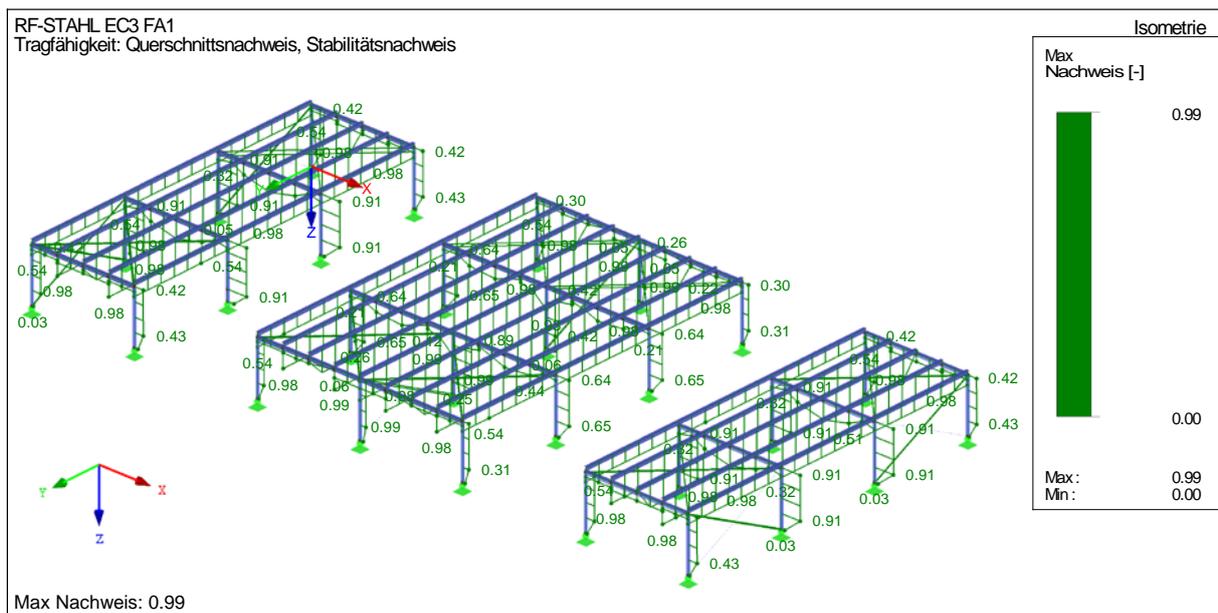


Abb. 41: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – Stahlrahmen mit Aussteifungsverband

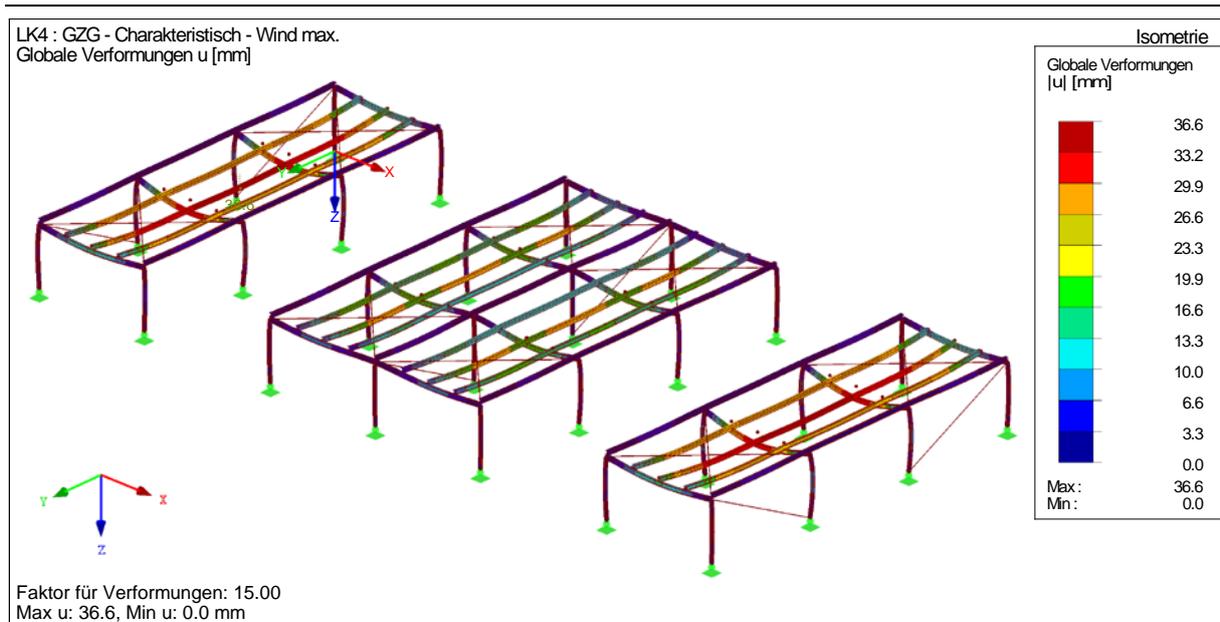


Abb. 42: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. $L/200$) – Stahlrahmen mit Aussteifungsverband

3.2.3.4 HOLZRAHMEN MIT AUSSTEIFUNGSVERBAND

Dieses Tragsystem beruht baustatisch auf dem in Abschnitt 2.6.1.1 auf der Seite 36 angeführten Rahmensystem. Die Systembeschreibung kann diesem Abschnitt entnommen werden. Die Ausrichtungsmöglichkeiten, der Montagevorgang sowie die Vor- und Nachteile sind identisch. Bei diesem System wird nur die Tragkonstruktion aus Holz gefertigt. Die Systemdarstellung ist in der Abb. 43 auf der Seite 64 und die Stückliste in der Tabelle 7 auf der Seite 64 angegeben.

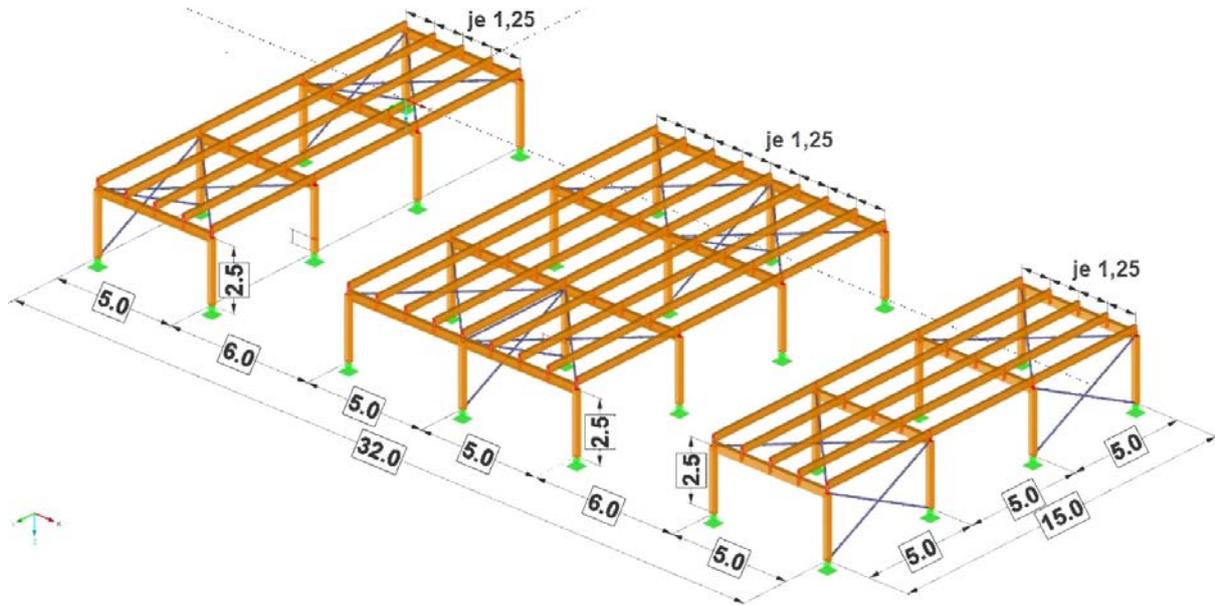


Abb. 43: Konzeptdarstellung – Holzrahmen mit Aussteifungsverband - Maße in [m] – 0° Dachneigung

Tabelle 7: Stückliste Tragwerk und Fundament – Holzrahmen mit Aussteifungsverband

Pos. Nr.	Querschnittsbezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Länge [m]	Gesamtl. [m]	Spez. Gewicht [kg/m]	Masse [kg]	Gesamtm. [t]
1	H-Rechteck 180/240	Holz GL24h	Stützen 1-R.	16	2,50	40,00	23,76	59,40	0,950
2	H-Rechteck 180/240	Holz GL24h	Stützen 2-R.	4	2,50	10,00	23,76	59,40	0,238
3	H-Rechteck 200/320	Holz GL24h	Träger 1-R.	8	5,00	40,00	35,20	176,00	1,408
4	H-Rechteck 200/320	Holz GL24h	Träger 2-R.	4	10,00	40,00	35,20	352,00	1,408
5	H-Rechteck 140/280	Holz GL24h	Dachpfetten	57	5,00	285,00	21,56	107,80	6,145
Summe:						89			10,149
1	Rundstahl 9	Baustahl S235	Windverband	12	5,59	67,08	0,50	2,80	0,034
2	Rundstahl 9	Baustahl S235	Dachverband	16	7,07	113,12	0,50	3,54	0,057
Summe:						28			0,090
1	Fundament 1 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	12	0,68	8,16	2,50	1,70	20,400
2	Fundament 2 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	14	1,89	26,46	2,50	4,73	66,150
3	Fundament 3 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	2	1,63	3,26	2,50	4,08	8,150
Summe:						28			94,700
1	Fundament 1 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	12	-	-	-	-	0,486
2	Fundament 2 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	14	-	-	-	-	0,835
3	Fundament 3 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	2	-	-	-	-	0,116
Summe:						28			1,437

Die Querschnitte und Fundamente wurden mit der Statiksoftware RFEM 5, Version 5.35.01, der Dlubal Software GmbH nachgewiesen. Die gesamte Berechnung befindet sich im Abschnitt 11.2 Anhang B – Vollständige Nachweisführung und Berechnungen der Tragstrukturen ab der Seite 118. Berechnet wurde bei diesem System nur die Ausführung mit

0° Neigung. Aus der Berechnung der beiden Tragsysteme mit auskragenden Trägern in Stahl (vgl. Abschnitt 3.2.3.1 auf der Seite 54) und Holz (vgl. Abschnitt 3.2.3.2 auf der Seite 57) geht hervor, dass die Dachneigung zwischen 0° und 10° nur geringe Unterschiede auf die Belastung hervorruft und die Trägerquerschnitte und Fundamente gleich ausgeführt werden können. Der Ausnutzungsgrad der einzelnen Querschnitte nach dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) ist in der Abb. 44 auf der Seite 65 und die Systemverformung (max. L/200) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GGT) sind in der Abb. 45 auf der Seite 66 dargestellt.

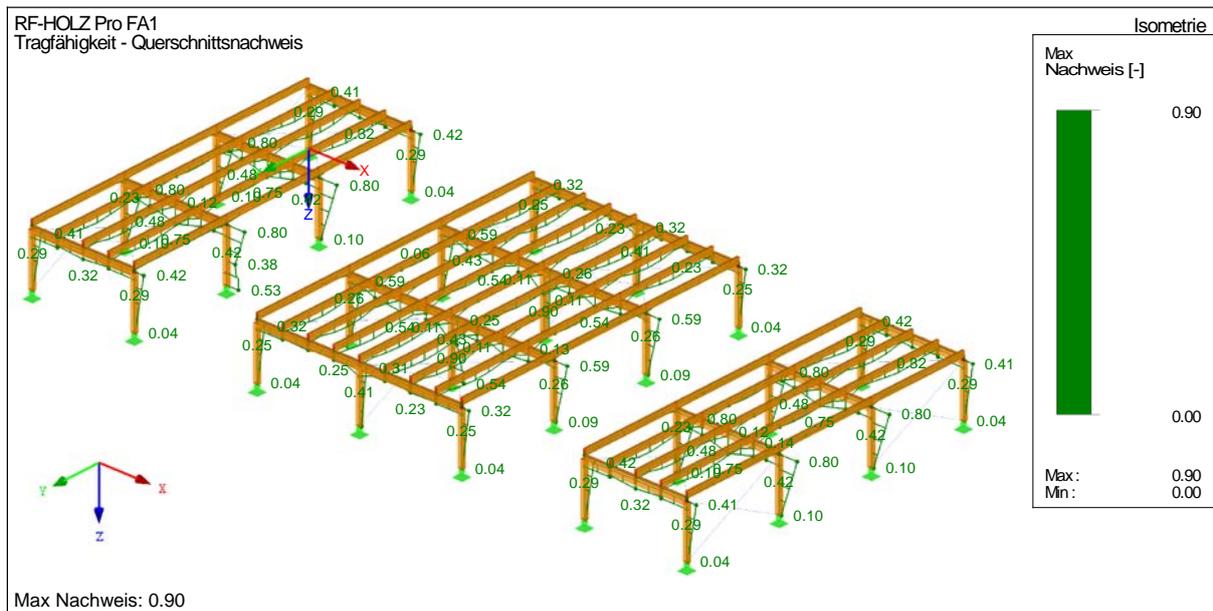


Abb. 44: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – Holzrahmen mit Aussteifungsverband

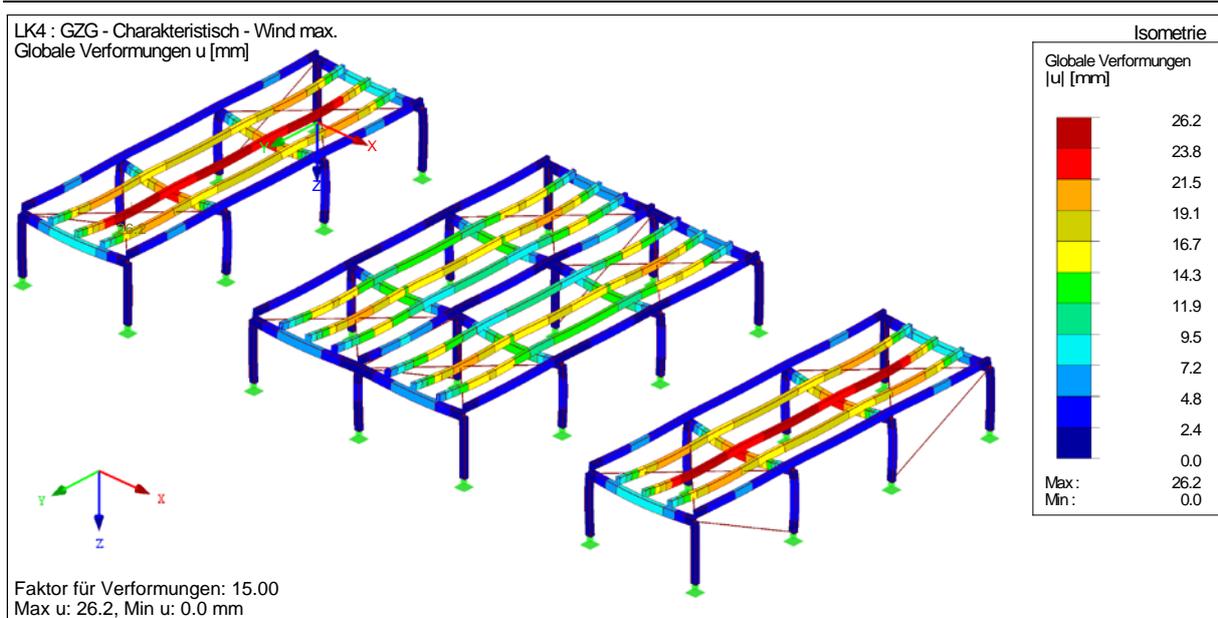


Abb. 45: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. $L/200$) – Holzrahmen mit Aussteifungsverband

3.2.3.5 UNTERSPIANTER STAHLRAHMEN MIT AUSSTEIFUNGSVERBAND

Dieses System basiert direkt auf dem Rahmensystem mit Aussteifung in Stahl, wie in Abschnitt 3.2.3.3 auf der Seite 60. Die Hauptträger wurden zusätzlich unterspannt. Bei der Unterspannung wird in der Mitte ein zusätzlicher Stahldruckstab aus einem Hohlprofil angeordnet. Dieser Druckpunkt wird mit einem Zugstab zu den beiden Auflagerpunkten abgespannt. Diese Verstärkung verringert die Biegemomente und die Durchbiegung im Biegeträger, wodurch ein geringerer Stabquerschnitt verwendet werden kann. Dieses System ist in der Abb. 46 auf der Seite 67 abgebildet. Die Stückliste ist in der Tabelle 8 auf der Seite 67 angeführt. Aus der Berechnung geht hervor, dass durch die zusätzliche Unterspannung der Hauptträger von einem HE-B 140 auf einen HE-B 100 Profilquerschnitt reduziert werden kann (vgl. hierzu Position 3. in der Tabelle 6 auf der Seite 61).

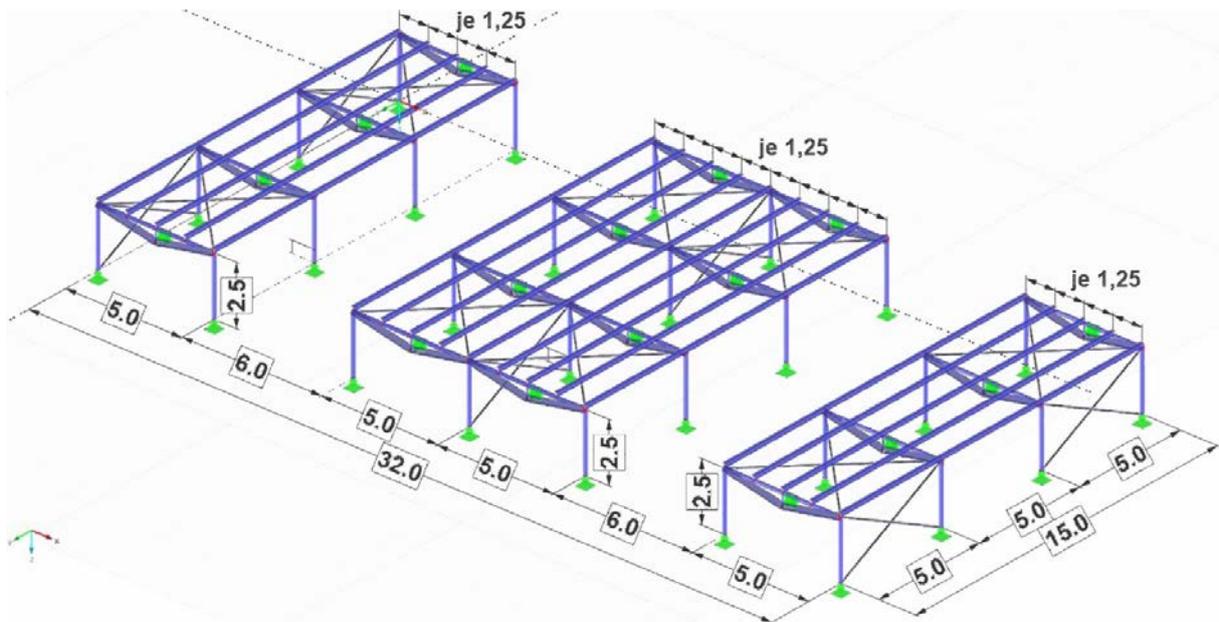


Abb. 46: Konzeptdarstellung – unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband - Maße in [m] – 0° Dachneigung

Tabelle 8: Stückliste Tragwerk und Fundament – unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband

Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Länge [m]	Gesamtl. [m]	Quers.-Masse [kg/m]	Masse [kg]	Gesamtm. [t]
1	HE B 100 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Stützen 1-R.	16	2,50	40,00	20,41	51,03	0,816
2	HE B 100 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Stützen 2-R.	12	2,50	30,00	20,41	51,03	0,612
3	HE B 100 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Träger 1-R.	8	5,00	40,00	20,41	102,05	0,816
4	HE B 100 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Träger 2-R.	4	10,00	40,00	20,41	204,10	0,816
5	HE B 140 Euronorm 53-62	Baustahl S235	Dachpfetten	57	5,00	285,00	33,76	168,80	9,622
6	Rundstahl 9	Baustahl S235	Windverband	12	5,59	67,08	0,50	2,80	0,034
7	Rundstahl 9	Baustahl S235	Dachverband	16	7,07	113,12	0,50	3,54	0,057
8	QRO 40x2.6 EN 10210-2:2006	Baustahl S235	Druckstab	16	0,50	8,00	3,00	1,50	0,024
9	Rundstahl 30	Baustahl S235	Abspannung	32	2,55	81,60	5,55	14,15	0,453
Summe:				173		704,80			13,250
Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Vol. [m³]	Gesamtv. [m³]	Quers.-Masse [t/m³]	Masse [t]	Gesamtm. [t]
1	Fundament 1 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	12	0,53	6,36	2,50	1,33	15,900
2	Fundament 2 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	14	1,73	24,22	2,50	4,33	60,550
3	Fundament 3 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	2	1,48	2,96	2,50	3,70	7,400
Summe:				28		33,54			83,850
Pos. Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Material Bezeichnung	Einsatzgebiet Beschreibung	Anz.	Vol. [m³]	Gesamtv. [m³]	Quers.-Masse [t/m³]	Masse [t]	Gesamtm. [t]
1	Fundament 1 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	12	-	-	-	-	0,322
2	Fundament 2 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	14	-	-	-	-	0,664
3	Fundament 3 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	2	-	-	-	-	0,092
Summe:				28					1,078

Die Querschnitte und Fundamente wurden mit dem Statik-Programm Statiksoftware RFEM 5, Version 5.35.01, der Dlubal Software GmbH nachgewiesen. Die gesamte Berechnung

befindet sich im Abschnitt 11.2 Anhang B – Vollständige Nachweisführung und Berechnungen der Tragstrukturen ab der Seite 118. Der Ausnutzungsgrad der einzelnen Querschnitte nach dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) sind in der Abb. 47 auf der Seite 68 und die Systemverformung (max. $L/200$) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GGT) sind in der Abb. 48 auf der Seite 68 dargestellt.

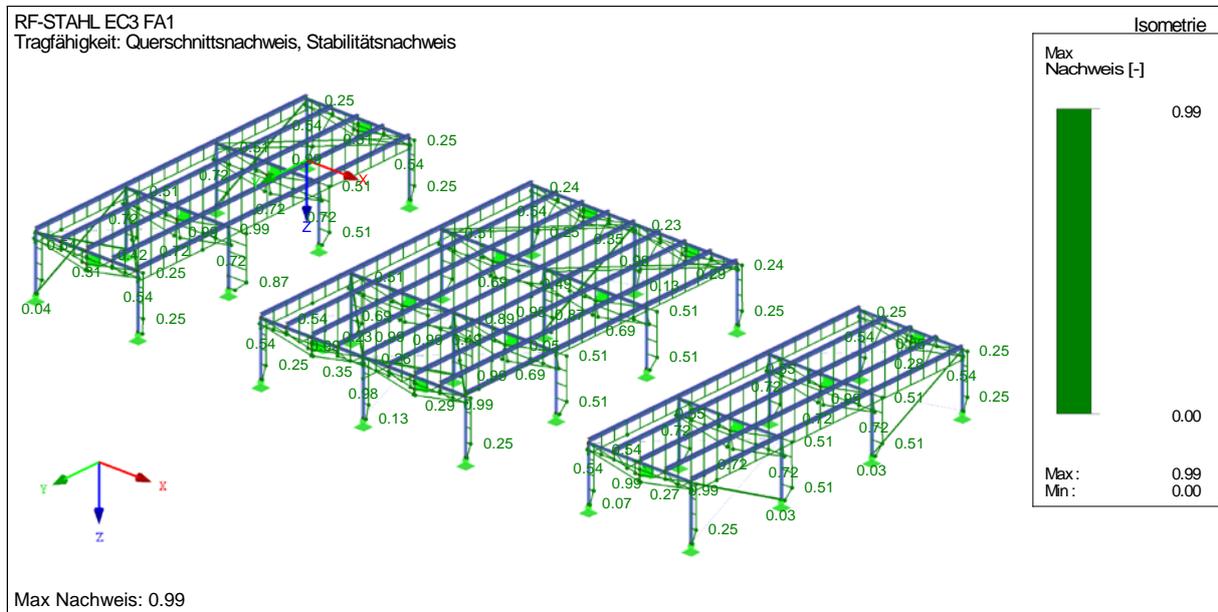


Abb. 47: Ausnutzungsgrad ($1,0 = 100\%$) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband

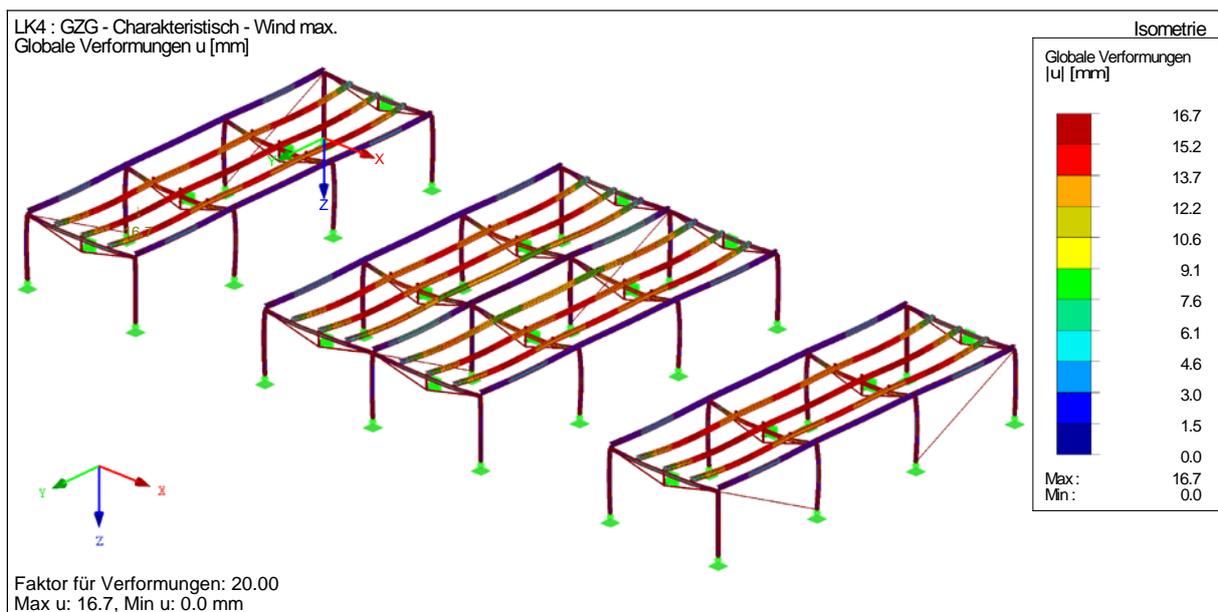


Abb. 48: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. $L/200$) – unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband

3.2.3.6 ABGESPANNTE SEILKONSTRUKTION AUF DRUCKSTÄBEN

Das Tragsystem beruht auf dem Konzept des Seiltragwerkes von Park-SOLAR (PARK-SOLAR GmbH). Das System ist in der Abb. 49 auf der Seite 69 dargestellt. Am Rand der Parkfläche und in der Mitte der Doppelreihen sind Biegeträger auf Druck belastete Stützen angeordnet. Die Photovoltaikmodule sind in einem Abstand von 50 cm auf Flachprofilen befestigt. Die Flachprofile aus Stahl sind auf Biegeträger angebracht und werden ausschließlich auf Zug belastet. Die horizontalen Lasten, die durch das Eigengewicht der Module, Schnee und Wind entstehen, werden durch Zugstäbe am Ende des Systems in einem Winkel in die Fundierung geleitet. In Querrichtung werden Windverbände angebracht. Die Photovoltaikmodule werden nur über den Parkflächen angebracht, während die mittleren Fahrstreifen frei bleiben. Dies hat zwei Gründe: Erstens würden die Belastungen bei einer zusätzlichen Anbringung von Modulen in diesem Bereich stark steigen. Zweitens können dadurch die verschiedenen Tragsysteme besser miteinander verglichen werden, da dieselbe Fläche zur Erzeugung von Energie durch Photovoltaikmodule zur Verfügung steht. Systembedingt kann bei dieser Ausführung nur eine horizontale Ausrichtung umgesetzt werden. Die einzelnen Komponenten werden vorproduziert und die Montage erfolgt über Schraubverbindungen. Die Parkfläche wird bei diesem Konzept nicht zusätzlich eingeschränkt, da keine zusätzlichen Stützen in der Fläche angeordnet werden müssen. In der Tabelle 9 auf der Seite 70 ist die Stückliste des Tragsystems angeführt.

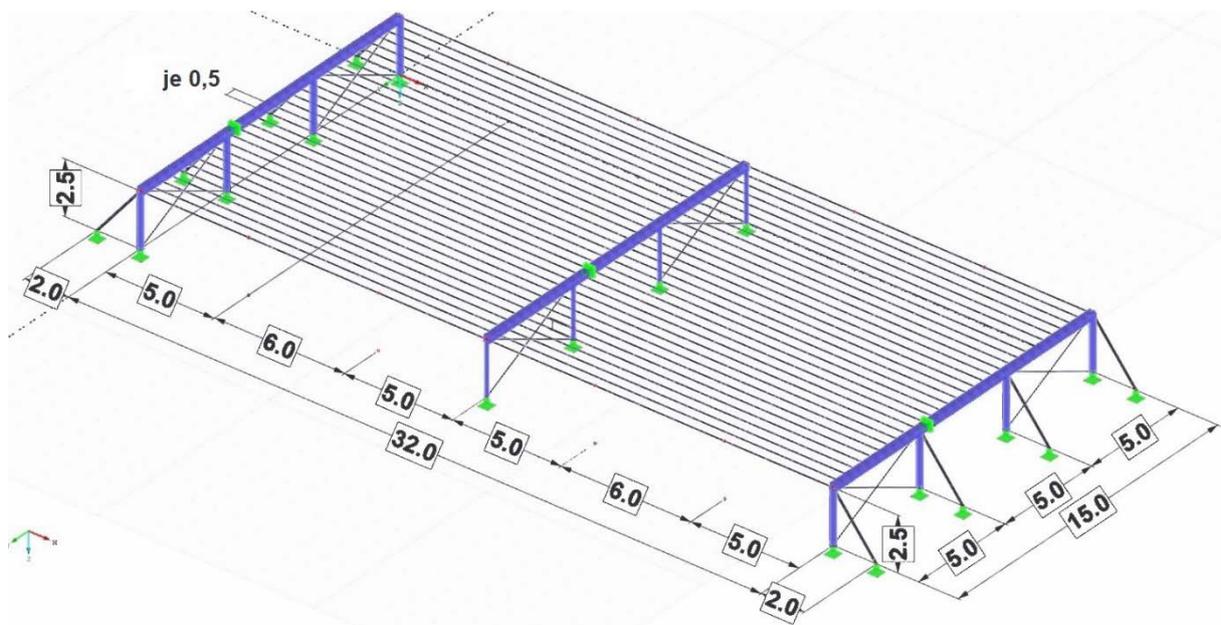


Abb. 49: Konzeptdarstellung – abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben - Maße in [m] – 0° Dachneigung

Tabelle 9: Stückliste Tragwerk und Fundament – abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben

Pos.	Querschnitt	Material	Einsatzgebiet	Anz.	Länge	Gesamtl.	Quers.-Masse	Masse	Gesamt.
Nr.	Bezeichnung	Bezeichnung	Beschreibung		[m]	[m]	[kg/m]	[kg]	[t]
1	RO 273.0x6.3 EN 10210-2:2006	Baustahl S235	Stützen Endr.	8	2,50	20,00	41,45	103,63	0,829
2	RO 168.3x5.0 EN 10210-2:2006	Baustahl S235	Stützen Mittl.	4	2,50	10,00	20,17	50,43	0,202
3	QRO 300x12.5 EN 10210-2:2006	Baustahl S235	Träger	3	15,00	45,00	111,47	1672,05	5,016
4	Flachstahl 8/50	Baustahl S235	Zugbänder	31	32,00	992,00	3,14	100,48	3,115
5	Rundstahl 12	Baustahl S235	Windverband	12	5,59	67,08	0,89	4,98	0,060
6	Rundstahl 50	Edelstahl 1.4301	Abspannung	8	3,20	25,60	15,51	49,63	0,397
				Summe: 66		1159,68			9,618
Pos.	Querschnitt	Material	Einsatzgebiet	Anz.	Vol.	Gesamtv.	Quers.-Masse	Masse	Gesamt.
Nr.	Bezeichnung	Bezeichnung	Beschreibung		[m³]	[m³]	[t/m³]	[t]	[t]
1	Fundament 1 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	4	1,22	4,88	2,50	3,05	12,200
2	Fundament 2 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	4	0,76	3,04	2,50	1,90	7,600
3	Fundament 3 - Beton	Beton C25/30	Fundierung	4	1,76	7,04	2,50	4,40	17,600
				Summe: 12		14,96			37,400
4	Fundament 4 - Beton*	Beton C25/30	Fundierung Zug	4	33,76	135,04	2,50	84,40	337,600
5	Fundament 5 - Beton*	Beton C25/30	Fundierung Zug	4	65,03	260,12	3,50	227,61	910,420
				Summe: 8		395,16			1248,020
Pos.	Querschnitt	Material	Einsatzgebiet	Anz.	Vol.	Gesamtv.	Quers.-Masse	Masse	Gesamt.
Nr.	Bezeichnung	Bezeichnung	Beschreibung		[m³]	[m³]	[t/m³]	[t]	[t]
1	Fundament 1 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	4	-	-	-	-	0,322
2	Fundament 2 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	4	-	-	-	-	0,664
3	Fundament 3 - Bewehrung	Betonstahl B550 S	Fundierung	4					0,380
				Summe: 12					1,366
4	Fundament 4 - Bewehrung*	Betonstahl B550 S	Fundierung Zug	4	-	-	-	-	0,547
5	Fundament 5 - Bewehrung*	Betonstahl B550 S	Fundierung Zug	4	-	-	-	-	0,885
				Summe: 8					1,432

* Zugkraft aus Seilkonstruktion extrem hoch, dies verursacht sehr hohe Fundamentmassen -> Last muss mit einen Anker in den Untergrund abgetragen werden

Durch die Seilabspannung entstehen große Zugkräfte, welche sicher in das Erdreich abgetragen werden müssen. Aus der Berechnung mit dem Zusatzmodul RF-Fund Pro in RFEM 5 müssten für die Ableitung der Zugkräfte Betonfundamente mit einem Volumen von knapp 400 m³ und einem Gesamtgewicht von 1248 t erstellt werden (vgl. Tabelle 9 auf der Seite 70). Diese Massen sind zum einen aufgrund von Platzmangel und zum anderen aus wirtschaftlichen Gründen nicht umsetzbar. Die Fundierung der Zugkräfte muss hier mit Zugankern im Erdreich erfolgen.

Aus der Lastkombination Grenzzustand der Tragfähigkeit (vgl. Berechnung mittels Statiksoftware RFEM 5) ergibt sich eine maximale Kraft $F_{res} = 1073,1$ kN je Anker (siehe Formel 1.1 auf der Seite 71). Die Anker müssen je nach Untergrund und Belastung ausgewählt und berechnet werden. Da die Auslegung stark bodenabhängig und für jeden Standort separat durchgeführt werden muss, wird die genauere Berechnung des Ankers und

des Bodens für diese Analyse nicht durchgeführt. Es wird lediglich als Beispiel ein Anker des Typs DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900 ausgewählt (DSI Underground Austria GmbH).

$$F_{res} = \sqrt{F_H^2 + F_V^2} = \sqrt{674,8kN^2 + 834,4kN^2} = 1073,1 kN \quad (1.1)$$

Die Querschnitte und Fundamente wurden mit dem Statik-Programm Statiksoftware RFEM 5, Version 5.35.01, der Dlubal Software GmbH nachgewiesen. Die gesamte Berechnung befindet sich im Abschnitt 11.2 Anhang B – Vollständige Nachweisführung und Berechnungen der Tragstrukturen ab der Seite 118. Der Ausnutzungsgrad der einzelnen Querschnitte nach dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) sind in der Abb. 50 auf der Seite 71 und die Systemverformung (max. L/200) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GGT) sind in der Abb. 51 auf der Seite 72 dargestellt.

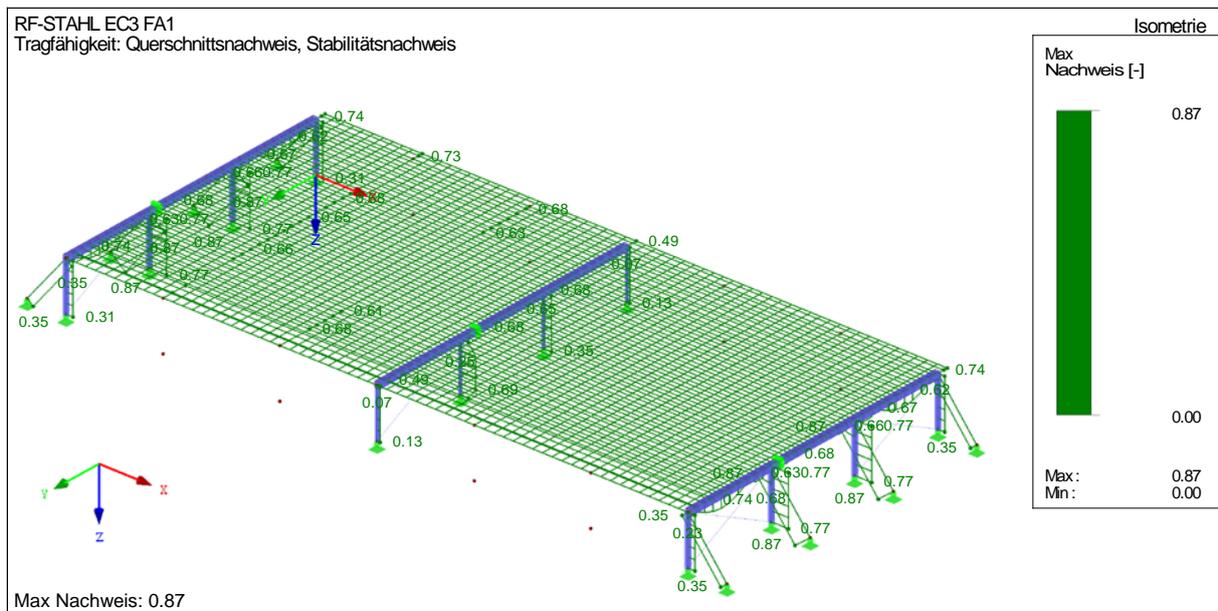


Abb. 50: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben

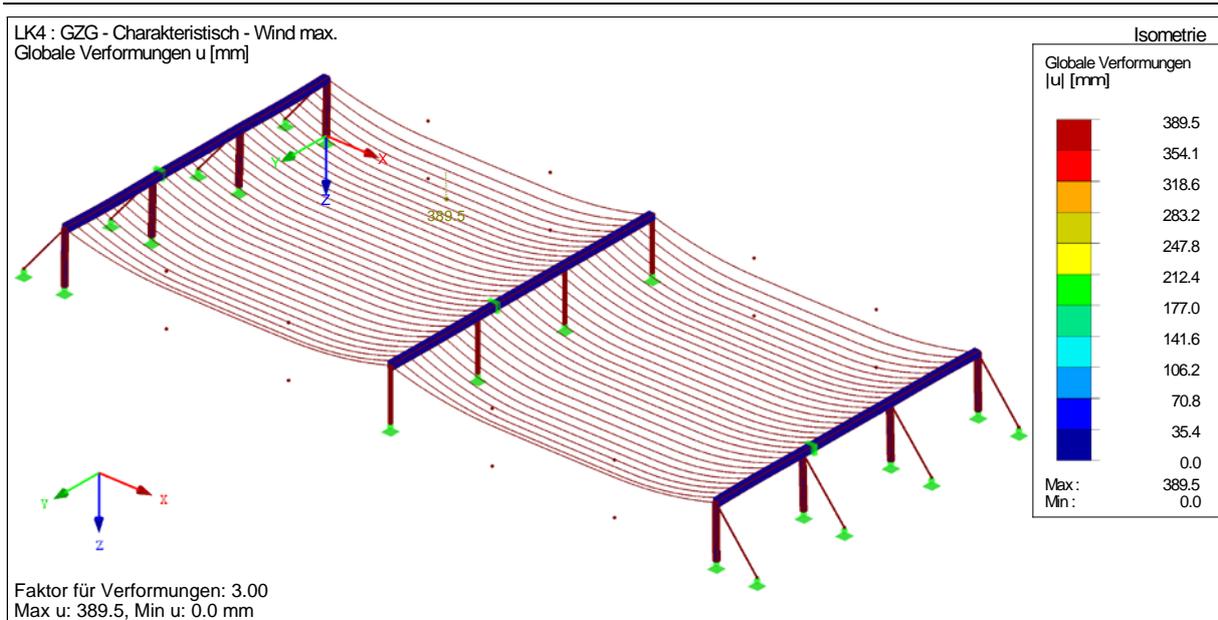


Abb. 51: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. $L/200$) – abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben

3.3 UMWELTBILANZIERUNG DER TRAGKONSTRUKTIONSKONZEPTE

In diesem Abschnitt werden die CO₂-Äquivalent-Emissionen und die Energiebilanzierung der Tragkonzepte für die Photovoltaikanlage über eine beispielhafte Parkfläche durchgeführt. In der Tabelle 10 auf der Seite 72 ist eine Zusammenfassung der jeweiligen Massen der einzelnen Tragelemente der im Abschnitt 3.2.3 ab der Seite 50 beschriebenen Konzepte aufgeführt. Diese Massen werden für die nachfolgenden Bilanzierungen verwendet.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Massen der Tragkonzepte

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Material				Summe Masse [t]
		Baustahl S235 [t]	Holz GL24h [t]	Beton C25/30 [t]	Betonstahl B550 [t]	
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	27,663	0,000	102,650	2,097	132,410
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	0,000	17,959	90,500	1,450	109,909
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	13,841	0,000	83,300	1,076	98,217
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	0,090	10,149	94,700	1,437	106,376
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	13,250	0,000	83,850	1,078	98,178
Konzept 6*	abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben	9,618	0,000	37,400	1,366	48,384

* Zusätzliche Anker (8x) mit DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900

Treibhausgase und Energieaufwände können für alle Komponenten einer Photovoltaikanlage, einschließlich der Tragkonstruktionen, anfallen. Bei der Bilanzierung des CO₂-Äquivalents sowie des Energieaufwands werden speziell die Tragstrukturelemente einer definierten Vergleichsfläche untersucht. Die Komponenten der Photovoltaikanlage, wie Module, Wechselrichter, Unterkonstruktion und Systeminfrastruktur, die im Abschnitt 2.4 ab der

Seite 31 erläutert sind, werden nicht betrachtet. Bei der Gegenüberstellung der verschiedenen Tragstrukturkonzepte sind diese Anlagekomponenten identisch und werden nur durch zusätzliche Auflasten aus den Massen im System dargestellt. Emissionen und Energieaufwände können in mehreren Lebensabschnitten einer Tragstruktur auftreten, wie bei der Herstellung des Ausgangsmaterials, der Weiterverarbeitung und Produktion, dem Transport und der Montage sowie dem Rückbau und Recycling der Elemente einer Tragstruktur.

Ein Hauptfaktor beim Energieaufwand und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen ist die Herstellung der Tragkonstruktionen. Die verwendeten Materialien, wie Stahl, Beton und Holz, spielen hierbei eine wesentliche Rolle. Beim Konstruktionsmaterial Holz wird nur bei den Verarbeitungsschritten Energie benötigt und damit verbunden CO₂ ausgestoßen.

Beim Transport und der Montage wird Energie benötigt und es entstehen Treibhausgasemissionen. Diese sind stark von den Transportstrecken sowie dem Gewicht und Volumen der Tragelemente abhängig. Transport- und Montagemittel werden nach den zu verladenden Gewichten und Volumen sowie Verfügbarkeiten ausgewählt. Aufgrund dieser starken Variablen und der daraus folgenden notwendigen Beispieldefinitionen, die einen großen Einfluss auf die Emissionen haben, wird diese Thematik in der Analyse nicht betrachtet.

Materialien und Prozessziele sind entscheidende Faktoren für die Emissionen und den Energieaufwand beim Rückbau und Recycling einer Tragstruktur. Je nach Zustand der Struktur können die Elemente direkt für andere Einsatzgebiete wiederverwertet werden. Holz- oder Stahlträger können bei gutem Zustand direkt oder nach Bearbeitungsschritten an anderer Stelle eingesetzt werden. Werden diese jedoch nicht direkt wiederverwertet, können Holzprodukte in Form von Energieträgern in Wärmeenergie umgewandelt oder Stahlschrott durch Einschmelzen recycelt werden. Da die Wiederverwertungsformen stark von den Nutzer:innen abhängig sind und keine definierten Regeln unterliegen, werden diese bei der Bilanzierung nachfolgend nicht betrachtet.

3.3.1 ENERGIEBILANZIERUNG DER TRAGKONSTRUKTIONSKONZEPTE

Die Energiebilanzierung von Photovoltaikanlagen einschließlich deren Tragstruktur spielt eine entscheidende Rolle bei der Umstellung der Energieproduktion auf erneuerbare Quellen. Wie im Abschnitt 2.2.7.1 Ökologische Nachhaltigkeit der Photovoltaik auf der Seite 21

beschrieben, ist die notwendige Energie bei der Erzeugung, Installation und Wiederaufbereitung einer Photovoltaikanlage von großer Bedeutung. In der Regel wird diese Energie in maximal zwei Jahren durch den Betrieb der Anlage kompensiert (Umweltbundesamt Deutschland 2024, online). Werden für die Installation einer PV-Anlage jedoch spezielle Tragkonstruktionen benötigt, wie in diesem Fall zur Überdachung einer Parkfläche, muss diese gesondert bilanziert werden. Der notwendige Energiebedarf ist stark von der Tragstruktur abhängig. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden zunächst der Energieaufwand bei der Tragstrukturherstellung und der Energiegewinn durch die Photovoltaikanlage betrachtet, sowie anschließend eine Bilanzierung des Lebenszyklus aufgestellt. Die Werte beziehen sich auf die aktuellen Energiekennwerte (Stand 2024). Durch Verbesserung der Herstellungsverfahren hinsichtlich des nicht-erneuerbaren Energiebedarfs wirkt sich dies auf die gesamte Bilanzierung aus.

3.3.1.1 ENERGIEAUFWAND BEI DER HERSTELLUNG DER TRAGKONSTRUKTION

Bei der Herstellung der Tragkonstruktion wird Energie benötigt. Die Ausgangsmaterialien haben einen wesentlichen Einfluss auf den Energieaufwand einer Tragkonstruktion. Die Energiedaten für die Baumaterialien werden von der Baubook GmbH bereitgestellt. Diese Plattform wird im Bauwesen zur ökologischen und nachhaltigen Planung von Gebäuden herangezogen. Die Umweltdaten sind verifiziert und werden in regelmäßigen Abständen aktualisiert. Für die Berechnung der Energieaufwände werden die PENRT-Werte im Herstellungsprozess A1-A3 genutzt. PENRT steht für die energetisch und stofflich bezogenen totalen Primärenergieeinheiten, die nicht erneuerbar sind und zur Herstellung der Baumaterialien erforderlich sind (baubook GmbH, online). Die für die nachfolgende Analyse definierten PENRT-Werte sind aus der baubook Datenbank übernommen (vgl. IBO-Datenblätter für die jeweiligen Baumaterialien im Anhang C ab der Seite 119). Die PENRT-Werte sind in MJ/kg Material angegeben. Dadurch werden die angegebenen Werte für die nachfolgende Analyse mit dem Umrechnungsfaktor in der Formel 2.1 auf der Seite 74 angepasst. Alle PENRT-Werte sind in der Tabelle 11 auf der Seite 75 angeführt.

$$1kWh = 3.6MJ \tag{2.1}$$

Für Stahl werden zwei unterschiedliche Werte verwendet: einer für den unbehandelten Bewehrungsstahl in den Fundamenten und ein anderer für die Tragelemente, die zusätzlich zum Korrosionsschutz verzinkt werden. Dieser Behandlungsschritt ist zusätzlich energieintensiv. Für den Bewehrungsstahl ergeben sich $20,4 \text{ MJ} = 6557 \text{ kWh}$ und für den

verzinkten Stahl der Tragstruktur 34,5 MJ = 9584 kWh pro Tonne Material (baubook GmbH 2020b, 2022).

Der PENRT-Wert für Normalbeton, unbewehrt 2400 kg/m³, der Fundamente der Tragkonstruktionen, wird mit 0,74 MJ = 207 kWh pro Tonne Material angegeben (baubook GmbH 2019).

Bei der Produktion von Bauholz fallen zwei Faktoren für den Energieaufwand an: der Zuschnitt der Holzprodukte vom Ausgangsprodukt zum fertigen Baumaterial und die energieintensive technische Holz Trocknung (Ökologischer Betriebsberatung et al. 1997, S. 14–16). Als Bauholz wird aufgrund der großen Querschnitte (vgl. Tabelle 5 auf der Seite 58) Brettschichtholz definiert. Die zusätzlichen Arbeitsschritte und Zusatzstoffe wie Leim im Vergleich zu Konstruktionsvollholz verursachen einen zusätzlichen Energieaufwand in der Herstellung. Der PENRT-Wert für Brettschichtholz, verleimt 475 kg/m³, wird mit 8,07 MJ = 2242 kWh pro Tonne Material angegeben (baubook GmbH 2020a).

Tabelle 11: PENRT - Nicht erneuerbare Primärenergie - der verwendeten Baumaterialien

Pos. Nr.	Material [-]	Energieaufwand [kWh/t]
1	Baustahl S235 - verzinkt	9 584
2	Holz GL24h	2 242
3	Beton C25/30	207
4	Betonstahl B550	5 667

Diese Faktoren wurden mit den in der Tabelle 10 auf der Seite 72 angeführten Massen der jeweiligen Materialien der Tragkonzepte multipliziert (vgl. Formel 3.1 auf der Seite 75).

$$\sum \text{Energieaufwand} [kWh] = \text{Energieaufwand} \left[\frac{kWh}{t} \right] * \text{Masse} [t] \quad (3.1)$$

Diese berechneten Aufwände bei der Energiebereitstellung der jeweiligen Tragkonzepte sind in der Tabelle 12 auf der Seite 76 angeführt. Beachtet werden muss, dass bei dem Konzept 6, der abgespannten Seilkonstruktion auf Druckstäben, zusätzliche Anker mit dem DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900 angeordnet werden müssen. Diese Verankerungsart wurde nur beispielhaft gewählt und muss je nach Baugrundverhältnissen ausgewählt und berechnet werden (vgl. Abschnitt 3.2.3.6 auf der Seite 69). Die Summe der Emissionen beim Seiltragsystem (Konzept 6) wird daher je nach Ausführung der Zugverankerung noch größer. Mit rund 25.000 bis 35.000 kWh für die Fundamentierung, bestehend aus Beton und

Bewehrungsstahl, ist das Fundament ein hoher Energietreiber der gesamten Tragkonstruktion. Speziell bei den Holzkonstruktionen ist der Anteil hoch gemessen am Gesamtenergieaufwand. Holztragwerke sind im Primärenergiebedarf klar im Vorteil gegenüber den Stahltragwerken. Sie benötigen ca. 2 bis 5 Mal weniger Energie in der Herstellung. Die Bauweise spielt bei Holz eine untergeordnete Rolle, da die Rahmenbauweise nur geringfügig weniger Energie benötigt als eine eingespannte auskragende Bauweise. Die Bauweise spielt im Stahlbau hingegen eine weitaus wichtigere Rolle. Da Stahl einen hohen Energiebedarf in der Herstellung hat, verursacht jedes zusätzliche Gewicht bei Querschnittsvergrößerungen eine negativere Energiebilanz. Jede materialsparende Bauweise hilft hier, den Primärenergiebedarf zu senken. Die Rahmenbauweise benötigt rund ein Drittel weniger Energie als eine massive auskragende Konstruktion. Die Seilkonstruktion benötigt von den Stahlkonstruktionen am wenigsten Energie in der Herstellung. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Zugkräfte aufwendig im Boden verankert werden müssen. Diese Bauweise hat jedoch den wesentlichen Vorteil, stützenfrei in der Parkfläche auszukommen, im Vergleich zur Stahlrahmenbauweise.

Tabelle 12: Energieaufwand der Tragkonzepte ohne PV-Anlage

Pos. Nr.	Tragkonstruktion Bezeichnung	Energieaufwand				Summe Energie
		Baustahl S235 [kWh]	Holz GL24h [kWh]	Beton C25/30 [kWh]	Betonstahl B550 [kWh]	
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	265 122	0	21 216	11 884	298 222
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	0	40 262	18 705	8 216	67 183
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	132 655	0	17 217	6 098	155 970
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	864	22 752	19 573	8 146	51 334
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	126 990	0	17 330	6 106	150 427
Konzept 6*	abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben	92 185	0	7 730	7 740	107 655

* Zusätzliche Anker (8x) mit DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900

3.3.1.2 ENERGIEERTRAG DURCH DIE PHOTOVOLTAIKANLAGE

In der Abb. 30 auf der Seite 47 ist die Parkfläche für die Photovoltaikanlage angegeben. Als Fläche für die Modulordnung gilt der Bereich über der Parkfläche. Der Bereich über den Fahrgassen wird nicht mit Modulen ausgestattet. Daraus ergibt sich eine Photovoltaikfläche von 300 m² (vgl. Formel 4.1 auf der Seite 76).

$$\text{Photovoltaikfläche} = 15\text{m} * 5\text{m} * 4 = 300\text{m}^2 \quad (4.1)$$

Als Standort für die Auslegung der Tragstruktur wurde Salzburg gewählt, da der Standort einen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag einer Photovoltaikanlage hat. Die Tragkonstruktionen wurden so entworfen, dass verschiedene Ausrichtungs- und

Modulneigungen umgesetzt werden können, mit Ausnahme des Tragkonzepts 6, der abgespannten Seilkonstruktion, die systembedingt ausschließlich horizontal ist.

- 10° Modulneigung mit Ost-West Ausrichtung
- 10° Modulneigung mit Süd Ausrichtung
- 0° Modulneigung

Die PV-Ertragsrechnung wurde mit der Software PV*SOL 2024 (R4) Testversion von Valentin Software GmbH durchgeführt. Die Eingabedaten in die Software sind der Tabelle 13 auf der Seite 77 zu entnehmen.

Tabelle 13: Eingabedaten der Photovoltaikanlage in PV*SOL zur Ertragsprognoserechnung

Netzgekoppelte PV-Anlage	
Klimadaten	Salzburg, AUT (2001 - 2020)
Quelle der Werte	Meteonorm 8.2
PV-Generatorleistung	56,39 kWp
PV-Generatorfläche	298,3 m ²
Anzahl PV-Module	179
Anzahl Wechselrichter	10

Die jeweiligen Energieerträge nach den Ausrichtungen wurden in den Unterkapiteln 3.3.1.2.1, 3.3.1.2.2 und 3.3.1.2.2 berechnet. Die jährlichen Energieerträge der Modulausrichtungen werden mit der Lebensgarantie einer Photovoltaikanlage von 25 Jahren (Haider et al. 2021, S. 138) multipliziert. Eine Übersicht der Energieerträge über die Lebensdauer ist in der Tabelle 14 auf der Seite 77 und Abb. 52 auf der Seite 78 dargestellt.

Tabelle 14: Gesamte Energieertrag über die Lebensdauer der Photovoltaikanlagen

Pos. Nr.	Dachneigung [°]	Ausrichtung [-]	PV-Fläche [m ²]	Energieertrag [kWh/Jahr]	Lebensdauer [Jahre]	Energieertrag Gesamt [GWh]
1	10	Ost-West	300	59 744	25	1,494
2	10	Süd	300	64 958	25	1,624
3	0	-	300	60 333	25	1,508

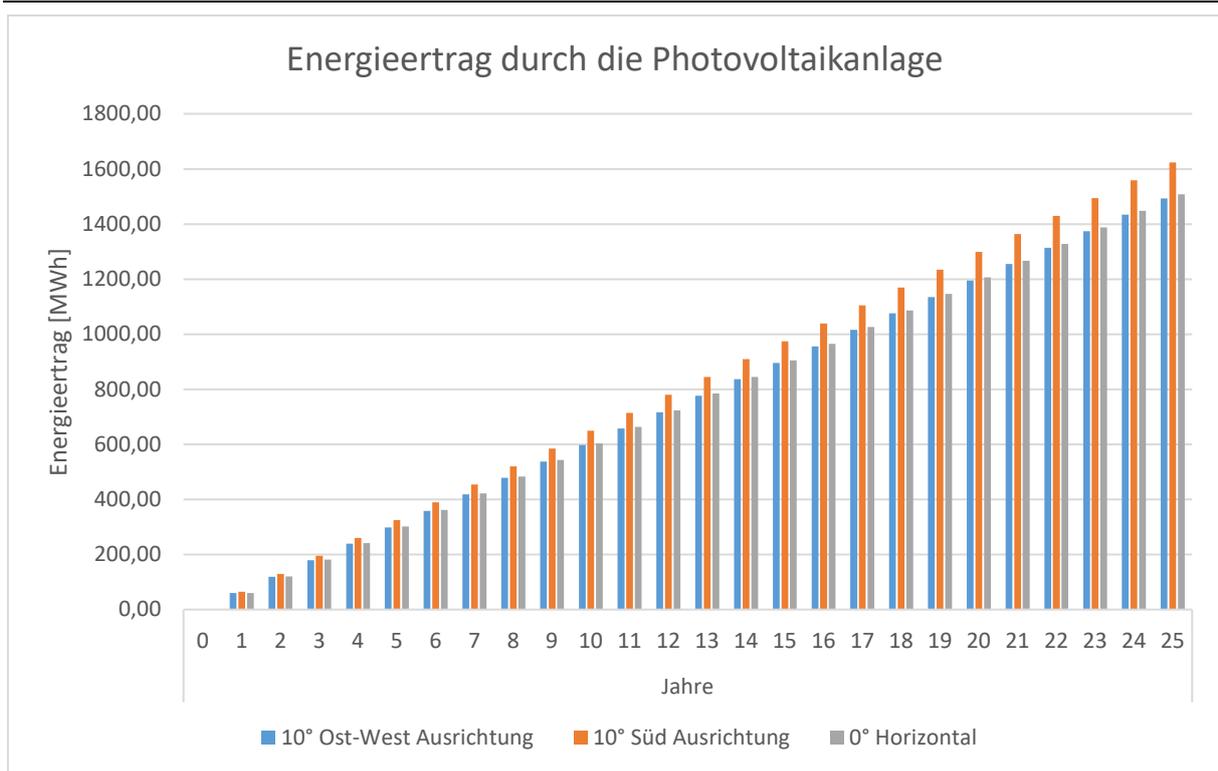


Abb. 52: Energieertragsprognose durch die Photovoltaikanlagen bezogen auf die Modulausrichtung

3.3.1.2.1 ENERGIEERTRAG BEI 10° MODULNEIGUNG MIT OST-WEST AUSRICHTUNG

Der Energieertrag für den Standort Salzburg bei der PV-Fläche von 300 m² mit einer Modulneigung von 10° und einer Ost-Westausrichtung beträgt jährlich 59.744 kWh (vgl. Tabelle 15 auf der Seite 78). Die Energieprognose über den Jahresverlauf für den Standort Salzburg bei 10° Neigung und Ost-Westausrichtung ist in der Abb. 53 auf der Seite 79 ersichtlich.

Tabelle 15: PV-Ertrag der Photovoltaikanlage – 10° Modulneigung Ost-West Ausrichtung

Ertragsprognose	
PV-Generatorleistung	56,39 kWp
Spez. Jahresertrag	1 058,15 kWh/kWp
Anlagennutzungsgrad (PR)	93,90 %
Netzeinspeisung	
Netzeinspeisung im ersten Jahr (inkl. Moduldegradation)	59 744 kWh/Jahr
Standby-Verbrauch (Wechselrichter)	80 kWh/Jahr
Vermiedene CO ₂ -Emissionen	28 042 kg/Jahr

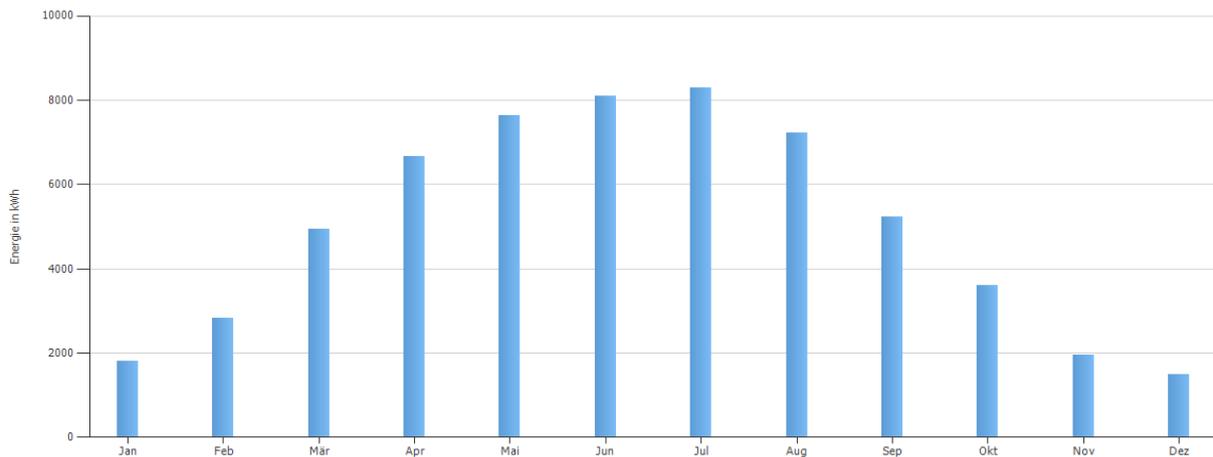


Abb. 53: Ertragsprognose im Jahre – 10° Modulneigung Ost-West Ausrichtung

3.3.1.2.2 ENERGIEERTRAG BEI 10° MODULNEIGUNG MIT SÜD AUSRICHTUNG

Der Energieertrag für den Standort Salzburg bei einer PV-Fläche von 300 m² und einer Modulneigung von 10° mit Südausrichtung beträgt jährlich 64.958 kWh (vgl. Tabelle 16 auf der Seite 79). Die Energieprognose über den Jahresverlauf für den Standort Salzburg bei 10° Neigung und Südausrichtung ist in der Abb. 54 auf der Seite 79 ersichtlich.

Tabelle 16: PV-Ertrag der Photovoltaikanlage – 10° Modulneigung Süd Ausrichtung

Ertragsprognose	
PV-Generatorleistung	56,39 kWp
Spez. Jahresertrag	1 150,62 kWh/kWp
Anlagennutzungsgrad (PR)	93,96 %
Netzeinspeisung	64 958 kWh/Jahr
Netzeinspeisung im ersten Jahr (inkl. Moduldegradation)	64 958 kWh/Jahr
Standby-Verbrauch (Wechselrichter)	80 kWh/Jahr
Vermiedene CO ₂ -Emissionen	30 493 kg/Jahr

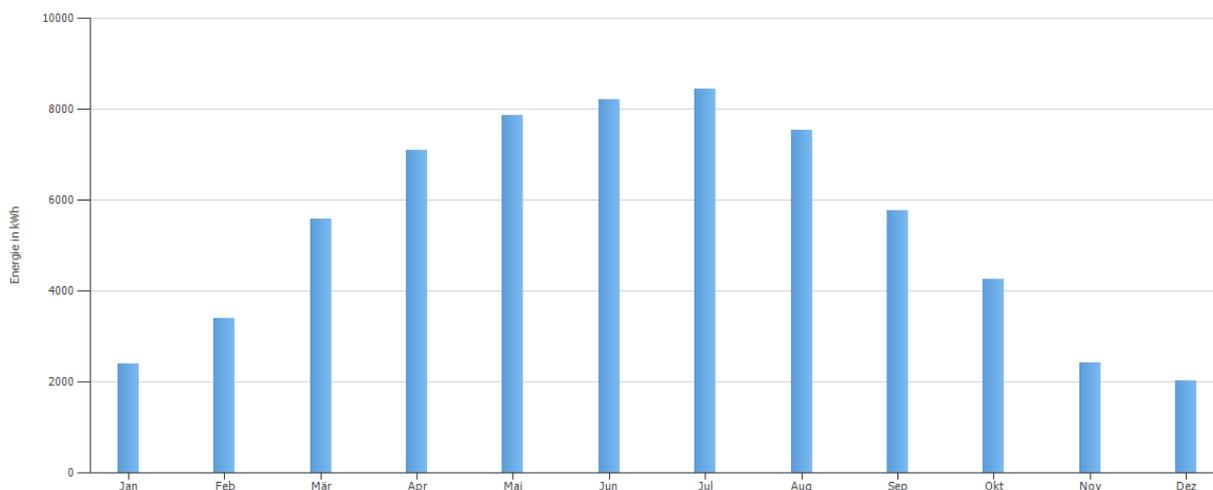


Abb. 54: Ertragsprognose im Jahre – 10° Modulneigung Süd Ausrichtung

3.3.1.2.3 ENERGIEERTRAG BEI 0° MODULNEIGUNG

Der Energieertrag für den Standort Salzburg bei der PV-Fläche von 300 m² mit einer Modulneigung von 0° beträgt jährlich 60.333 kWh (vgl. Tabelle 17 auf der Seite 80). Die Energieprognose über den Jahresverlauf für den Standort Salzburg bei 0° Neigung ist in der Abb. 55 auf der Seite 80 ersichtlich.

Tabelle 17: PV-Ertrag der Photovoltaikanlage – 0° Modulneigung

Ertragsprognose	
PV-Generatorleistung	56,39 kWp
Spez. Jahresertrag	1 068,60 kWh/kWp
Anlagennutzungsgrad (PR)	93,95 %
Netzeinspeisung	60 333 kWh/Jahr
Netzeinspeisung im ersten Jahr (inkl. Moduldegradation)	60 333 kWh/Jahr
Standby-Verbrauch (Wechselrichter)	80 kWh/Jahr
Vermiedene CO ₂ -Emissionen	28 319 kg/Jahr

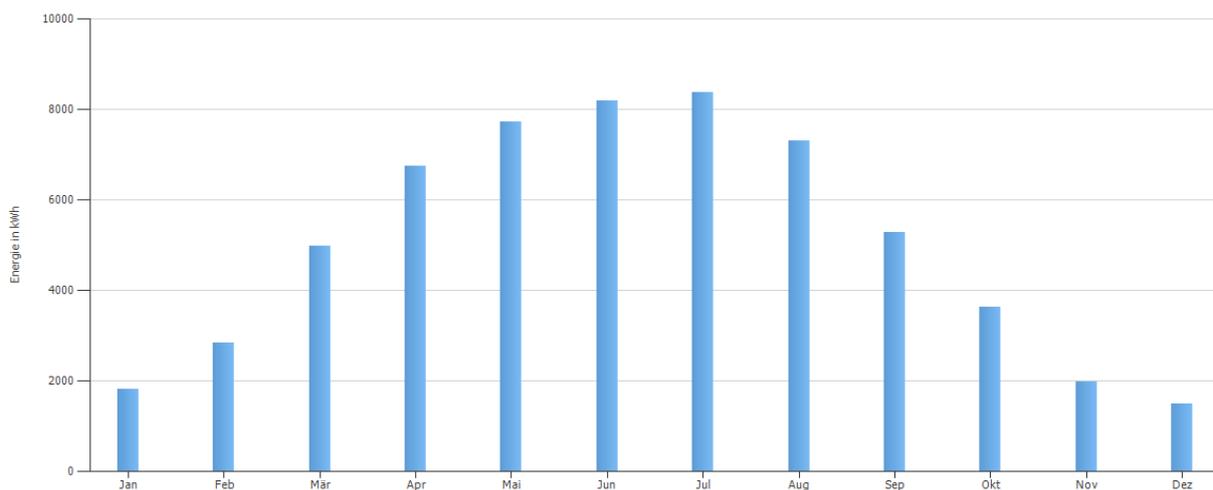


Abb. 55: Ertragsprognose im Jahre – 0° Modulneigung

3.3.1.3 GEGENÜBERSTELLUNG UND BERECHNUNG DER ENERGIEAMORTISATION DER TRAGKONZEPTE

Die berechneten Energieaufwände zur Herstellung der Tragkonstruktion werden mit den jährlichen Energieerträgen aus der Photovoltaikfläche gegenübergestellt und daraus die Amortisationsdauer berechnet. Diese Dauer entspricht der Energy Payback Time (EPBT). Das ist jene Zeitspanne, die benötigt wird, um die anfänglichen Energieaufwände, die zur Herstellung der Tragkonstruktion aufgebracht werden, durch den Betrieb der Photovoltaikanlage auszugleichen. Die Energieamortisationsdauer der jeweiligen Tragkonstruktionen für die unterschiedlichen Modulneigungen wurde mit der Formel (3.2) auf der Seite 81 berechnet.

$$\text{Energie Amortisationsdauer [Jahre]} = \frac{\text{Anfangsenergieaufwand [kWh]}}{\text{jährlicher Energieertrag} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \right]} + \text{Energieamortisationsdauer PV}_{\text{Anlage}} \quad (3.2)$$

Die Energiebilanzierung, einschließlich der anfänglich zusätzlichen Energieaufwände für die Tragkonstruktion, ist in den Abb. 56 auf der Seite 82, Abb. 57 auf der Seite 83 und Abb. 58 auf der Seite 84 dargestellt. Die jährlichen Energieerträge bei einer Modulneigung von 10° und einer Ost-West- sowie Südausrichtung und einer 0° Neigung sind ebenfalls in diesen Abbildungen veranschaulicht. Die Ergebnisse der Energieamortisationsdauer der Tragkonstruktionen sind in den Tabelle 18 auf der Seite 82, Tabelle 19 auf der Seite 83 und Tabelle 20 auf der Seite 84 angeführt. Die Ausrichtung und Modulneigung hat einen wesentlichen Einfluss auf einen produzierten Energieertrag einer Photovoltaikanlage. Im Schnitt hat eine Holzkonstruktion eine Energieamortisationszeit (EPBT) von ca. 1 Jahr. Der Energieaufwand bei der Herstellung der Tragkonstruktion wird bei einer Seilkonstruktion nach 1 Jahr und 9 Monaten ausgeglichen und schneidet unter den Varianten im Stahlbau am besten ab. Die Rahmenbauweise in Stahl, mit und ohne Unterspannung, amortisiert sich nach ca. 2,5 Jahren, mit leichten verbesserten Werten bei der Unterspannung. Die auskragende Massivbauweise in Stahl hat eine EBPT von knapp unter 5 Jahren. Zusätzlich zu den Energieaufwänden der Tragkonstruktion wird die Amortisationsdauer der Photovoltaikanlage berücksichtigt. Die energetische Amortisationszeit von in Europa hergestellten und in Nordeuropa installierten PV-Anlagen beträgt etwa 1,1 Jahre (Stand 2024), abhängig von der installierten Technologie und der Netzeffizienz (Fraunhofer ISE, PSE Projects GmbH 2024, S. 8). Eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 3.4.1 auf der Seite 93.

Tabelle 18: Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion - 10° Ost-West Ausrichtung

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Aufwand Energie [kWh]	Ertrag Energie [kWh/Jahr]	Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion [Jahre]	Energieamortisationsdauer inkl. PV-Anlage [Jahre]
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	298 222	59 744	4,99	6,09
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	67 183	59 744	1,12	2,22
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	155 970	59 744	2,61	3,71
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	51 334	59 744	0,86	1,96
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	150 427	59 744	2,52	3,62

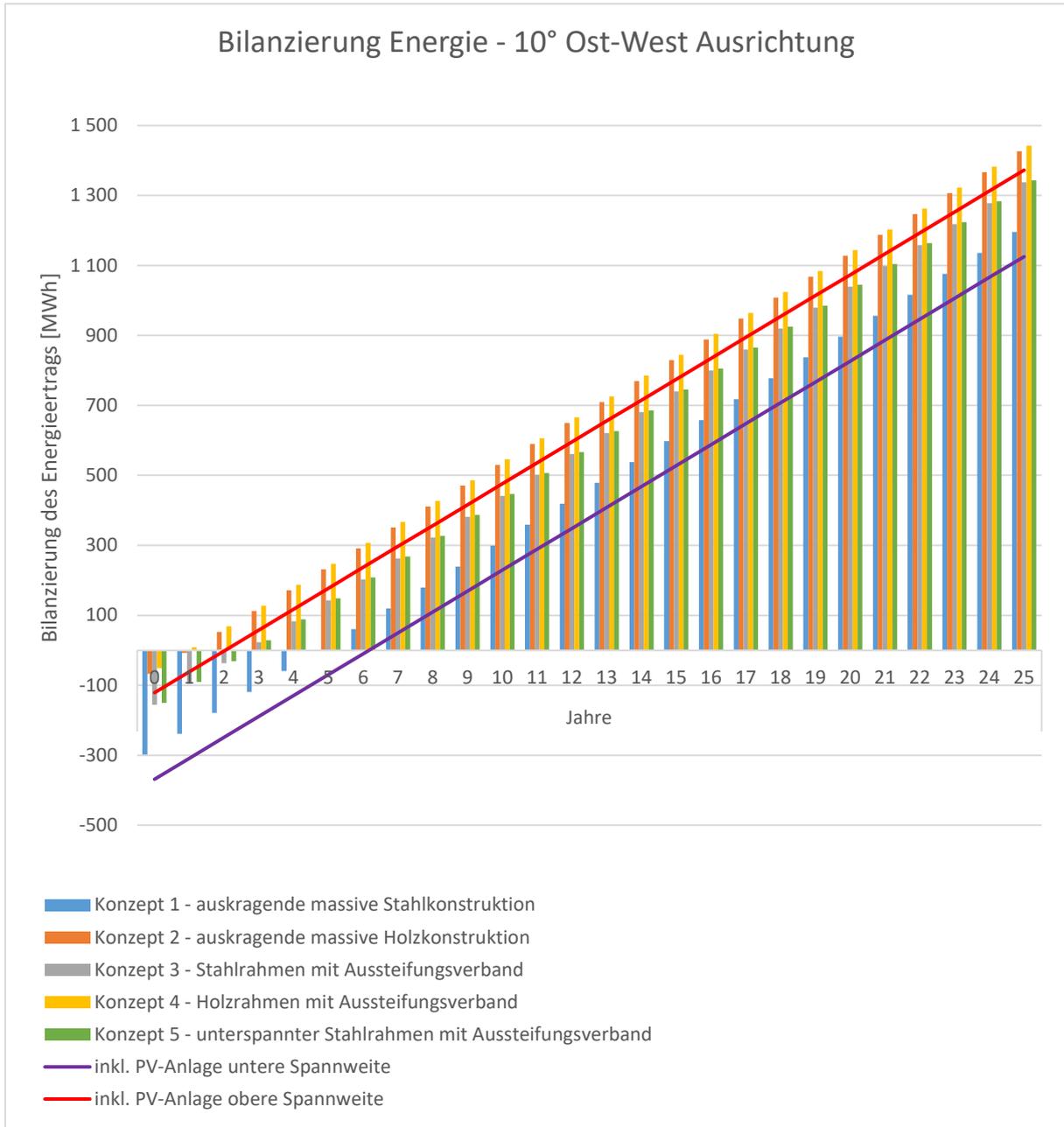


Abb. 56: Bilanzierung Energie – 10° Ost-West-Ausrichtung

Tabelle 19: Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion - 10° Süd Ausrichtung

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Aufwand Energie [kWh]	Ertrag Energie [kWh/Jahr]	Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion [Jahre]	Energieamortisationsdauer inkl. PV-Anlage [Jahre]
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	298 222	64 958	4,59	5,69
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	67 183	64 958	1,03	2,13
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	155 970	64 958	2,40	3,50
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	51 334	64 958	0,79	1,89
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	150 427	64 958	2,32	3,42

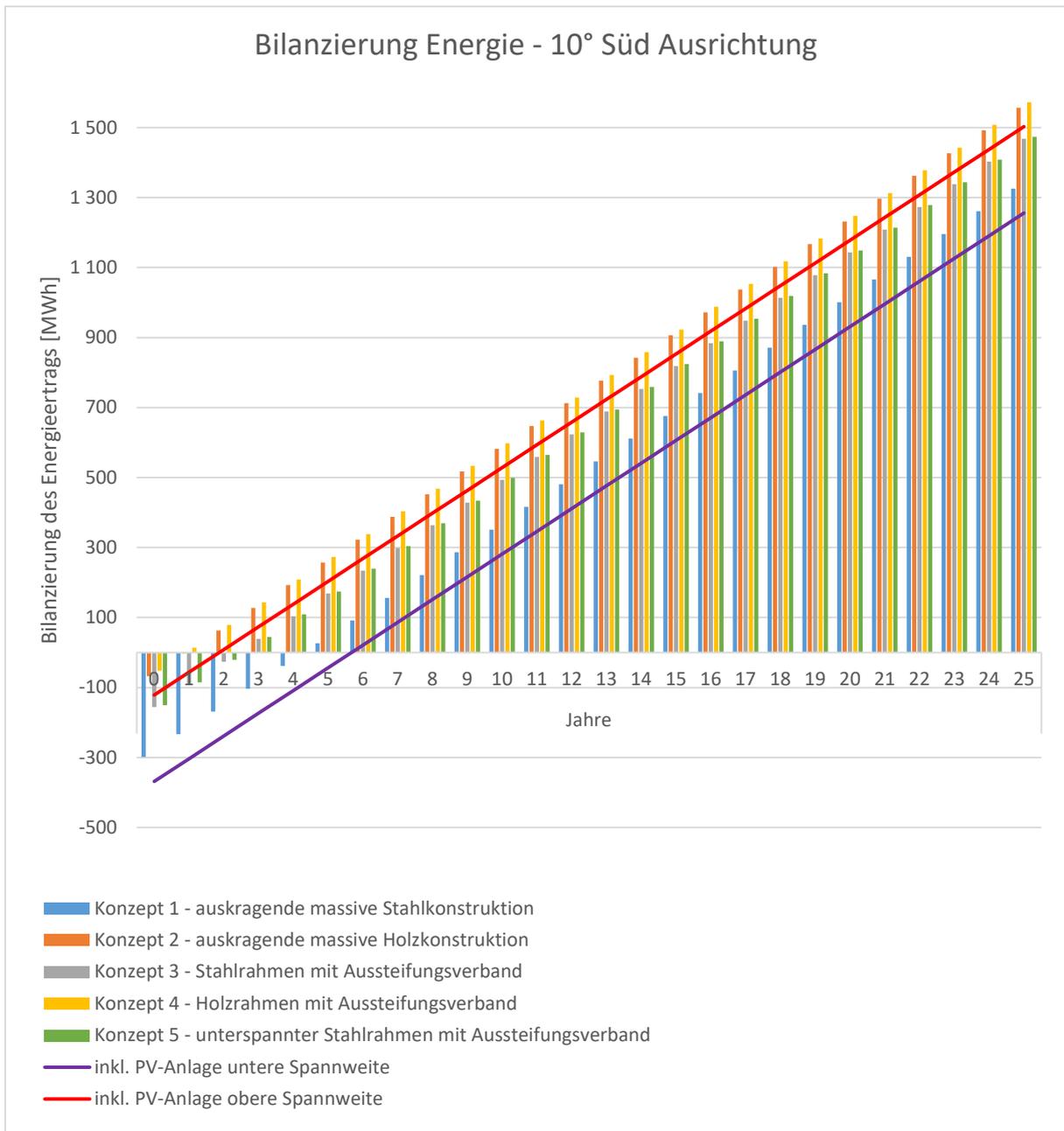


Abb. 57: Bilanzierung Energie – 10° Süd-Ausrichtung

Tabelle 20: Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion – 0° horizontal

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Aufwand Energie [kWh]	Ertrag Energie [kWh/Jahr]	Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion [Jahre]	Energieamortisationsdauer inkl. PV-Anlage [Jahre]
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	298 222	60 333	4,94	6,04
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	67 183	60 333	1,11	2,21
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	155 970	60 333	2,59	3,69
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	51 334	60 333	0,85	1,95
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	150 427	60 333	2,49	3,59
Konzept 6*	abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben	107 655	60 333	1,78	2,88

* Zusätzliche Anker (8x) mit DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900 notwendig

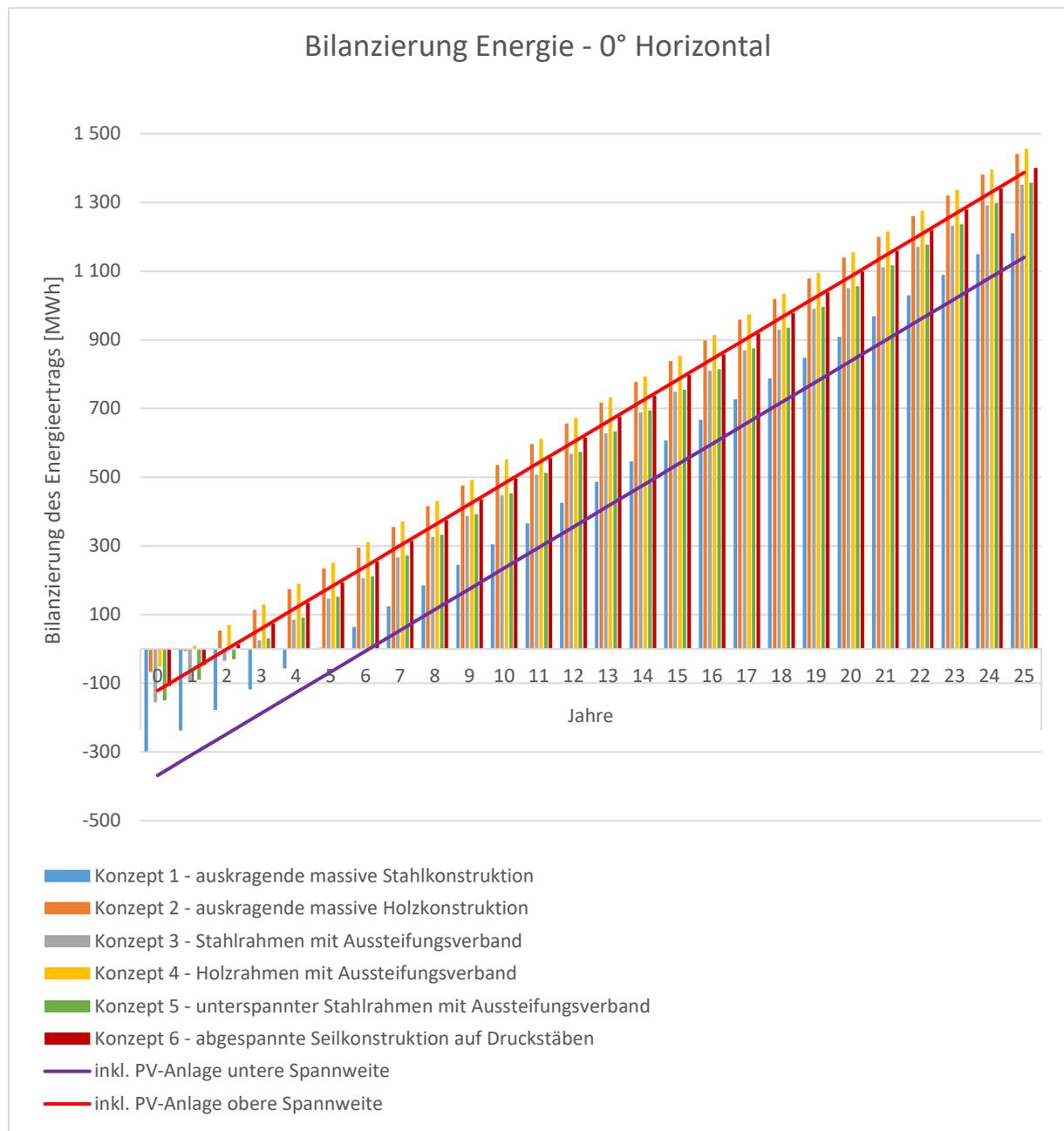


Abb. 58: Bilanzierung Energie – 0° horizontal

3.3.2 CO₂-ÄQUIVALENT BILANZIERUNG DER TRAGKONSTRUKTIONSKONZEPTE

Die notwendige Dekarbonisierung (Der Prozess der Verringerung oder vollständigen Eliminierung von Kohlenstoffemissionen, insbesondere in Form von CO₂, aus wirtschaftlichen Aktivitäten, Energieerzeugung und industriellen Prozessen, um den Klimawandel zu bekämpfen. Dies wird durch den Einsatz erneuerbarer Energien, Energieeffizienz, und technologische Innovationen erreicht) im Energiesektor ist ein zentraler Punkt bei der Energiewende. Um den notwendigen Flächenbedarf zur Installation von Photovoltaikanlagen zu decken, müssen versiegelte Flächen wie Straßen und Parkflächen genutzt werden. Photovoltaikanlagen haben im Vergleich zu nicht-erneuerbaren Energiequellen einen geringeren Ausstoß von CO₂-Äquivalenten. Dadurch trägt die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen wie der Photovoltaik wesentlich zur Dekarbonisierung bei. Es muss jedoch beachtet werden, dass bei der Produktion von Tragkonstruktionen zur Installation dieser Module Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid und andere Stoffe emittiert werden. Die Menge dieser freigesetzten Gase hängt stark von der Ausführung der Tragkonstruktion ab. Dieser bei der Produktion verursachte Ausstoß der Treibhausgase muss während des Lebenszyklus der Photovoltaikanlage wieder kompensiert werden, indem die eingesparten CO₂-Äquivalente durch die Erzeugung von erneuerbarer Energie anstelle des Energiemixes aus fossilen Energieträgern ausgeglichen werden. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden zunächst die CO₂-Äquivalent-Emissionen aus der Tragstrukturproduktion und die CO₂-Äquivalent-Kompensation aus der Energiegewinnung durch Photovoltaik betrachtet, sowie anschließend eine Bilanzierung über den Lebenszyklus aufgestellt. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen beruhen auf den aktuellen Herstellungsverfahren (Stand 2024). Ebenso beruhen die Emissionseinsparungen durch die Photovoltaikanlage auf dem aktuellen Energiemix. Wenn sich dieser in Zukunft ändert, ändern sich auch die gesamte Bilanzierung. Durch Veränderungen bei den Herstellungsverfahren und dem Energiemix ändert sich auch die gesamte Bilanzierung.

3.3.2.1 CO₂-ÄQUIVALENT EMISSION BEI DER HERSTELLUNG DER TRAGKONSTRUKTION

Die CO₂-Faktoren der jeweiligen Materialien werden aufgrund der bei der Herstellung betrachteten Schritte A1 bis A3, die einbezogenen Treibhausgase und das Global-Warming-Potenzial total (GWP-total) ermittelt (baubook GmbH). Die CO₂-Faktoren aus den Datenblättern (vgl. Anhang C – IBO-Richtwerte (Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie) ab der Seite 119) für die bei den Tragkonzepten verwendeten Materialien sind in der Tabelle 21 auf der Seite 86 angeführt. Für das Material Stahl sind zwei unterschiedliche

Werte für den CO₂-Faktor definiert. Durch die Verzinkung der Oberfläche zum Rostschutz wird der CO₂-Äquivalentwert (GWP-total) erhöht. Holz bindet bei seinem Wachstum CO₂, jedoch entstehen bei der Produktion durch die Arbeitsschritte Emissionen. Die Energiebilanz in der Herstellung ist jedoch trotzdem negativ.

Tabelle 21: CO₂-Faktoren der Materialien (baubook GmbH)

Pos. Nr.	Material [-]	CO ₂ -Äquivalent [t CO ₂ /t]
1	Baustahl S235 - verzinkt	2,43
2	Holz GL24h	-1,20
3	Beton C25/30	0,10
4	Betonstahl B550*	1,44

Diese Faktoren wurden mit den in der Tabelle 10 auf der Seite 72 angeführten Massen der jeweiligen Materialien der Tragkonzepte multipliziert (vgl. Formel 5.1 auf der Seite 86).

$$\sum CO_2 \text{ Äquivalent}[t] = Masse_{Material}[t] * CO_2 \text{ Faktor} \left[\frac{t CO_2}{t} \right] \quad (5.1)$$

Diese berechneten CO₂-Äquivalent-Emissionen der jeweiligen Tragkonzepte sind in der Tabelle 22 auf der Seite 87 angeführt. Beachtet werden muss, dass bei Konzept 6, der abgespannten Seilkonstruktion auf Druckstäben, zusätzliche Anker mit dem DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900 angeordnet werden müssen. Diese Verankerungsart wurde nur beispielhaft gewählt und muss je nach Baugrundverhältnissen ausgewählt und berechnet werden (vgl. Abschnitt 3.2.3.6 auf der Seite 69). Die Summe der Emissionen beim Seiltragsystem (Konzept 6) wird daher je nach Ausführung der Zugverankerung noch größer. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen bei der Herstellung der Tragstrukturen verhalten sich analog zu den Energieaufwänden, da die Emissionen stark an den Energieaufwänden gebunden sind. Zwar treten bei der Stahl- und Zementproduktion auch stofflich gebundene Emissionen auf, jedoch verhalten sie sich ähnlich zu den Energieemissionen. Die Fundamentierung ist bei den Holzkonstruktionen die einzige Quelle von CO₂-Emissionen. Diese Emissionen werden jedoch durch die CO₂-Aufnahme während der Wachstumsphase des Holzes vollständig kompensiert, was zu einem negativen CO₂-Ausstoß in der Berechnung führt. Bei den Stahlkonstruktionen wird hingegen ein Fünftel der Emissionen durch die Stahlbetonfundamente verursacht. Analog zu den Energieaufwänden im Stahlbau entstehen auch hohe Emissionen. Jede Gewichtsreduktion senkt bei den Stahlkonstruktionen die CO₂-Äquivalent-Emissionen.

Tabelle 22: CO₂-Äquivalent Emissionen der Tragkonzepte ohne PV-Anlage

Pos. Nr.	Tragkonstruktion Bezeichnung	CO ₂ -Äquivalent				Summe CO ₂
		Baustahl S235 [t CO ₂ -Äq]	Holz GL24h [t CO ₂ -Äq]	Beton C25/30 [t CO ₂ -Äq]	Betonstahl B550 [t CO ₂ -Äq]	
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	67,220	0,000	10,060	3,020	80,300
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	0,000	-21,551	8,869	2,088	-10,595
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	33,634	0,000	8,163	1,549	43,347
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	0,219	-12,178	9,281	2,070	-0,609
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	32,198	0,000	8,217	1,552	41,967
Konzept 6*	abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben	23,373	0,000	3,665	1,967	29,005

* Zusätzliche Anker (8x) mit DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900

3.3.2.2 CO₂-ÄQUIVALENT EINSPARUNG DURCH DIE PHOTOVOLTAIKANLAGE

Photovoltaikanlagen sparen nicht direkt CO₂-Äquivalent-Emissionen ein. Wenn jedoch die Energiegewinnung durch Photovoltaikanlagen zunimmt und im Gegenzug Energieträger aus nicht erneuerbaren Stromquellen abnehmen, wird indirekt CO₂-Äquivalent eingespart. Für den Energiemix in Deutschland liegt eine CO₂-Äquivalenz von 498 g CO₂-Äq/kWh vor. Bei der Produktion der Photovoltaikanlagen fallen ebenfalls Treibhausgasemissionen an. Diese Emissionen können bei der Energiegewinnung über die Lebensdauer aufgerechnet werden. Hier fallen 30 bis 35 g CO₂-Äq/kWh an. Das ergibt in Summe eine Ersparnis von 468 g CO₂-Äq/kWh im Vergleich zum deutschen Energiemix (Wirth, S. 46–47). Die Ersparnis beruht auf dem aktuellen Energiemix mit Stand 2024. Bei zukünftiger Änderung des Energiemixes ändern sich auch die CO₂-Äquivalent-Einsparungen. Die Vermeidung verschiedener CO₂-Emissionen in kg pro Jahr wurde bei der Energieertragsberechnung mit der Software PV*SOL 2024 (R4) Testversion von Valentin Software GmbH mit berechnet und ist in den Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 angegeben. Eine Übersicht über die gesamten vermiedenen CO₂-Äquivalent-Emissionen bei den betrachteten Ausrichtungsmöglichkeiten ist in der Tabelle 23 auf der Seite 87 und Abb. 59 auf der Seite 88 ersichtlich.

Tabelle 23: Vermiedene CO₂-Äquivalent Emissionen durch die Photovoltaikanlage abzüglich der auf die Lebensdauer gerechneten Emissionen bei der Herstellung der PV-Anlage

Pos. Nr.	Dachneigung [°]	Ausrichtung [-]	PV-Fläche [m ²]	CO ₂ -Äquivalent [kg CO ₂ -Äq/Jahr]	Lebensdauer [Jahre]	Gesamt CO ₂ -Äquivalent [t CO ₂ -Äq]
1	10	Ost-West	300	28 042	25	701,05
2	10	Süd	300	30 493	25	762,33
3	0	-	300	28 319	25	707,98

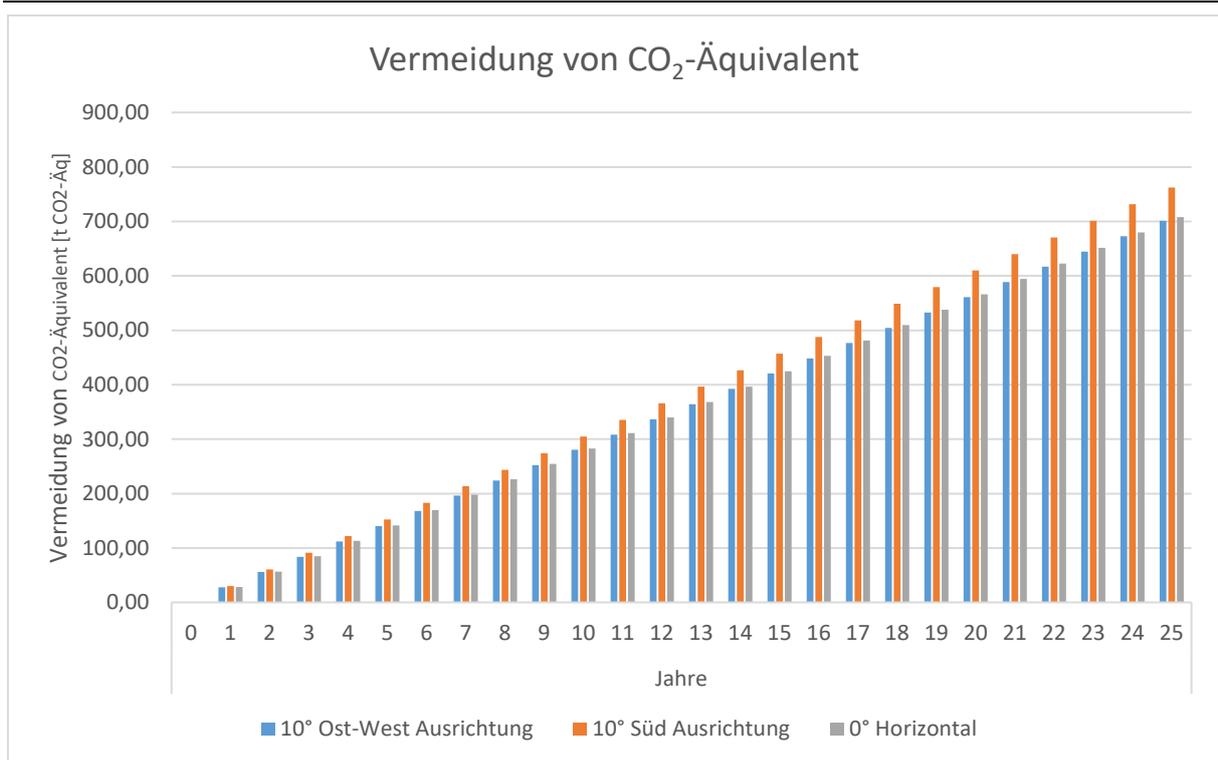


Abb. 59: Vermeidungsprognose von CO₂-Äquivalenten durch die Photovoltaikanlagen, abzüglich der auf die Lebensdauer gerechneten Emissionen bei der Herstellung der PV-Anlage, bezogen auf die Modulausrichtung in Folge der Energiegewinnung

3.3.2.3 GEGENÜBERSTELLUNG UND BERECHNUNG DER CO₂-ÄQUIVALENT AMORTISATION DER TRAGKONZEPTE

Die Energieaufwände zur Herstellung der Tragkonstruktion werden berechnet und den jährlichen Energieerträgen aus der Photovoltaikfläche gegenübergestellt. Daraus ergibt sich die Amortisationsdauer. Bei den jährlichen Einsparungen der CO₂-Äquivalent-Emissionen sind die auf die Lebensdauer gerechneten Emissionen zur Herstellung der PV-Anlage bereits einbezogen. Die Energieamortisationsdauer der jeweiligen Tragkonstruktionen für die unterschiedlichen Modulneigungen wurde mit der Formel (5.2) auf der Seite 88 berechnet.

$$CO_2\text{-Äquivalent Amortisationsdauer [Jahre]} = \frac{\text{Anfangs } CO_2\text{-Äq Aufwand [kg } CO_2 \text{ Äq]}}{\text{jährlicher } CO_2\text{-Äq Einsparung } \left[\frac{\text{kg } CO_2 \text{ Äq}}{\text{CO}_2 \text{ Äq}} \right]} \quad (5.2)$$

Die CO₂-Äquivalentbilanzierung, einschließlich des anfänglich zusätzlichen CO₂-Äquivalent-Ausstoßes bei der Herstellung der Tragkonstruktion, sowie der jährlichen Vermeidung von CO₂-Äquivalent-Emissionen durch Photovoltaik, ist in den Abb. 60 auf der Seite 90, Abb. 61 auf der Seite 91 und Abb. 62 auf der Seite 92 dargestellt. Diese Abbildungen zeigen die Ergebnisse bei einer Modulneigung von 10° und einer Ost-West- sowie Südausrichtung und

einer Modulneigung von 0°. Die Ergebnisse der Amortisationsdauer der Tragkonstruktionen sind in den Tabelle 24 auf der Seite 90, der Tabelle 25 auf der Seite 91 und der Tabelle 26 auf der Seite 92 dargestellt. Da die Einsparungen der CO₂-Emissionen direkt an die Energieerträge der Photovoltaikanlage gekoppelt sind, verhalten sich die Amortisationszeiten proportional zu den Energieamortisationszeiten, außer bei den Holzkonstruktionen. Die Zeiten, bis sich die Emissionen zur Herstellung der Tragkonstruktion amortisieren, sind stark von den anfänglichen Ausstößen bei der Produktion abhängig. Holztragkonstruktionen sind durch die Aufnahme von CO₂ während der Wachstumsphase bereits bei der Errichtung ausgeglichen. Im Vergleich dazu schneiden Stahlkonstruktionen deutlich schlechter ab. Je nach Ausführungsart dauert die Amortisation zwischen 1,5 und 3 Jahren, wobei Leichtbaukonstruktionen klar im Vorteil sind. Eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 3.4.2 auf der Seite 96.

Tabelle 24: CO₂-Äquivalent Amortisationsdauer Tragkonstruktion - 10° Ost-West Ausrichtung

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Aufwand CO ₂ -Äq. [t CO ₂ -Äq]	Vermeidung CO ₂ -Äq. Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage [kg CO ₂ -Äq/t]	Amortisationsdauer [Jahre]
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	80 300	28 042	2,86
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	-10 595	28 042	-0,38
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	43 347	28 042	1,55
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	-609	28 042	-0,02
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	41 967	28 042	1,50

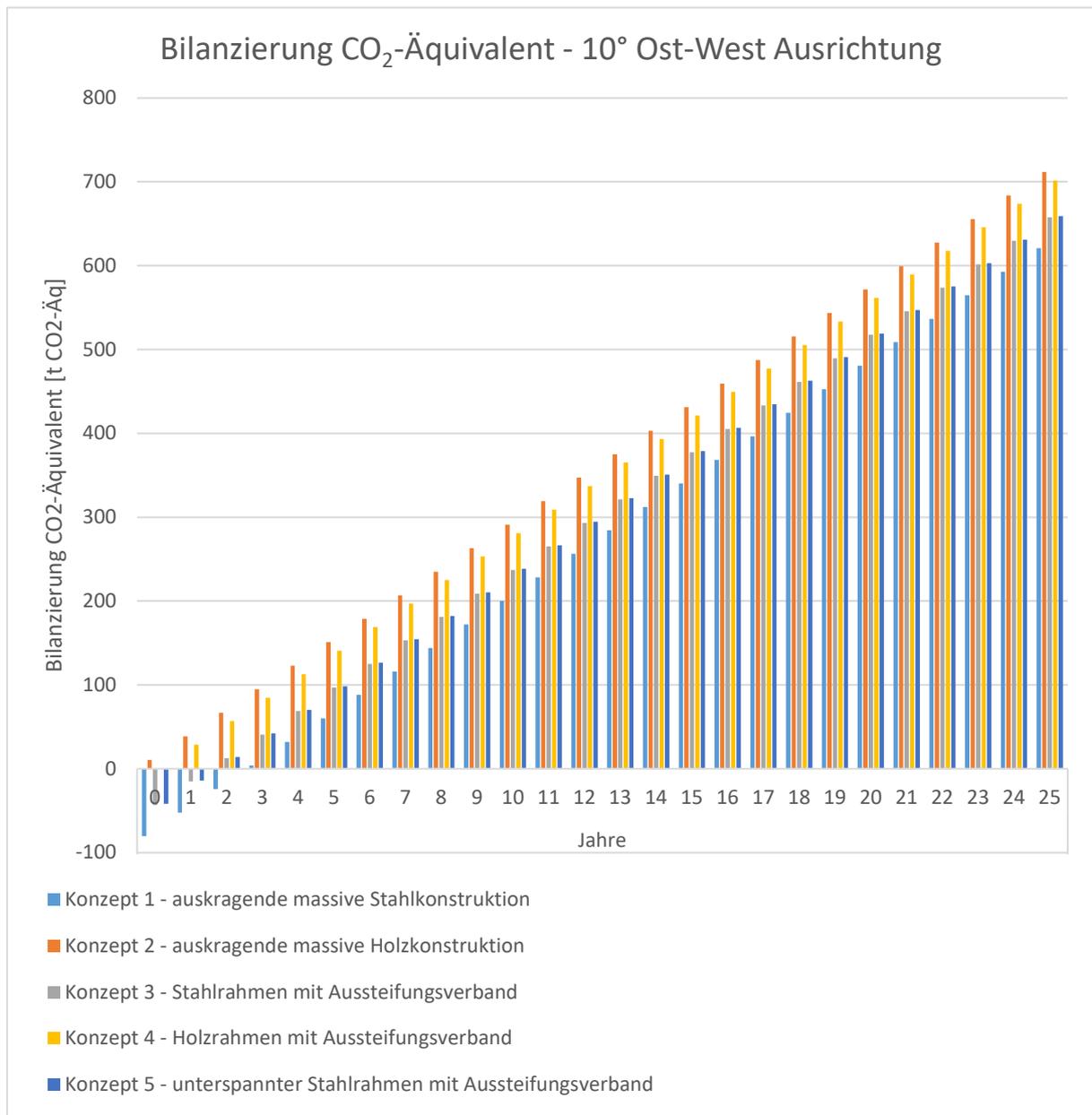


Abb. 60: Bilanzierung CO₂-Äquivalent der Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage – 10° Ost-West Ausrichtung

Tabelle 25: CO₂-Äquivalent Amortisationsdauer Tragkonstruktion - 10° Süd Ausrichtung

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Aufwand CO ₂ -Äq. [t CO ₂ -Äq]	Vermeidung CO ₂ -Äq. Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage [kg CO ₂ -Äq/t]	Amortisationsdauer [Jahre]
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	80 300	30 493	2,63
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	-10 595	30 493	-0,35
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	43 347	30 493	1,42
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	-609	30 493	-0,02
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	41 967	30 493	1,38

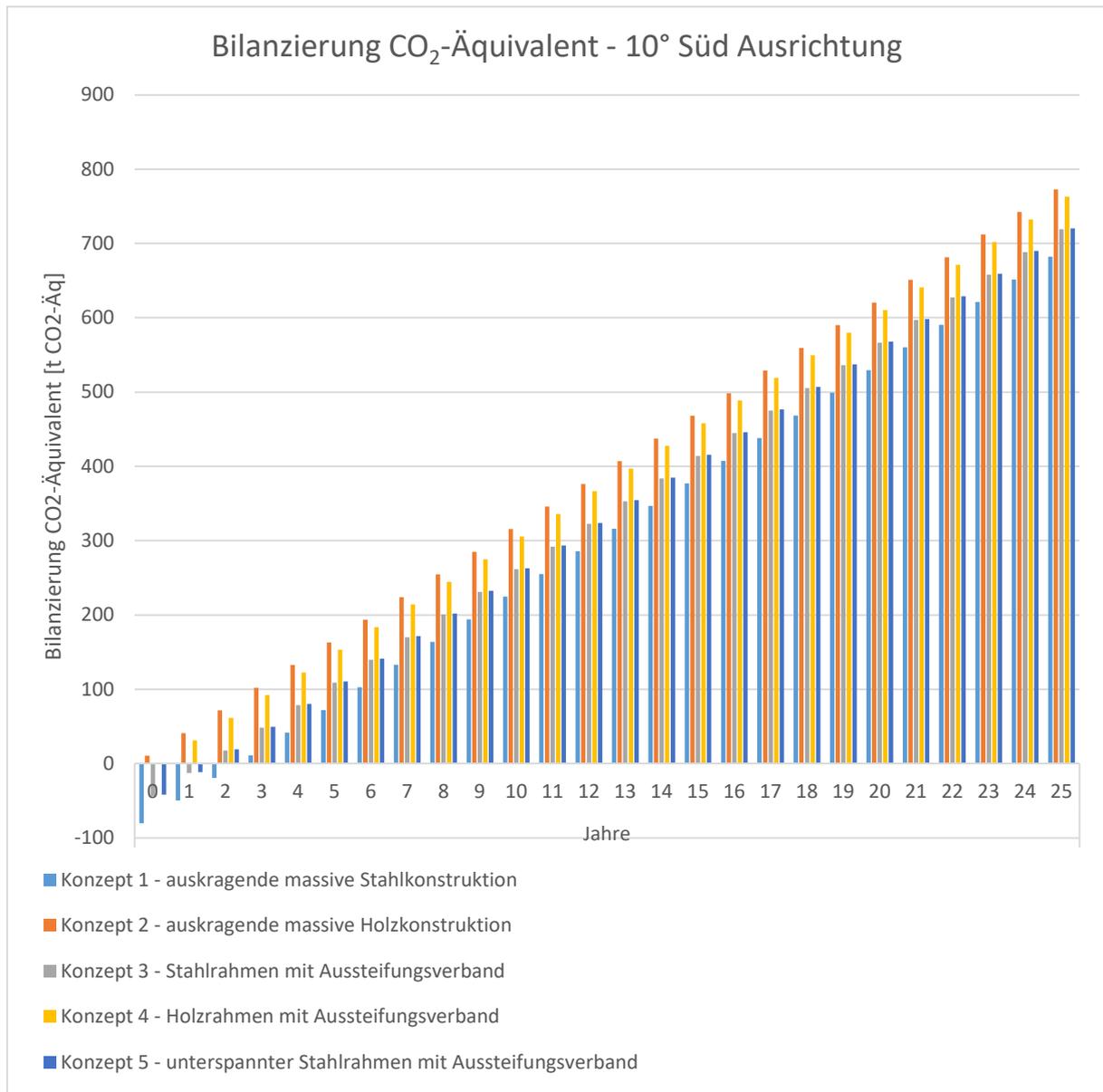


Abb. 61: Bilanzierung CO₂-Äquivalent der Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage – 10° Süd-Ausrichtung

Tabelle 26: CO₂-Äquivalent Amortisationsdauer Tragkonstruktion – 0° horizontal

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Aufwand CO ₂ -Äq. [t CO ₂ -Äq]	Einsparung CO ₂ -Äq. Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage [kg CO ₂ -Äq/t]	Amortisationsdauer [Jahre]
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	80 300	28 319	2,84
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	-10 595	28 319	-0,37
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	43 347	28 319	1,53
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	-609	28 319	-0,02
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	41 967	28 319	1,48
Konzept 6*	abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben	29 005	28 319	1,02

* Zusätzliche Anker (8x) mit DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900 notwendig

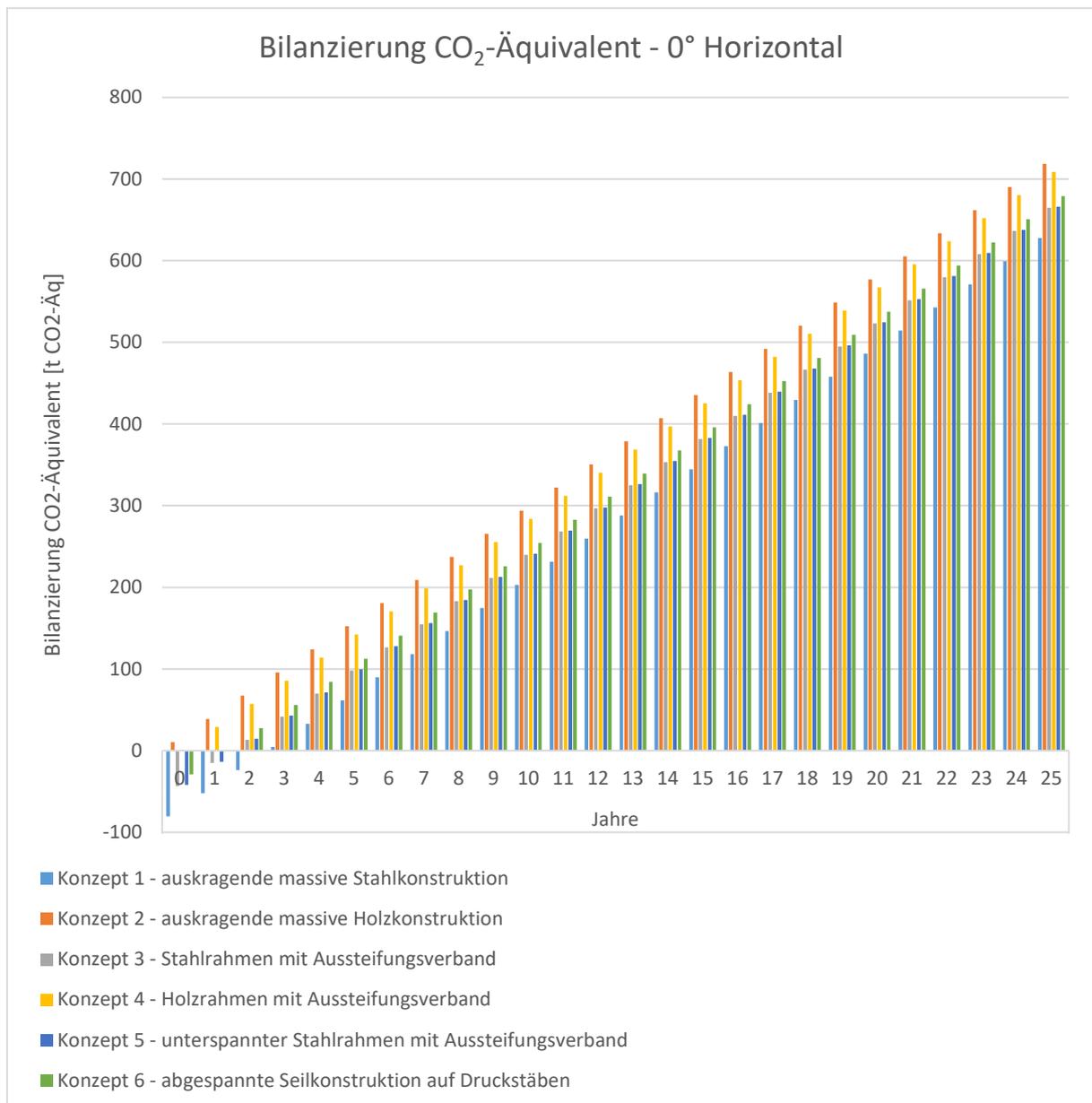


Abb. 62: Bilanzierung CO₂-Äquivalent der Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage – 0° horizontal

3.4 DISKUSSION DER UMWELTBILANZIERUNG

3.4.1 ENERGIEBILANZIERUNG DER TRAGSYSTEME

Aus der Energiebilanzierung geht klar hervor, dass die Auswahl der Tragstruktur und die Materialauswahl eine entscheidende Rolle für die notwendigen Energieaufwände bei der Erstellung des Tragwerks und der Amortisationszeiten haben. Die Energieerträge, die im Abschnitt 3.3.1.2 auf der Seite 76 behandelt werden, sind abhängig von der Modulneigung und -ausrichtung. Hierdurch können die Erträge um ca. 10 % verändert werden.

Der anteilige Energieaufwand an der erzeugten Energie über die Lebensdauer für die Tragkonstruktion und die Gesamtanlage inkl. der PV-Anlage ist in der Tabelle 27 auf der Seite 94 ersichtlich. Die nutzbare Netto-Energie mit der Berücksichtigung der Tragkonstruktion inkl. der Photovoltaikanlage ist in der Abb. 63 auf der Seite 94 ersichtlich. Bei der Betrachtung der Tragkonstruktion ohne der Photovoltaikanlage schneiden die Holzkonstruktionen aufgrund der geringen Energieaufwände in der Herstellung am besten ab. Hier werden unter 5 % des gesamten Energieertrags der Anlage zur Herstellung der Tragstruktur verwendet. Die Ausführungsvariante, ob Rahmenbauweise oder auskragende Elemente auf eingespannten Stützen, hat nur einen geringen Einfluss auf die Amortisationsdauer. Die zusätzlichen Stützen senken die Amortisationsdauer zwar um ca. 10 %, aber da die Amortisationsdauer unter einem Jahr liegt, muss abgewogen werden, ob die zusätzliche Einschränkung in der Parkfläche hierfür in Kauf genommen werden soll. Bei den Stahlvarianten spielt die Ausführungsvariante der Tragkonstruktion eine wesentliche Rolle. Bei einer massiven auskragenden Konstruktion werden die Energieaufwände der Tragkonstruktion erst nach knapp unter 5 Jahren amortisiert. Bei einer Lebensdauer der Photovoltaikanlage von rund 25 Jahren werden rund 19 % der erzeugten Energie durch die PV-Anlage für die Tragkonstruktion aufgewendet, um die Tragkonstruktion auszugleichen. Bei der Rahmenbauweise im Stahlbau ist die Unterspannung aufgrund der geringen Stützweite von 5 m minimal. Dies kann jedoch bei größeren Stützweiten signifikant werden. Für die Stahlrahmenbauweise werden rund 10 % der erzeugten Energie über die Lebensdauer zum Ausgleich der Tragkonstruktion verwendet. Die Seilkonstruktion schneidet hier nochmals besser ab, wobei der zusätzliche Vorteil der Stützenfreiheit in der Parkfläche bei der Auswahl der Tragsysteme berücksichtigt werden kann. Die Amortisation der Photovoltaikanlage wird für in Europa hergestellte Module und in Nordeuropa aufgestellte Anlagen innerhalb von 1,1 Jahren erreicht. Dies muss bei der Betrachtung der

Energiebilanzierung der Anlage berücksichtigt werden. Die Werte sind bei allen Tragkonzepten identisch, was die Amortisierungszeit bei allen Tragkonzepten gleich lang verlängert.

Tabelle 27: prozentualer Anteil der Energie zur Erzeugung der Tragstruktur und der PV-Anlage zu den Erträgen aus der PV-Anlage über die Lebensdauer

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Aufwand Energie [kWh]	Ertrag Energie [kWh]	anteiliger Prozentsatz	
				Tragkonstruktion	inkl. PV-Anlage
					[%]
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	298 222	1 541 958	19%	24%
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	67 183	1 541 958	4%	9%
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	155 970	1 541 958	10%	14%
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	51 334	1 541 958	3%	8%
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	150 427	1 541 958	10%	14%
Konzept 6*	abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben	107 655	1 541 958	7%	11%

* Zusätzliche Anker (8x) mit DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900 notwendig

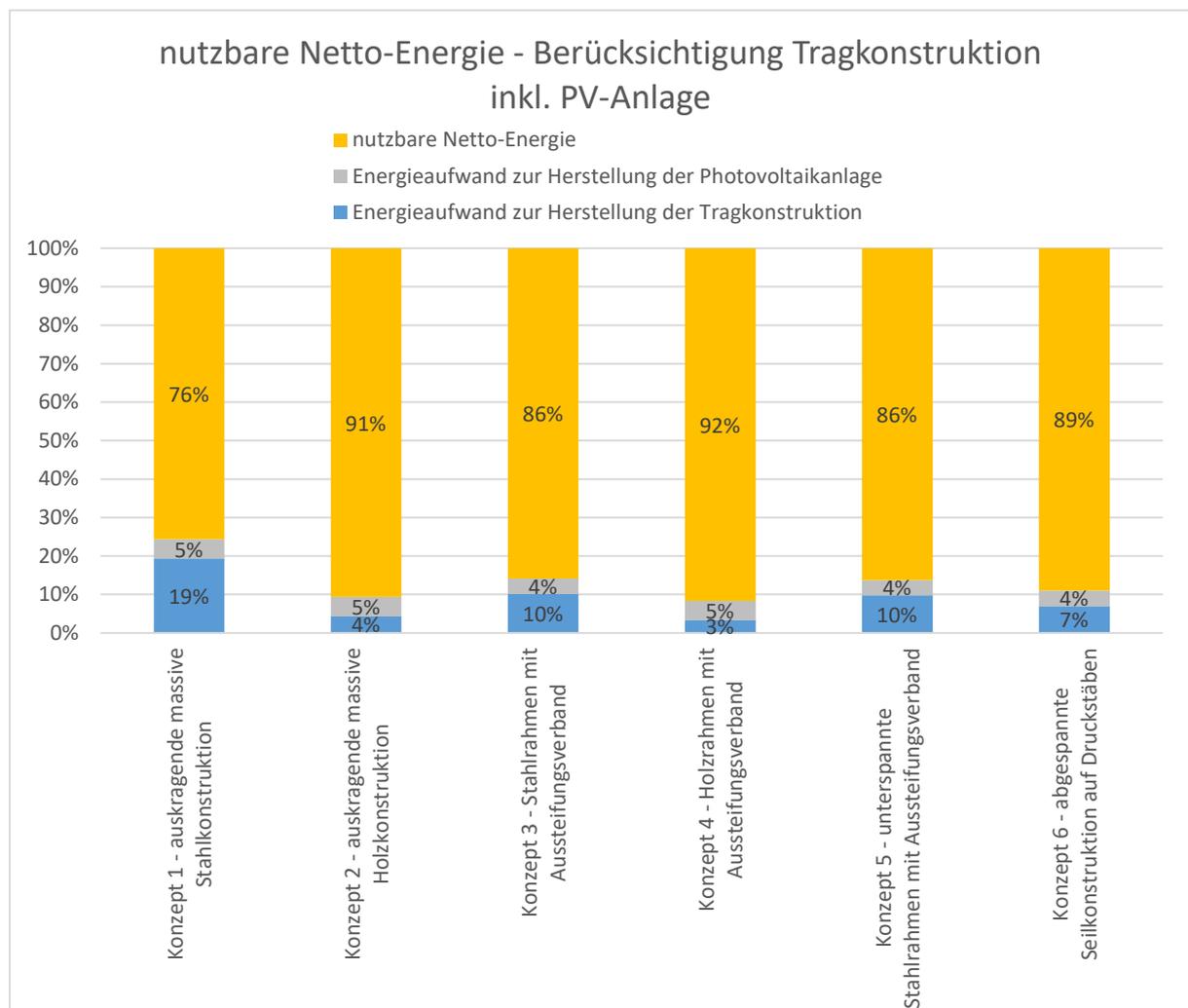


Abb. 63: Nutzbare Nettoenergie über die Lebensdauer von 25 Jahren – Berücksichtigung Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage

Limitationen:

Die durchgeführte Energiebilanzierung hat einige Einschränkungen. Die Ergebnisse basieren auf der angenommenen Parkplatzgröße und den angenommenen Stützweiten. Bei einer Erhöhung der Stützweiten werden die Vorteile der Leichtbaukonstruktionen, wie der Seilkonstruktion oder der zusätzlichen Unterspannung bei Biegeträgern, besser genutzt, da die Querschnitte der Träger im Verhältnis zur Stützweite nicht so stark ansteigen. Die Energiedaten wurden nur für die Herstellung der Materialien in den Abschnitten A1 - A3 erhoben. Bei einer Lebenszeitbetrachtung der eingesetzten Materialien verändern sich auch die Energiebilanzierungen. Diese Betrachtung ist jedoch stark von den späteren Schritten abhängig. Tragkonstruktionen können aufgrund ihrer längeren Lebensdauer im Vergleich zur PV-Anlage für eine weitere Bestückung mit PV-Modulen verwendet werden. Auch können Elemente der Tragkonstruktionen durch einfache Anpassungen für andere Einsatzmöglichkeiten wiederverwertet werden. Die thermische Verwertung der Holzkonstruktionen kann wiederum Energie erzeugen. Aus Stahlschrott kann durch Einschmelzen neuer Stahl hergestellt werden. Um diese Variationen zu vermeiden, wird die Energiebilanzierung ausschließlich auf die Herstellungsschritte der Materialien beschränkt.

Weitere Kontextualisierung:

Die Ergebnisse aus der Energiebilanzierung können auch für Abschätzungen für höherrangige Verkehrsflächen wie Straßen, Autobahnen und Schienentrassen übertragen werden. Dabei muss beachtet werden, dass bei diesen Einsatzmöglichkeiten erhöhte Anforderungen aus Vorgaben und Belastungen gelten. Die zusätzlichen Belastungen werden durch dynamische Windbelastungen (vgl. Abschnitt 3.2.2 auf der Seite 47) hervorgerufen. Dies muss bei der Nachweisführung der Tragkonzepte berücksichtigt werden. Durch die zusätzlichen Belastungen müssen die Strukturen verstärkt ausgeführt werden, wodurch die Energieaufwände steigen und die Amortisationszeit verlängert wird. Dynamische Belastungen müssen speziell bei den Leichtbaukonstruktionen wie den unterspannten Systemen und der Seilkonstruktion nachgewiesen werden, da hier Schwingungen größere negative Auswirkungen haben können.

Die Energiebilanzierung kann grundsätzlich auch für andere Länder übertragen werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Nachweisführung der Querschnitte für die österreichischen Normen und nationalen Anhänge durchgeführt wurde. Für andere Länder muss zum einen die Nachweisführung angepasst werden und zum anderen die Standortdaten bei der

Energieertragsrechnung berücksichtigt werden. Die Energieerträge sind stark standortabhängig, was einen erheblichen Einfluss auf die Amortisationsdauer hat.

Es ist zu beachten, dass die Varianten mit eingespannten Stützen und Kragträgern den geringsten Einfluss auf die Benutzbarkeit der Verkehrsfläche haben. Im Gegensatz dazu erfordern Rahmenvarianten zusätzliche Stützen in den Verkehrsflächen, was die Bewegungsfreiheit der Verkehrsteilnehmer beim Rangieren einschränkt. Daher muss dieses Kriterium bei der Auswahl der Tragsysteme besonders berücksichtigt werden.

3.4.2 CO₂-ÄQUIVALENT BILANZIERUNG DER TRAGSYSTEME

Die CO₂-Äquivalent-Bilanzierung verhält sich analog zur Energiebilanzierung. Der wesentliche Unterschied liegt bei den Holzkonstruktionen. Während des Wachstumsprozesses wird CO₂ gebunden, wodurch Holzkonstruktionen eine negative CO₂-Bilanzierung im Herstellungsprozess A1 - A3 aufweisen. Obwohl die Fundierung aus Stahlbeton Emissionen verursacht, ist die gesamte Bilanzierung bei den berechneten Holzkonstruktionen negativ. Bereits bei der Errichtung sind die Emissionen vollständig amortisiert. Die prozentualen Anteile der anfänglichen CO₂-Äquivalent-Emissionen bei der Herstellung der Tragstrukturen zu den Einsparungen durch die Photovoltaikanlage über die Lebensdauer von 25 Jahren sind in der Tabelle 28 auf der Seite 97 angeführt. Bei dieser Berechnung wurden die Emissionen, die durch die Herstellung der PV-Anlagen verursacht werden, bereits bei den Einsparungen berücksichtigt. Diese Berechnung stützt sich auf die Nettoeinsparungen. Die nutzbare Netto-CO₂-Äquivalenteinsparung für die jeweiligen Tragkonzepte inkl. der PV-Anlage ist in der Abb. 65 auf der Seite 97 ersichtlich. Die Ergebnisse der Stahlkonzepte entsprechen denen der Energiedaten. Die Leichtbaukonstruktionen schneiden deutlich besser ab als die massiven auskragenden Stahlkonstruktionen, wobei die CO₂-Äquivalent-Amortisationszeiten im Vergleich zu den Energieamortisationszeiten wesentlich kürzer sind. Die Amortisation der Energie ist daher ausschlaggebend für die ökologische Auswahl der Tragkonzepte.

Tabelle 28: prozentualer Anteil der CO₂-Äquivalent-Emissionen zur Erzeugung der Tragstruktur inkl. der Photovoltaikanlage zu den Einsparungen durch PV-Anlage über die Lebensdauer

Pos. Nr. [-]	Tragkonstruktion Bezeichnung [-]	Aufwand CO ₂ -Äq. [t CO ₂ -Äq]	Vermeidung CO ₂ -Äq. [t CO ₂ -Äq]	anteiliger Prozentsatz Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage
Konzept 1	auskragende massive Stahlkonstruktion	80 300	1 493 600	5%
Konzept 2	auskragende massive Holzkonstruktion	-10 595	1 493 600	-1%
Konzept 3	Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	43 347	1 493 600	3%
Konzept 4	Holzrahmen mit Aussteifungsverband	-609	1 493 600	0%
Konzept 5	unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverb.	41 967	1 493 600	3%
Konzept 6*	abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben	29 005	1 493 600	2%

* Zusätzliche Anker (8x) mit DYWI Drill Hohlstab-System T76-1900 notwendig

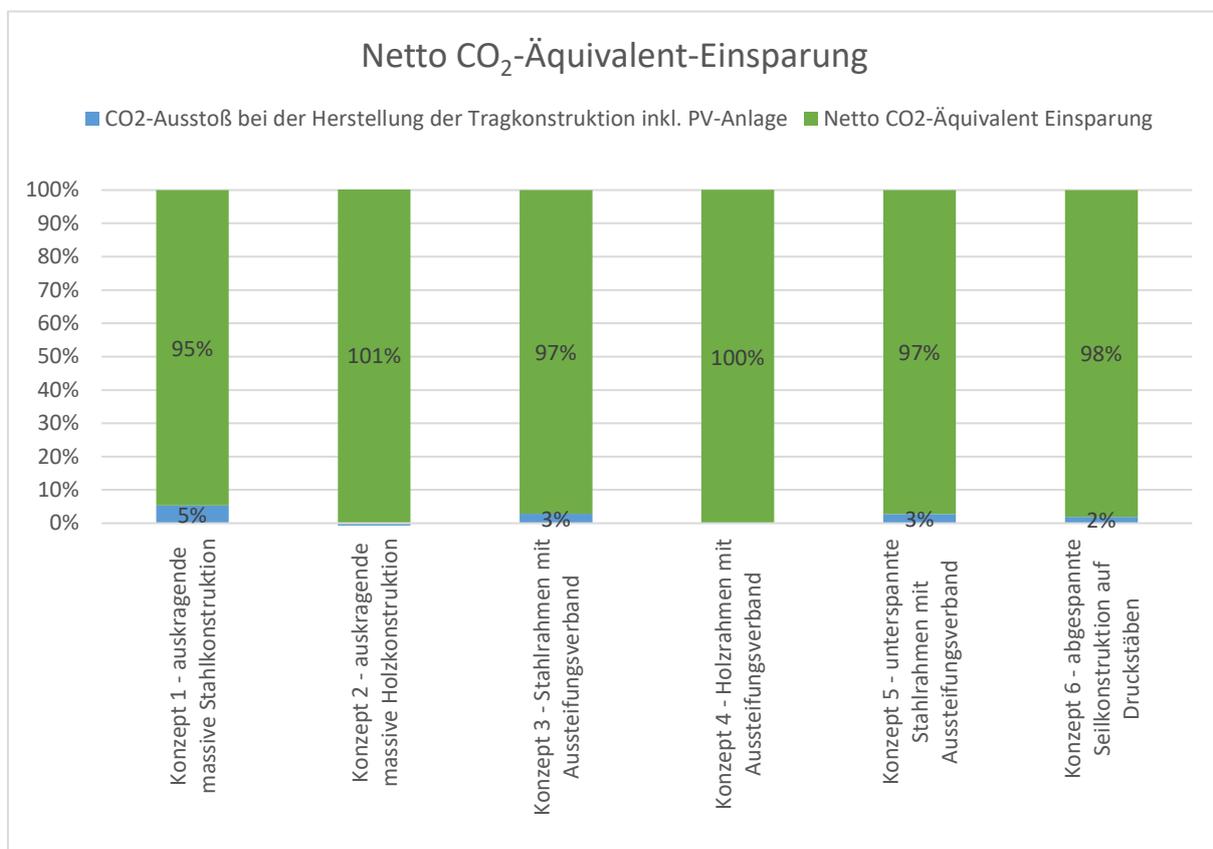


Abb. 64: Netto CO₂-Äquivalent Einsparung über die Lebensdauer von 25 Jahren

Limitationen:

Die durchgeführte CO₂-Äquivalentbilanzierung beruht auf den gleichen Limitationen wie die Energiebilanzierung im Abschnitt 3.4.1 auf der Seite 93. Zusätzlich muss bei der Holzkonstruktion beachtet werden, dass die negative CO₂-Bilanzierung aufgrund der Betrachtungsweise der Herstellung ohne Lebenszyklusanalyse entsteht. Holz dient als CO₂-Speicher, der während des Wachstums CO₂ aufnimmt. Jedoch wird dieses CO₂ bei der

natürlichen Zersetzung bzw. bei einer thermischen Verwertung wieder freigesetzt. Daher ist eine Lebenszyklusanalyse nicht negativ. Eine Lebenszyklusbetrachtung bei Holzbauten ist jedoch immer noch wesentlich besser als bei Stahlkonstruktionen.

Weitere Kontextualisierung:

Die weitere Kontextualisierung der CO₂-Äquivalentbilanzierung kann aus der Energiebilanzierung entnommen werden (vgl. Abschnitt 3.4.1 auf der Seite 93).

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Das Ziel dieser Arbeit war die Bilanzierung von Energie- und CO₂-Äquivalent-Emissionen von Tragsystemen zur Überdachung von Parkflächen mit PV-Anlagen. Die Amortisationsdauer dieser beiden Aspekte wurde für die Tragstrukturen ermittelt.

Durch die Bilanzierung des Energiebedarfs bei der Herstellung aller Tragsysteme mit dem späteren Energieertrag durch die montierte PV-Anlage wird deutlich, dass die Auswahl der Systeme und Materialien einen Einfluss auf die Amortisationsdauer hat. Die CO₂-Äquivalent-Amortisation ist proportional zur Energieamortisation, außer bei Holzkonstruktionen, da Holz beim Wachsen CO₂ bindet. Die Emissionen werden jedoch deutlich früher ausgeglichen, wodurch die Bilanzierung der Energie einen wichtigeren Einfluss auf die Auswahl der Tragsysteme haben muss. Im Holzbau spielt die Auswahl des Tragkonzeptes keine Rolle. Der Vergleich einer Rahmenkonstruktion mit der auskragenden Variante, zeigt nur geringe Vorteile des Rahmensystems. Im Stahlbau muss aufgrund des energieintensiven Herstellungsprozesses auf Leichtbau geachtet werden, um die Amortisationszeiten deutlich zu reduzieren. Hier können Seilkonstruktionen durch den zusätzlichen Vorteil der Stützenfreiheit in der Parkfläche eine wichtige zukünftige Rolle spielen. Die Betrachtung wurde für einen Versuchsparkplatz durchgeführt. Bei größeren Stütz- und Spannweiten verstärken sich die Unterschiede sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen Systeme. Beachtet werden muss, dass die berechneten Amortisationszeiten für die Tragstrukturen und die Gesamtanlage inkl. der PV-Anlage berechnet wurden. Die Daten für die Produktion der Photovoltaikanlagen müssen bei einer Gesamtanlagenrechnung mitberücksichtigt werden.

Zur im Abschnitt 1 Einleitung auf der Seite 1 angeführten Fragestellung zur möglichen Amortisationsmöglichkeit und -dauer von Tragkonzepten für Photovoltaikanlagen über Parkflächen kann die Aussage getroffen werden, dass alle Tragkonzepte nach ökologischen Aspekten durchführbar sind. Die Amortisationsdauer für Energie dauert länger als für CO₂-Äquivalente. Dadurch ist die energetische Betrachtung entscheidend. Beachtet werden muss, dass die Berechnungen einige Limitationen zugrunde liegen. Parkplatzgröße und Stützweiten bestimmen die Trägerquerschnitte, was den Energiebedarf und CO₂-Ausstoß wesentlich beeinflusst. Bei größeren Stützweiten haben Seilkonstruktionen sowie unterspannte Rahmentragwerke durch das vergleichsweise geringe Verhältnis von Querschnitt zu Stützenabstand wesentliche Vorteile.

Neben der ökologischen Betrachtung muss bei der Auswahl der Tragkonstruktion auch der Einfluss auf die Verkehrsfläche berücksichtigt werden. Rahmenkonzepte erfordern zusätzliche Stützen innerhalb der Parkflächen. Diese zusätzlichen Stützen können die Bewegungsfreiheit der Verkehrsteilnehmer einschränken und erhöhen das Risiko von Schäden durch Anprall von Fahrzeugen. Zudem ist es erforderlich, bei bestehenden Parkflächen die Asphaltdecke im Bereich der zusätzlichen Stützen zu entfernen, um die Fundamente zu integrieren, was zusätzliche Kosten und Aufwand verursacht. Im Gegensatz dazu können Systeme mit eingespannten Stützen und Kragträgern zwischen zwei gegenüberliegenden Parkplätzen installiert werden. Diese Systeme haben einen geringeren Einfluss auf die Verkehrsfläche, da die Stützen in einem Bereich positioniert werden, der oft durch einen Grünstreifen zur Regenwasserversickerung ergänzt wird. Dieser Grünstreifen erleichtert die Integration der Stützen und Fundamente, da weniger bauliche Anpassungen an der Asphaltdecke erforderlich sind.

Die Ergebnisse der Umweltbilanzierung lassen sich auch auf höherwertige Verkehrsflächen wie Straßen, Autobahnen und Schienentrassen anwenden. Dabei müssen jedoch erhöhte Anforderungen und Belastungen aus den verkehrsinduzierten Windbelastungen berücksichtigt werden. Besonders Leichtbaukonstruktionen wie unterspannte Träger und Seilkonstruktionen sind aufgrund des geringen Eigengewichts anfällig für dynamische Belastungen. Die Umweltbilanzierung ist auch auf andere Länder übertragbar. Für andere Länder müssen sowohl die Nachweisführung als auch die Standortdaten bei der Energieertragsrechnung angepasst werden, was einen wesentlichen Einfluss auf die Amortisationszeiten hat.

Ergebnisse der Umweltbilanzierung von Photovoltaiküberdachungen im niederrangigen Verkehrssektor zeigen deutlich, dass sowohl massive als auch leichte Konstruktionen aus Holz und Stahl innerhalb der Lebensdauer einer Photovoltaikanlage amortisiert werden. Holzkonstruktionen sowie Leichtbaustahlkonstruktionen sind jedoch nach ökologischen Standpunkten zu bevorzugen. Für Entscheidungsträger aus Politik und Wirtschaft bedeutet dies, dass Flächen von niederrangigen Verkehrsflächen in den Fokus rücken, um die Ziele bei der Energieträgerumstellung bewerkstelligen zu können.

Beruhend auf den Ergebnissen dieser Arbeit können ergänzend Energie- und CO₂-Äquivalentbilanzierungen von höherrangigen Straßen für die unterschiedlichen Tragkonzepte durchgeführt werden. Dadurch können die erhöhten Anforderungen und Belastungen aus den verkehrsinduzierten Schwingungen aufgezeigt werden. Ebenso kann eine

wirtschaftliche Betrachtung der jeweiligen Tragkonzepte aufgestellt werden, um etwaige Zielkonflikte aus Ökologie und Ökonomie aufzuzeigen. Für eine umfassende wirtschaftliche Betrachtung der Tragsysteme ist es erforderlich, die Detailtiefe der Nachweisführung zu erhöhen. Besonders die Ausgestaltung von Anschlüssen und Auflagersituationen hat erheblichen Einfluss auf die Kosten der Tragsysteme. Montagestöße, die spezifische Verbindungen und Übergänge betreffen, wirken sich direkt auf die Fertigungszeit aus und können die Kosten erheblich beeinflussen. Darüber hinaus haben auch Aspekte der Vorfertigung und Baustellenmontage einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten. Eine detaillierte Analyse dieser Faktoren ist daher entscheidend für eine präzise Kostenbewertung.

5 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Erklärung
bzw.	beziehungsweise
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
D-A-CH Raum	Deutschland, Österreich und Schweiz
PV	Photovoltaik
inkl.	inklusive
vgl.	vergleiche

6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Bruttoinlandsverbrauch im Vergleich - Anteile der Energieträger in Österreich und EU-27 in Prozent (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) 2023, S. 12)	5
Abb. 2: schematischer Aufbau des Photovoltaikeffekts (Watter 2022, S. 20).....	7
Abb. 3: Bestandteile einer Photovoltaikanlage (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 62).....	11
Abb. 4: Systemkonzepte für beweglich installierte Photovoltaikpaneele (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 70)	14
Abb. 5: Energiespeichersystem deren Speicherkapazität und -dauer (Watter 2022, S. 398)...	15
Abb. 6: Auswirkungen der Atmosphäre auf die Energiebilanz der Erde (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 18)	16
Abb. 7: Aufteilung der Direkt- und Diffusstrahlung in Deutschland (Wesselak und Voswinckel 2012, S. 23)	17
Abb. 8: Sonnenbahn für den 1. Januar und 1. Juli (Watter 2022, S. 13).....	18
Abb. 9: Energieertrag einer nach Süden ausgerichteten Photovoltaikanlage mit 30° und 60° (pvaustria 2024, online).....	18
Abb. 10: Vergleich des Energieertrags einer Süd und Ost/West ausgerichteten Photovoltaikanlage (pvaustria 2024, online).....	19
Abb. 11: Energieverluste von Photovoltaikanlagen (Watter 2022, S. 27)	20
Abb. 12: Preisentwicklung für Photovoltaikmodule (Wirth, S. 8).....	23
Abb. 13: Anwohnerzustimmung für erneuerbare Energiegewinnung unmittelbar in der Nähe zu Ihren Wohnort (Wirth, S. 37)	25
Abb. 14: aufgeständerte und integrierte Photovoltaikanlagen an Gebäuden (Wirth, S. 34)	26
Abb. 15: Potenziale der Photovoltaik an Gebäuden in Österreich in TWh bis zu Jahr 2030 (Fechner 2020, S. 27)	28
Abb. 16: Funktionsprinzip der bifazialen Photovoltaikmodule (Technische Plattform Photovoltaik 2022, S. 2).....	29
Abb. 17: Montagearten von Photovoltaik an Lärmschutzwänden (Technische Plattform Photovoltaik 2022, S. 2).....	29
Abb. 18: Kumulierter Cashflow bei einer demonstrativen Photovoltaiküberdachung auf hochrangigen Straßen mit unterschiedlichen Strom Bezugstarifen (Haider et al. 2021, S. 183)	31
Abb. 19: Strompreis für die Industrie in Österreich von 2013 bis 2023 (Pawlik 2024)	32

Abb. 20: statische Systeme von Rahmentragwerken (Rybicki und Prietz 2021, S. 226–227)	37
Abb. 21: statisches System eines Fachwerks (Dinkler 2022, S. 74)	37
Abb. 22: statisches System eines Bogentragwerks (Dinkler 2022, S. 104)	38
Abb. 23: statisches System eines Seiltragwerks (Dinkler 2022, S. 106)	38
Abb. 24: Hörmann Überdachungsvarianten für Parkflächen (Hörmann GmbH & Co. KG, online)	42
Abb. 25: Hörmann Komplettüberdachung einer Parkflächen (Hörmann GmbH & Co. KG, online)	43
Abb. 26: Rendering einer Carportüberdachung inkl. Photovoltaik des Unternehmens 6B Ark GmbH (6B Ark GmbH, online)	43
Abb. 27: Parkplatzphotovoltaik der Firma SOPAGO GmbH (SOPAGO GmbH, online)	44
Abb. 28: Seiltragkonstruktion mit Photovoltaik von Park-Solar (PARK-SOLAR GmbH, online)	44
Abb. 29: Photovoltaikfaltdach von dhp technology AG (dhp technology AG, online)	45
Abb. 30: Parkfläche für Umweltbilanzierung mit Abmessungen in cm	47
Abb. 31: charakteristische Beiwerte für vertikale Flächen zum Gleis durch vorbeifahrende Züge (ÖNORM EN 1991-2, S. 113)	48
Abb. 32: Konzeptdarstellung - auskragende massive Stahlkonstruktion - Maße in [m] – 0° Dachneigung	54
Abb. 33: Konzeptdarstellung - auskragende massive Stahlkonstruktion - Maße in [m] – 10° Dachneigung mit Ost-West-Ausrichtung	55
Abb. 34: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – auskragende massive Stahlkonstruktion	56
Abb. 35: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. L/200) – auskragende massive Stahlkonstruktion	56
Abb. 36: Konzeptdarstellung - auskragende massive Holzkonstruktion - Maße in [m] – 0° Dachneigung	57
Abb. 37: Konzeptdarstellung - auskragende massive Holzkonstruktion - Maße in [m] – 10° Dachneigung mit Ost-West-Ausrichtung	58
Abb. 38: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – auskragende massive Holzkonstruktion	59
Abb. 39: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. L/200) – auskragende massive Holzkonstruktion	60

Abb. 40: Konzeptdarstellung – Stahlrahmen mit Aussteifungsverband - Maße in [m] – 0° Dachneigung	61
Abb. 41: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – Stahlrahmen mit Aussteifungsverband.....	62
Abb. 42: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. L/200) – Stahlrahmen mit Aussteifungsverband.....	63
Abb. 43: Konzeptdarstellung – Holzrahmen mit Aussteifungsverband - Maße in [m] – 0° Dachneigung	64
Abb. 44: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – Holzrahmen mit Aussteifungsverband	65
Abb. 45: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. L/200) – Holzrahmen mit Aussteifungsverband	66
Abb. 46: Konzeptdarstellung – unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband - Maße in [m] – 0° Dachneigung	67
Abb. 47: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband.....	68
Abb. 48: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. L/200) – unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband.....	68
Abb. 49: Konzeptdarstellung – abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben - Maße in [m] – 0° Dachneigung	69
Abb. 50: Ausnutzungsgrad (1,0 = 100%) für die Querschnitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit – abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben.....	71
Abb. 51: Systemverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (max. L/200) – abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben	72
Abb. 52: Energieertragsprognose durch die Photovoltaikanlagen bezogen auf die Modulausrichtung.....	78
Abb. 53: Ertragsprognose im Jahre – 10° Modulneigung Ost-West Ausrichtung	79
Abb. 54: Ertragsprognose im Jahre – 10° Modulneigung Süd Ausrichtung	79
Abb. 55: Ertragsprognose im Jahre – 0° Modulneigung.....	80
Abb. 56: Bilanzierung Energie – 10° Ost-West-Ausrichtung	82
Abb. 57: Bilanzierung Energie – 10° Süd-Ausrichtung	83
Abb. 58: Bilanzierung Energie – 0° horizontal	84

Abb. 59: Vermeidungsprognose von CO ₂ -Äquivalenten durch die Photovoltaikanlagen, abzüglich der auf die Lebensdauer gerechneten Emissionen bei der Herstellung der PV-Anlage, bezogen auf die Modulausrichtung in Folge der Energiegewinnung	88
Abb. 60: Bilanzierung CO ₂ -Äquivalent der Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage – 10° Ost-West-Ausrichtung.....	90
Abb. 61: Bilanzierung CO ₂ -Äquivalent der Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage – 10° Süd-Ausrichtung	91
Abb. 62: Bilanzierung CO ₂ -Äquivalent der Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage – 0° horizontal	92
Abb. 63: Nutzbare Nettoenergie über die Lebensdauer von 25 Jahren – Berücksichtigung Tragkonstruktion inkl. PV-Anlage	94
Abb. 65: Netto CO ₂ -Äquivalent Einsparung über die Lebensdauer von 25 Jahren.....	97

7 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Mindestwerte für Parkplätze und Fahrbahngassen (Österreichisches Institut für Bautechnik 2023, S. 7)	46
Tabelle 2: Windbeiwerte für freistehende Dächer (ÖNORM EN 1991-1-4, S. 58).....	49
Tabelle 3: Anprallkräfte aus dem Straßenverkehr für Stützkonstruktionen (ÖNORM EN 1991-1-7, S. 21)	50
Tabelle 4: Stückliste Tragwerk und Fundament – auskragende massive Stahlkonstruktion ...	55
Tabelle 5: Stückliste Tragwerk und Fundament – auskragende massive Holzkonstruktion....	58
Tabelle 6: Stückliste Tragwerk und Fundament – Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	61
Tabelle 7: Stückliste Tragwerk und Fundament – Holzrahmen mit Aussteifungsverband.....	64
Tabelle 8: Stückliste Tragwerk und Fundament – unterspannter Stahlrahmen mit Aussteifungsverband	67
Tabelle 9: Stückliste Tragwerk und Fundament – abgespannte Seilkonstruktion auf Druckstäben.....	70
Tabelle 10: Zusammenfassung der Massen der Tragkonzepte	72
Tabelle 11: PENRT - Nicht erneuerbare Primärenergie - der verwendeten Baumaterialien ...	75
Tabelle 12: Energieaufwand der Tragkonzepte ohne PV-Anlage.....	76
Tabelle 13: Eingabedaten der Photovoltaikanlage in PV*SOL zur Ertragsprognoserechnung	77
Tabelle 14: Gesamte Energieertrag über die Lebensdauer der Photovoltaikanlagen.....	77
Tabelle 15: PV-Ertrag der Photovoltaikanlage – 10° Modulneigung Ost-West Ausrichtung .	78
Tabelle 16: PV-Ertrag der Photovoltaikanlage – 10° Modulneigung Süd Ausrichtung	79
Tabelle 17: PV-Ertrag der Photovoltaikanlage – 0° Modulneigung	80
Tabelle 18: Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion - 10° Ost-West Ausrichtung	82
Tabelle 19: Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion - 10° Süd Ausrichtung	83
Tabelle 20: Energieamortisationsdauer Tragkonstruktion – 0° horizontal	84
Tabelle 21: CO ₂ -Faktoren der Materialien (baubook GmbH)	86
Tabelle 22: CO ₂ -Äquivalent Emissionen der Tragkonzepte ohne PV-Anlage	87
Tabelle 23: Vermiedene CO ₂ -Äquivalent Emissionen durch die Photovoltaikanlage abzüglich der auf die Lebensdauer gerechneten Emissionen bei der Herstellung der PV-Anlage.....	87
Tabelle 24: CO ₂ -Äquivalent Amortisationsdauer Tragkonstruktion - 10° Ost-West Ausrichtung	90
Tabelle 25: CO ₂ -Äquivalent Amortisationsdauer Tragkonstruktion - 10° Süd Ausrichtung...	91
Tabelle 26: CO ₂ -Äquivalent Amortisationsdauer Tragkonstruktion – 0° horizontal.....	92

Tabelle 27: prozentualer Anteil der Energie zur Erzeugung der Tragstruktur und der PV-Anlage zu den Erträgen aus der PV-Anlage über die Lebensdauer	94
Tabelle 28: prozentualer Anteil der CO ₂ -Äquivalent-Emissionen zur Erzeugung der Tragstruktur inkl. der Photovoltaikanlage zu den Einsparungen durch PV-Anlage über die Lebensdauer	97

8 LITERATURVERZEICHNIS

6B Ark GmbH: Carport mit Photovoltaik-Dach. Online verfügbar unter <https://www.arkport.at/>, zuletzt geprüft am 11.08.2024.

baubook GmbH (Hg.): PENRT - Nicht erneuerbare Primärenergie - total. Online verfügbar unter https://www.baubook.at/m/PHP/Fragezeichen.php?S_oe kz_Typ=1&SW=35&SKg=2, zuletzt geprüft am 29.08.2024.

baubook GmbH (Hg.) (2019): IBO-Richtwerte - Normalbeton C25/30 2400 kg/m³. Online verfügbar unter <https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142743262&SG=2142732004&SKg=2&SW=35>, zuletzt geprüft am 29.08.2024.

baubook GmbH (Hg.) (2020a): IBO-Richtwerte - Brettschichtholz, verleimt Aussenanwendung 475 kg/m³. Online verfügbar unter <https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142742823&SG=2142715634&SKg=2&SW=35>, zuletzt geprüft am 29.08.2024.

baubook GmbH (Hg.) (2020b): IBO-Richtwerte - Stahl. Online verfügbar unter <https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142742606&SG=2142715197&SKg=2&SW=35>, zuletzt geprüft am 29.08.2024.

baubook GmbH (Hg.) (2022): IBO-Richtwerte - Stahl verzinkt. Online verfügbar unter <https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142743426&SG=2142732323&SKg=2&SW=35>, zuletzt geprüft am 29.08.2024.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (Hg.) (2023): Energie in Österreich 2023 - Zahlen, Daten, Fakten. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:da4e9dfd-f51c-44b8-894c-9b049a8336cb/BMK_Energie_in_OE2023_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.) (2024): Bedeutung von Speichern für die Energiewende. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/Energiespeicher/speicher-fuer-die-energie-wende.html>, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

Crastan, Valentin; Höckel, Michael (2022): Energiewirtschaft und Klimaschutz, Elektrizitätswirtschaft und Liberalisierung, Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicherung. 5., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (2). ISBN 9783662651049. DOI: 10.1007/978-3-662-65105-6.

dhp technology AG: Das Solarfaltdach HORIZON - weltweit einzigartig und mehrfach ausgezeichnet. Online verfügbar unter <https://www.dhp-technology.ch/produkt-solarfaltdach-horizon>, zuletzt geprüft am 11.08.2024.

Dinkler, Dieter (2022): Grundlagen der Baustatik. Modelle und Berechnungsmethoden für ebene Stabtragwerke. 6. Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch). 9783658392642.

DSI Underground Austria GmbH (Hg.): DYWI-Drill-Mikropfahl - Typenblatt zur Zulassung (BMVIT-327.120/0011-IV/IVVS2/2017). Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:0209b7b5-af57-4e7e-9f25-02c7e487179d/DYWI-Drill-Mikropfahl.pdf&ved=2ahUKEwj7vb_b7YmIAxXNS_EDHRldGZ0QFnoECBUQAQ&usq=AOvVaw1AkgN2UtWPQVBKwMq5C3Qf, zuletzt geprüft am 23.08.2024.

ÖNORM B 1991-1-3, 15.05.2022: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelast.

ÖNORM B 1991-1-4, 01.04.2023: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.

ÖNORM EN 1991-1-4, 15.05.2011: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.

ÖNORM EN 1991-1-7, 01.09.2014: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-7: Außergewöhnliche Einwirkungen.

ÖNORM EN 1991-2, 01.03.2012: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.

ÖNORM B 1993: Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten.

ÖNORM B 1995: Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten.

Europäisches Parlament (Hg.) (2023): Was versteht man unter Klimaneutralität und wie kann diese bis 2050 erreicht werden? europa.eu. Online verfügbar unter <https://www.europa.eu/topics/de/article/20190926STO62270/was-versteht-man-unter-klimaneutralitaet>, zuletzt geprüft am 05.07.2024.

Fechner, Hubert (2020): Ermittlung des Flächenpotentials für den Photovoltaik-Ausbau in Österreich: Welche Flächenkategorien sind für die Erschließung von besonderer Bedeutung, um das Ökostromziel realisieren zu können. mit Fokus auf bis 2030 realisierbare PV-Potentiale im Gebäudesektor und technische Potentiale auf anderen Flächen. Hg. v. Österreichs E-Wirtschaft. Online verfügbar unter https://oesterreichsenergie.at/fileadmin/user_upload/Oesterreichs_Energie/Publikationsdatenbank/Studien/2020/PV-Studie_2020.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

Forster, Jacob: PVwins – Entwicklung von wandintegrierten PV-Elementen für den Lärmschutz. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pvwins.html>, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

Fraunhofer ISE, PSE Projects GmbH (2024): Photovoltaics Report. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with the support of PSE Projects GmbH. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

Haider, Manfred; Prammer, Dominik; Vorwagner, Alois; Mayr, Christoph; Rennhofer, Marcus; Berger, Karl A. et al. (2021): PV-Straßenüberdachung - Konzept PV-SÜD-K. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und AIT Austrian Institution of Technology GmbH (AIT). online. Online verfügbar unter <https://projekte.ffg.at/projekt/3725909>, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Heinrich, Martin: Photovoltaik in Verkehrswegen. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/verkehrswege-photovoltaik-ripv.html>, zuletzt geprüft am 02.08.2024.

Heinrich, Martin (2024): Integrierte Photovoltaik - Verkehrsflächen produzieren Solarenergie. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (08-282-21).

Hengstler, Jasmin; Russ, Manfred; Stoffregen, Alexander; Hendrich, Aline; Weidner, Simone (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. 35. Aufl. ISSN 1862-4359. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

HORA: HORA - Schnee und Windzonen Karte. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.hora.gv.at>, zuletzt geprüft am 13.08.2024.

Hörmann GmbH & Co. KG: Parkplatzüberdachung. Online verfügbar unter <https://www.hoermann-info.de/photovoltaik/parkplatzueberdachung>, zuletzt geprüft am 11.08.2024.

J.D. Huyeng; J. Forster; F. Basler; P. Romer; A.J. Beinert; C. Schill et al. (2022): Technical Aspects for Road Integrated Photovoltaics Towards a More Sustainable Mobility Sector. Unter Mitarbeit von Fraunhofer-Gesellschaft. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (DOI 10.24406/publica-1532). Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/3099dcba-d880-453f-9df6-76ea743f0142/details>, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

Jahnke, Georg (2023): Grundlagen der Tragwerksplanung. Von der Entwurfsidee über das Tragsystem zum Tragwerk. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg (erfolgreich studieren). 9783658381646.

Kurwan, Jenny; Tönjes Annika (2023): Energiesektor als Schlüssel zur Klimaneutralität. Hg. v. Bundeszentrale für politische Bildung. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/themen/klimawandel/dossier-klimawandel/509873/energiesektor-als-schluessel-zur-klimaneutralitaet/#node-content-title-1>, zuletzt geprüft am 05.07.2024.

Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven (2023): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2022. 49. Aufl. Hg. v. Umweltbundesamt Deutschland. online. Online verfügbar unter

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2022>, zuletzt geprüft am 01.09.2024.

Neumüller, Anna; Geier, Stefan; Österreicher, Doris: Life Cycle Assessment for Photovoltaic Structures—Comparative Study of Rooftop and Free-Field PV Applications (18).

Ökologischer Betriebsberatung; O.Ö. Energiesparverband; Wirtschaftskammer OÖ (Hg.) (1997): Energiekennzahlen und Sparpotenziale in der Sägeindustrie. Online verfügbar unter https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.win.steiermark.at/cms/dokumente/11263987_52485981/2ce6f554/Kennzahlen_%2520Energie_Reduktionsmassnahmen_%2520S%25C3%25A4gewerk.pdf&ved=2ahUKEwixNK1iZGIAxX5RfEDHcMhM2AQFnoECB8QAQ&usg=AOvVaw39LmCRPIbwx25YKx_wm6jk, zuletzt geprüft am 25.08.2024.

Österreichisches Institut für Bautechnik (Hg.) (2023): OIB-Richtlinie 4 - Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit (OIB-330.4-026/23).

Österreichs E-Wirtschaft (Hg.) (2022): Österreichs Weg in eine klimaneutrale Energiezukunft. Online verfügbar unter https://oesterreichsenergie.at/fileadmin/user_upload/Oesterreichs_Energie/Publikationsdatenbank/Diverses/2022/Stromstrategie_2040_29092022.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

PARK-SOLAR GmbH: Park-Solar Das Parkplatzdach als Solarkraftwerk. Online verfügbar unter <https://park-solar.com/>, zuletzt geprüft am 11.08.2024.

Pawlik, V. (2024): Strompreis für die Industrie in Österreich von 2013 bis 2023 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde). Hg. v. Eurostat. Statista. Online verfügbar unter <https://de-statista-com.fhooe.idm.oclc.org/statistik/daten/studie/287849/umfrage/strompreise-fuer-industrielle-verbraucher-in-oesterreich/>, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

pvaustria (Hg.) (2024): Arten und Ausrichtung der PV-Anlage. Online verfügbar unter <https://pvaustria.at/pv-ausrichtung/>, zuletzt geprüft am 18.07.2024.

Rybicki, Rudolf; Prietz, Frank (2021): Faustformeln und Faustwerte für Tragwerke im Hochbau. 6., aktualisierte Auflage. Köln: Reguvis Fachmedien GmbH. 978-3-8462-1095-6.

SOPAGO GmbH: Solar Carport & PV Parkplätze. Online verfügbar unter <https://sopago.org/produkte/>, zuletzt geprüft am 11.08.2024.

Stan, Cornel (2024): Klimagerechte Energieszenarien der Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 978-3-662-68857-1. DOI: 10.1007/978-3-662-68858-8.

statista (Hg.): Flächenverbrauch von Straßen- und Schienenverkehrsanlagen in Österreich in den Jahren 1990 und 2019. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1253626/umfrage/flaechenverbrauch-von-verkehrsinfrastruktur-in-oesterreich/>, zuletzt geprüft am 02.08.2024.

Technische Plattform Photovoltaik (Hg.) (2022): Factsheet Photovoltaik. Photovoltaik auf Lärmschutz - Wie kann das funktionieren? Unter Mitarbeit von Rosa Pajkanovic. Online verfügbar unter <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://tppv.at/wp-content/uploads/2024/06/FACSTH1.pdf&ved=2ahUKEwjEsNjfuKSIAxVRB9sEHaa3L98QFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2kbc2xoRP18wonPk79-Hfu>, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

Umweltbundesamt Deutschland (Hg.) (2024): Photovoltaik. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik#Funktion>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

ÖNORM EN ISO 14044, 01.03.2021: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.

ÖNORM EN ISO 14040, 01.03.2021: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.

Umweltverband WWF Österreich (Hg.) (2021): WWF-Positionspapier zum Ausbau der Photovoltaik. Online verfügbar unter <https://www.wwf.at/files/downloads/wwf-pv-position-1.pdf&ved=2ahUKEwiyxNKozJeHAXudBNsEHYFpDbcQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw1afaQG58Pk9m4RFcP4wqD3>, zuletzt geprüft am 02.09.2024.

Watter, Holger (2022): Regenerative Energiesysteme. Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme. 6. Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch). 9783658358679. DOI: 10.1007/978-3-658-35868-6.

Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian (2012): Photovoltaik. Wie Sonne zu Strom wird. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Technik im Fokus Daten Fakten Hintergründe). 9783642242960. DOI: 10.1007/978-3-642-24297-7.

Wirth, Harry: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 03.04.2024. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. online. Online verfügbar unter www.pv-fakten.de, zuletzt geprüft am 08.07.2024.

Wohlfahrt, Dirk: Mit Nachführsystemen zu höheren Photovoltaik-Erträgen. Hg. v. ihks-fachjournal. Online verfügbar unter <https://www.ihks-fachjournal.de/mit-nachfuehrsystemen-zu-hoeheren-photovoltaik-ertraegen/>, zuletzt geprüft am 18.07.2024.

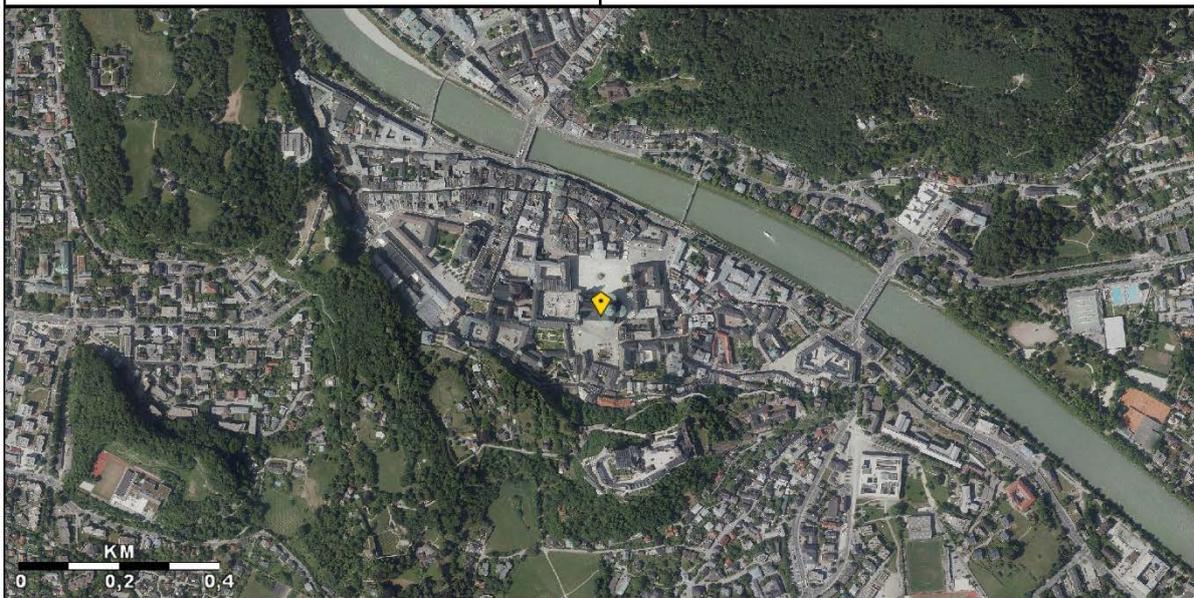
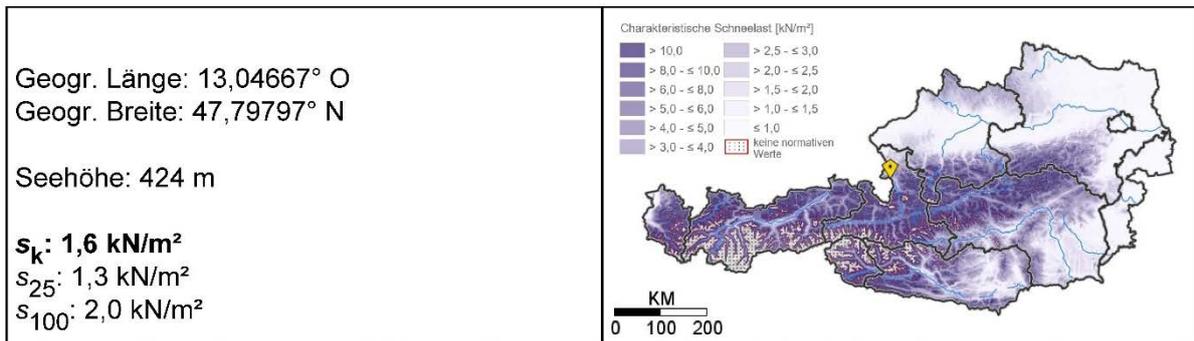
9 ANHANG

9.1 ANHANG A – SCHNEE UND WIND BELASTUNGEN FÜR DEN STANDORT SALZBURG

HORA NATURAL HAZARD OVERVIEW & RISK ASSESSMENT AUSTRIA

 Bundesministerium
Land- und Forstwirtschaft,
Regionen und Wasserwirtschaft

Charakteristische Schneelast am Boden s_k (50-jährlich) sowie 25- und 100-jährliche Schneelast (s_{25} und s_{100})



Quellenangabe:
Verwaltungsdaten, DGM: BEV
Gewässer, DHM, DOP: BML
Schneelast: ÖNORM B 1991-1-3:2022-05

Maßgeblich für die Berechnung der charakteristischen Schneelast am Boden ist die Schneelastkarte gemäß ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 in Anhang B. Die dieser Abfrage zugrunde liegende Online-Version der Karte unter <https://hora.gv.at> wurde mit dem Austria Standards International akkordiert.

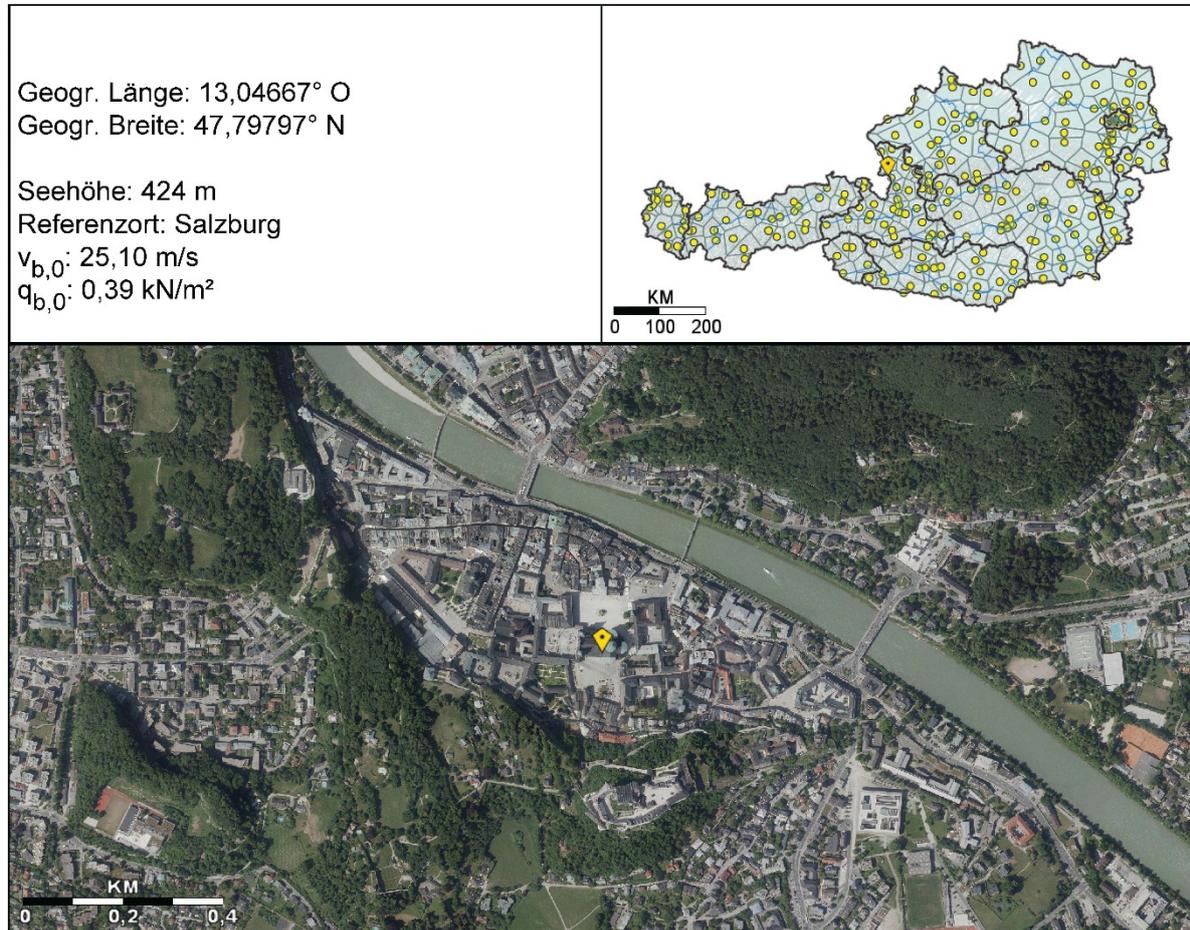
Oberhalb von 2000 Metern Seehöhe gibt es gemäß ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 keine normativen Werte. Für höher liegende Standorte können Details bei den in ÖNORM B 1991-1-3:2022-05, Abschnitt 5.1 genannten Instituten eingeholt werden.

Das der Berechnung zugrunde liegende Höhenmodell der österreichischen Bundesländer hat eine Auflösung von 50 m (horizontal) und 0,1 m (vertikal). Die Werte für s_k , s_{25} und s_{100} wurden auf eine Nachkommastellen gerundet.

Geprüft durch: _____, am _____

Unterschrift: _____

Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$


Quellenangabe:

Verwaltungsdaten: BEV

Gewässer, DGM, DHM, DOP: BML

Basiswindgeschwindigkeit: ÖNORM B 1991-1-4 und ÖNORM EN 1991-1-4

Der Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit ($v_{b,0}$) ist definiert für eine Höhe von 10 m über Grund für freies offenes Gelände der Geländekategorie II und entspricht den Vorgaben gemäß ÖNORM B 1991-1-4 und ÖNORM EN 1991-1-4 in der aktuellen Fassung sowie dem Ortsverzeichnis der ÖNORM B 1991-1-4:2019, Anhang A. Liegt die Seehöhe des Standortes mehr als 250 m über jener des in der ÖNORM B 1991-1-4:2019, Tabelle A.1 angegebenen nächstliegenden Ortes, so sind die Werte nach ÖNORM B 1991-1-4:2019, Tabelle A.2 anzunehmen, falls nicht ein diesbezügliches Windgutachten einer der unter ÖNORM B 1991-1-4:2019, Abschnitt 6.2.2 genannten Instituten vorliegt. Der korrespondierende Grundwert des Basisgeschwindigkeitsdrucks ($q_{b,0}$) entspricht dem Ortsverzeichnis der ÖNORM B 1991-1-4:2019, Anhang A bzw. wurde gemäß ÖNORM B 1991-1-4, Formel (1) berechnet. Die Abminderungsfaktoren f_s für Basisgeschwindigkeitsdrücke gemäß ÖNORM B 1991-1-4, Tabelle 3 wurden nicht berücksichtigt. Standorte mit relativen Seehöhen bis 250 m oberhalb des nächstgelegenen Ortes und unterhalb von 800 m absoluter Seehöhe können auch in windexponierten Lagen liegen. Dieser Umstand ist nach Bedarf bei der Berechnung von Windlasten zu berücksichtigen. Die dieser Abfrage zugrunde liegende Online-Version der Karte wurde mit dem Austria Standards International akkordiert, die Angabe obiger Werte erfolgt jedoch ohne Gewähr. Das der Berechnung zugrunde liegende Höhenmodell der österreichischen Bundesländer hat eine Auflösung von 1 m (horizontal) und 0,1 m (vertikal). Die Werte für $v_{b,0}$ und $q_{b,0}$ wurden auf eine bzw. zwei Nachkommastellen gerundet.

Geprüft durch: _____, am _____

Unterschrift: _____

9.2 ANHANG B – VOLLSTÄNDIGE NACHWEISFÜHRUNG UND BERECHNUNG DER TRAGSTRUKTUREN

Das Ausdruckprotokoll der Nachweisführung der einzelnen Tragsysteme wird aufgrund der umfangreichen Berechnung als digitaler Anhang ausgeführt. Die Daten können unter den E-Adressen stefan.jaksch@fh-wels.at oder s.ueblacker@gmx.at angefordert werden.

9.3 ANHANG C – IBO-RICHTWERTE (ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR BAUBIOLOGIE UND -ÖKOLOGIE)

Stahl verzinkt

Link zu dieser Seite:

<https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142743426&SG=2142732323&SKg=2&SW=35>

Zuletzt geändert:

baubook-Richtwert: 14. 7. 2023

Bauphysikalische Kennwerte: 21. 3. 2013

Bauökologische Kennwerte: 24. 1. 2022

- 📁 Bauprodukte
 - Metalle
 - Montagezubehör / Einzelbaustoffe
 - 📁 Haustechnik
 - 📁 Verteilsysteme
 - Rohrmaterialien
- **IBO-Richtwerte 2020** (diese Seite)
 ● [IBO-Richtwerte 2012](#)

Kennwerte

📁 Bauphysikalische Kennwerte

Kennwert	Richtw.	Einheit	Quelle
ρ	7.800	kg/m ³	*
λ_r			
Defaultwert	50,000	W/mK	*
Möglicher Wert		W/mK	
c	450	J/kgK	*

📁 Bauökologische Kennwerte: Hintergrunddatenbank Ecoinvent A1

Indikator	Richtw.	Einheit
Kernindikatoren für die Umweltwirkung		
GWP-fossil Globales Erwärmungspotenzial - fossil	2,43	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-biogenic Globales Erwärmungspotenzial - biogen	0	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-total Globales Erwärmungspotenzial - total	2,43	kg CO ₂ Äq./kg
ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	0,00000127	kg CFC-11 Äq./kg
AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,0115	kg SO ₂ Äq./kg
EP Eutrophierungspotenzial	0,00581	kg PO ₄ ³⁻ Äq./kg
POCP Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	0,00199	kg C ₂ H ₄ Äq./kg
Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		
PERE Erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	1,35	MJ/kg
PERM Erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PERT Erneuerbare Primärenergie - total	1,35	MJ/kg
PENRE Nicht erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	34,5	MJ/kg
PENRM Nicht erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PENRT Nicht erneuerbare Primärenergie - total	34,5	MJ/kg

📁 Beschreibung des Richtwerts

Quelle: ONORM 8110-7 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte



Tabelle 86 - Metalle - Zeile: 7

Stahl

Link zu dieser Seite:

<https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142742606&SG=2142715197&SKg=2&SW=35>

Zuletzt geändert:

baubook-Richtwert: 28. 8. 2013

Bauphysikalische Kennwerte: 21. 3. 2013

Bauökologische Kennwerte: 19. 2. 2020

Bauprodukte

- Metalle
- Montagezubehör / Einzelbaustoffe

• **IBO-Richtwerte 2020** (diese Seite)

• [IBO-Richtwerte 2012](#)

Kennwerte

Bauphysikalische Kennwerte

Kennwert	Richtw.	Einheit	Quelle
ρ	7.800	kg/m ³	*
λ_{γ}			
Defaultwert	50,000	W/mK	*
Möglicher Wert		W/mK	
c	450	J/kgK	*

Bauökologische Kennwerte: Hintergrunddatenbank Ecoinvent A1

Indikator	Richtw.	Einheit
Kernindikatoren für die Umweltwirkung		
GWP-fossil Globales Erwärmungspotenzial - fossil	1,45	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-biogenic Globales Erwärmungspotenzial - biogen	-0,006	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-total Globales Erwärmungspotenzial - total	1,44	kg CO ₂ Äq./kg
ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	0,00000006	kg CFC-11 Äq./kg
AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,00509	kg SO ₂ Äq./kg
EP Eutrophierungspotenzial	0,00318	kg PO ₄ ³⁻ Äq./kg
POCP Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	0,00114	kg C ₂ H ₄ Äq./kg
Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		
PERE Erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	0,560	MJ/kg
PERM Erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PERT Erneuerbare Primärenergie - total	0,560	MJ/kg
PENRE Nicht erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	20,4	MJ/kg
PENRM Nicht erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PENRT Nicht erneuerbare Primärenergie - total	20,4	MJ/kg

Beschreibung des Richtwerts

Quelle: ONORM 8110-7 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte



Tabelle 86 - Metalle - Zeile: 7

baubook

[Seite drucken](#)

Normalbeton C25/30 ohne Bewehrung (2400 kg/m³)

Link zu dieser Seite:

<https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142743262&SG=2142732004&SKg=2&SW=35>

Zuletzt geändert:

baubook-Richtwert: 8. 4. 2019

Bauphysikalische Kennwerte: 21. 3. 2013

Bauökologische Kennwerte: 8. 2. 2018

Bauprodukte

- Ortbetone

- **IBO-Richtwerte 2020** (diese Seite)
- [IBO-Richtwerte 2012](#)

Einsatzbereich des Richtwertes

Die Bemessungswerte gelten sowohl für Ortbeton als auch für Beton-Fertigteile. Bei Leichtbetonen ist je nach Leicht-Zuschlagstoff zu unterscheiden.

Kennwerte

Bauphysikalische Kennwerte

Kennwert	Richtw.	Einheit	Quelle
ρ	2.400	kg/m ³	*
λ_r			
Defaultwert	2,000	W/mK	*
Möglicher Wert		W/mK	
μ			
trocken	130		*
feucht	80		*
c	1000	J/kgK	*

Bauökologische Kennwerte: Hintergrunddatenbank Ecoinvent A1

Indikator	Richtw.	Einheit
Kernindikatoren für die Umweltwirkung		
GWP-fossil Globales Erwärmungspotenzial - fossil	0,0987	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-biogenic Globales Erwärmungspotenzial - biogen	0	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-total Globales Erwärmungspotenzial - total	0,0987	kg CO ₂ Äq./kg
ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	0,000000023	kg CFC-11 Äq./kg
AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,000178	kg SO ₂ Äq./kg
EP Eutrophierungspotenzial	0,000118	kg PO ₄ ³⁻ Äq./kg
POCP Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	0,0000284	kg C ₂ H ₄ Äq./kg
Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		
PERE Erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	0,0397	MJ/kg
PERM Erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PERT Erneuerbare Primärenergie - total	0,0397	MJ/kg
PENRE Nicht erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	0,744	MJ/kg
PENRM Nicht erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PENRT Nicht erneuerbare Primärenergie - total	0,744	MJ/kg

Brettschichtholz, verleimt Aussenanwendung (475 kg/m³ - zb Fichte/Tanne)

Link zu dieser Seite:

<https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142742823&SG=2142715634&SKg=2&SW=35>**Zuletzt geändert:**

baubook-Richtwert: 27. 5. 2013

Bauphysikalische Kennwerte: 24. 5. 2013

Bauökologische Kennwerte: 19. 2. 2020

Bauprodukte**Holz und Holzwerkstoffe**

- Holz
- Holzwerkstoffplatten

- **IBO-Richtwerte 2020** (diese Seite)

- **IBO-Richtwerte 2012**

- **ökobaudat**

Einsatzbereich des Richtwertes

Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit ergibt sich aus dem Fraktile-Wert (50 %-Fraktile) der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten ($\lambda_{10, tr}$) multipliziert mit dem Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt F_m entsprechend ÖNORM B 6015-2:2009, Tabelle 2.

Kennwerte**Bauphysikalische Kennwerte**

Kennwert	Richtw.	Einheit	Quelle
ρ	475 kg/m ³		*
λ_r			
Defaultwert	0,120 W/mK		*
Möglicher Wert	W/mK		
μ			
trocken	50		*
feucht	20		*
c	1600 J/kgK		*

Bauökologische Kennwerte: Hintergrunddatenbank Ecoinvent A1

Indikator	Richtw.	Einheit
Kernindikatoren für die Umweltwirkung		
GWP-fossil Globales Erwärmungspotenzial - fossil	0,451	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-biogenic Globales Erwärmungspotenzial - biogen	-1,65	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-total Globales Erwärmungspotenzial - total	-1,20	kg CO ₂ Äq./kg
ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	0,0000000442	kg CFC-11 Äq./kg
AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,00257	kg SO ₂ Äq./kg
EP Eutrophierungspotenzial	0,00115	kg PO ₄ ³⁻ Äq./kg
POCP Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	0,000710	kg C ₂ H ₄ Äq./kg
Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		
PERE Erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	4,11	MJ/kg
PERM Erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	16,9	MJ/kg
PERT Erneuerbare Primärenergie - total	21,0	MJ/kg
PENRE Nicht erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	7,64	MJ/kg
Indikator		
PENRM Nicht erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0,436	MJ/kg
PENRT Nicht erneuerbare Primärenergie - total	8,07	MJ/kg

Beschreibung des Richtwerts

Quelle: ÖNORM 8110-7 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte

