



GUTACHTEN · BLENDWIRKUNG

Blendgutachten.

Untersuchung der Blendwirkung der geplanten Agri-Photovoltaik-Anlage im Projekt „Musterpark“.

MUSTERGUTACHTEN – anonymisiertes Beispielprojekt. Alle Projektdaten, Koordinaten und Ergebnisse sind fiktiv und dienen ausschließlich der Veranschaulichung von Aufbau, Methodik und Ergebnisdarstellung.

PROJEKT Agri-PV „Musterpark“

STANDORT 49.9259° N, 9.9769° E

VERFASSER Constantin Klyk

STAND MUSTER · Juli 2026

SOFTWARE ForgeSolar (SGHAT-Methodik)

ERSTELLT VON

Constantin Klyk

Agri-PV Consulting

Jörg-Zürn-Str. 22

88339 Bad Waldsee

Einleitung.

1.1 Ziel und Zweck

Ziel dieses Gutachtens ist es, die mögliche Blendwirkung einachsig nachgeführter Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) mit einer Nord-Süd-orientierten Achse für das Projekt „Musterpark“ zu analysieren.

Im Mittelpunkt steht die Fragestellung, ob durch reflektiertes Sonnenlicht von den Moduloberflächen relevante Blendwirkungen für Personen im Umfeld der Anlage entstehen können. Das Gutachten dient der allgemeinen technischen Absicherung des Planungs- und Genehmigungsverfahrens des Projekts. Es soll die Grundlage für die Einschätzung bieten, ob zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung oder Begrenzung von Blendwirkungen erforderlich sind.

1.2 Anlagenbeschreibung

PARAMETER	WERT
Projektname	Musterpark
Standort (Breitengrad)	49.925888° N
Standort (Längengrad)	9.976867° E
Anlagentyp	Einachsig nachgeführt mit Backtracking (shade)
Tracker-Achsenausrichtung	180°
Modulfläche (ca.)	30776 m²
GCR (Ground Coverage Ratio)	0.5
Modulmaterial	smoothWO
Anzahl Routen	1
Routen	Route 1

Tabelle 1 Anlagenparameter des Projekts „Musterpark“



Abbildung 1 Luftbild des PV-Anlagenstandorts

1.3 Umgebungsbeschreibung

Verkehrswege in der Nähe — Der Standort der geplanten Agri-Photovoltaikanlage „Musterpark“ liegt bei $49,925888^{\circ}$ N / $9,976867^{\circ}$ E in einer offenen, landwirtschaftlich geprägten Feldflur (fiktiver Musterstandort). Unmittelbar nördlich der Anlagenfläche verläuft eine Gemeindeverbindungsstraße in annähernd West-Ost-Richtung (Route 1: von $49,927273^{\circ}$ N / $9,973209^{\circ}$ E bis $49,927073^{\circ}$ N / $9,981674^{\circ}$ E), die die Anlage über rund 600 m passiert. Weitere klassifizierte Straßen von übergeordneter Bedeutung befinden sich nicht in unmittelbarer Nähe.

Bahnlinien und Gleisanlagen — Im direkten Umfeld des Standorts verlaufen keine Bahnlinien oder Gleisanlagen. Eine Untersuchung der Blendwirkung auf den Schienenverkehr ist daher nicht erforderlich.

Folgende Untersuchungsobjekte wurden untersucht — In der ForgeSolar-Simulation wurden als Verkehrsweg die nördlich verlaufende Straße (Route 1, Betrachtung beider Fahrtrichtungen) sowie vier Wohngebäude als ortsfeste Immissionsorte (OP 1 bis OP 4, vgl. Tabelle 2) untersucht. Für die Betrachter auf der Straße wurde eine modellierte Augenhöhe von 2,65 m angesetzt – die erhöhte Sitzposition eines Lkw-Fahrers als maßgebliche Worst-Case-Annahme, unter der Verkehrsteilnehmer mit niedrigerer Augenhöhe konservativ mit abgedeckt sind.



Abbildung 2 Luftbild Route Route 1 mit Routenverlauf

Immissionsorte (Gebäude)

Tabelle 2 Untersuchte Immissionsorte (Gebäude)

1.4 Methodisches Vorgehen

Für die Bearbeitung der Fragestellung wird ein mehrstufiges methodisches Vorgehen gewählt:

Technische Analyse der Nachführmechanik und der Reflexionsverhältnisse auf Basis physikalischer Gesetze (insbesondere Reflexionsgesetz).

Einsatz von Normen und Richtlinien zur Bewertung möglicher Blendwirkungen, insbesondere unter Rückgriff auf den LAI-Leitfaden sowie ergänzende technische Literatur.

Analyse der Gesamtszenerie mit der Software ForgeSolar

Zusammenführung der Erkenntnisse in einer umfassenden Bewertung hinsichtlich der möglichen Blendwirkung und Ableitung von Empfehlungen.

BEWERTUNGSRAHMEN

Die Beurteilung folgt dem LAI-Leitfaden „Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen" (Anlage 2: PV-Reflexionen, Stand 03.11.2015). Die Erheblichkeitsschwelle liegt bei 30 min pro Tag bzw. 30 h (1 800 min) pro Jahr.

Technische Beschreibung der Anlage.

2.1 Funktionsprinzip einachsiger Tracker

Ein einachsiger nachgeführter Tracker passt die Ausrichtung der Modulflächen kontinuierlich an den solaren Einfallswinkel an, um den Einstrahlungsertrag zu maximieren. Wesentliche Merkmale:

Achsenlage: Die Rotationsachse verläuft horizontal in Nord-Süd-Richtung.

Rotationsbereich: Typischerweise $\pm 60^\circ$ um die vertikale Mittellage, in Ausnahmefällen bis $\pm 70^\circ$.

Steuerung: Die Positionierung erfolgt auf Basis astronomischer Algorithmen (Zeit, Datum, Standortkoordinaten) oder über Lichtsensoren („Light-Tracking“). Updates in Intervallen von 1–5 Minuten gewährleisten eine exakte Nachführung.

Motorkomponenten: Einsatz von Drehmotoren mit Untersetzungsgetriebe und Positionssensoren (Encoder) für Rückmeldung und Präzision $< 0,1^\circ$.

Ziel: Über den Tag hinweg den Einfallswinkel der Sonnenstrahlung möglichst senkrecht (Normal-auf-Strahlung) anzunähern und damit die Globalstrahlung auf der Modulfläche zu maximieren.

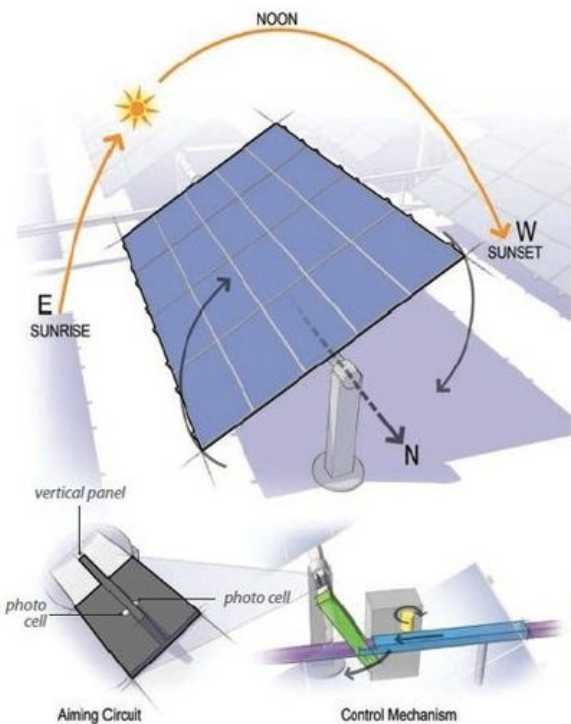


Abbildung 3 Einachsiger PV-Tracker im Tagesverlauf: morgens Ost, mittags horizontal, abends West

2.2 Nachführmechanik und Backtracking-Algorithmus

Zur Optimierung von Ertrag und Verschattung kommen zwei zentrale Mechanismen zum Einsatz:

Astronomische Nachführung:

Integrierte automatische Berechnung der Sonnendaten (Sonnenhöhe und Azimut) basierend auf Datum, Uhrzeit, Breiten- und Längengrad.

Stetige Positionskorrektur der Trackerachse im definierten Rotationsbereich ($\pm 60^\circ$).

Backtracking-Algorithmus:

Ziel: Vermeidung von Teilverschattung benachbarter Trackerreihen (Eigenverschattung).

Funktionsweise: Sobald die Sonneneinstrahlung in einem Winkel einfällt, bei dem die Vorderreihe Schatten auf die Hinterreihe wirft, reduziert der Algorithmus die Neigung gegenüber der idealen Sonnennormalen.

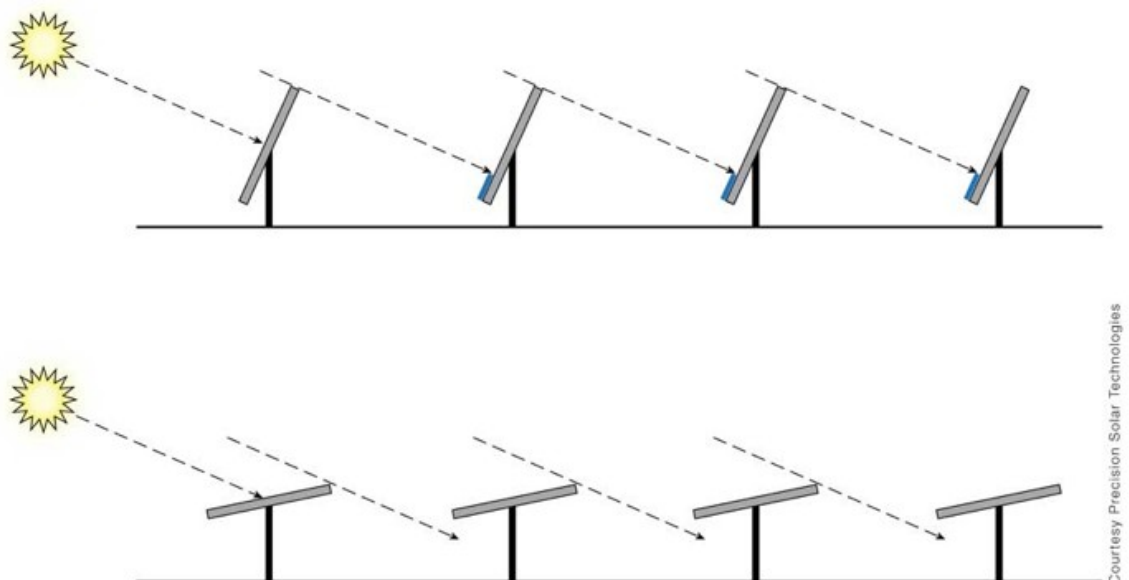
Parameter:

Shading-Limit-Winkel (Φ_{limit}): z. B. $20-30^\circ$, ab dem Backtracking greift.

GCR-abhängig: Der Ground-Coverage-Ratio (Verhältnis Modulfläche zu Bodenprojektionsfläche) bestimmt Schwellen für Ein-/Ausschalten des Backtracking.

Effekt: In Morgen- und Abendstunden (tiefer Einfallswinkel) sind die Module flacher positioniert, wodurch reflektierte Strahlung insgesamt diffuser wird und Richtblendungen weiter reduziert werden.

Durch diese Kombination aus präziser Nachführung und dynamischem Backtracking stellt das System sicher, dass einerseits die Ertragsverluste durch Verschattung minimiert und andererseits potenziell störende Reflektionen durch die Minimierung der Modul-Neigungs-Winkel in den für die Blendung kritischen Randstunden (morgens und abends) erheblich reduziert werden.



Backtracking When the sun's elevation angle is low in the sky, early or late in the day, self-shading between tracker rows has the potential to dramatically reduce system output. Backtracking rotates the array aperture away from the sun, eliminating deleterious effects of self-shading and maximizing ground cover ratio.

Abbildung 4 Backtracking: Verschattungsvermeidung durch Rückdrehung

Physikalische Grundlagen der Reflexion.

3.1 Reflexionsgesetz

Das fundamentale Reflexionsgesetz der Geometrischen Optik besagt, dass einfallendes Licht an einer ebenen, glatten Oberfläche so gespiegelt wird, dass der Einfallswinkel zum Lot genau dem Ausfallswinkel entspricht. Strahlengang, Einfallsebene und Reflexionsebene liegen in einer gemeinsamen Ebene. Diese Eigenschaft führt dazu, dass eine spiegelglatte PV-Glasoberfläche auftreffendes Sonnenlicht praktisch wie ein Spiegel reflektiert. Für die Modellierung von Blendwirkungen ist das einfache Spiegelgesetz die Grundlage: Jeder Sonnenstrahl, der auf das Modulglas trifft, wird im Ausfallswinkel zurückgeworfen (bei rein spekularem Reflexionsverhalten) vgl. nachstehende Abbildung zum Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“.

3.2 Charakteristik der Moduloberflächen

PV-Module ohne Anti-Reflex-Beschichtung (ARC) besitzen in der Regel eine plane, hochglänzende Glasabdeckung (meist gehärtetes Floatglas mit Brechungsindex ca. 1,5). Dieses Glas ist an Vorder- und Rückseite optisch glatt und eben, so dass es primär spiegelnd reflektiert. Einfallslight wird an der Luft-Glas-Grenzfläche zu etwa 4 % reflektiert, der Rest wird transmittiert. Glatte Glasoberflächen streuen das Licht nur minimal diffus – praktisch tritt die Reflexion nahezu ausschließlich als gerichtete (spekulare) Reflexion auf. Durch Staub, Mikrorauigkeit oder unterschiedliche Glas-Arten kann ein kleiner diffuser Anteil entstehen, doch dominiert die spiegelnde Reflexion das Reflexionsbild.

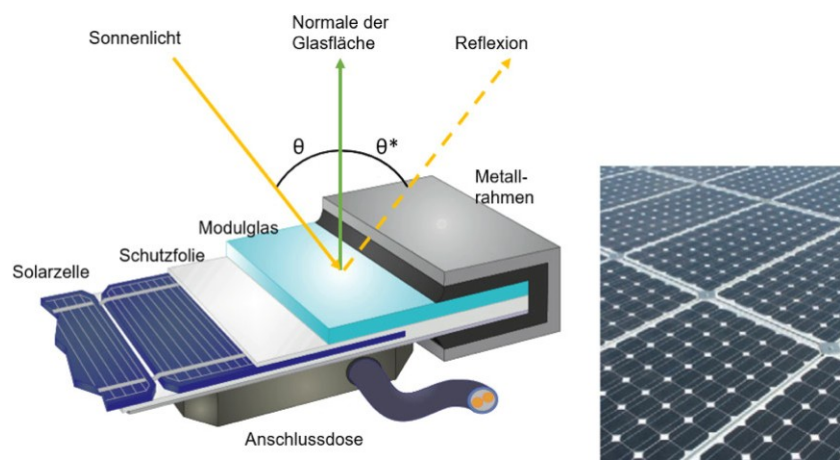


Abbildung 5 Querschnitt eines PV-Moduls mit Reflexionspfaden

3.3 Wirkung von Anti-Reflex-Beschichtungen

Um den Reflexionsverlust zu minimieren, werden Glasdeckschichten von PV-Modulen in der Regel mit optischen Antireflex-Beschichtungen (ARC) versehen. Diese dünnen Schichten (z.B. Magnesiumfluorid, Titandioxid usw.) erzeugen durch destruktive Interferenz der an Ober- und Unterseite reflektierten Wellen eine starke Verminderung der Gesamtreflexion. In der Praxis sinkt der Reflexionsgrad so auf wenige Prozent. Beispielsweise wird bei einer idealen MgF_2 -Beschichtung der Reflexionsgrad auf rund 1 % gesenkt – gegenüber etwa 4 % bei unbeschichtetem Glas. Grundsätzlich gilt: Unbeschichtete Solaroberflächen reflektieren viel Licht (im Extremfall über 30 % bei rauem Silizium), was durch Texturierung oder ARC stark reduziert werden kann. Moderne PV-Gläser (teilweise mit mehrschichtigen Nanostrukturen) erreichen deshalb nur etwa 1 – 3 % reflektiertes Licht im Normalfall.

≈ 1 %

Reflexion bei idealer MgF_2 -Beschichtung



≈ 4 %

Reflexion unbeschichtetes Glas

> 30 %

Extremfall rauer Si-Oberflächen

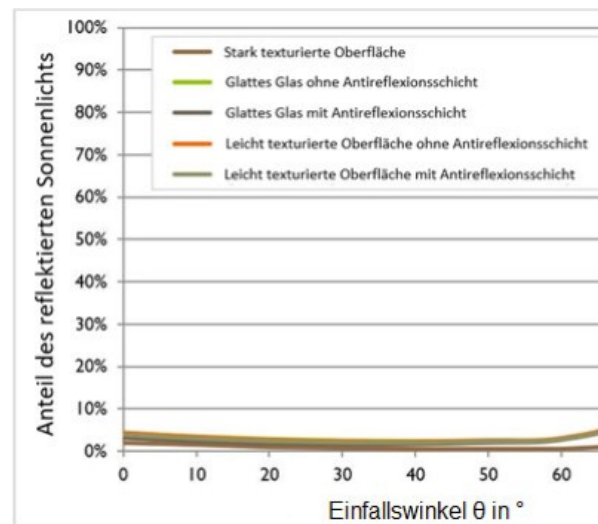


Abbildung 6 Blendwirkung durch Spiegelreflexion an PV-Modulen

Abbildung 7 Reflektierter Anteil des Sonnenlichts in Abhängigkeit vom Einfallswinkel

Normative Rahmenbedingungen.

4.1 Rechtliche Grundlagen

Blendwirkungen von Photovoltaikanlagen gelten als Lichtimmissionen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG, § 3 Abs. 2–3). Das Gesetz selbst enthält keine Grenzwerte, verweist jedoch auf die Ausgestaltung durch Verwaltungsvorgaben. Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) stellt in ihrem Leitfaden klar, dass auch reflektiertes Sonnenlicht von PV-Anlagen als potenziell relevante Lichtimmission bewertet wird. Bereits Reflexionsanteile von unter 1 % können laut LAI eine Absolutblendung auslösen, wenn die Leuchtdichte lokal 10^5 cd/m^2 übersteigt.

In bau- und genehmigungsrechtlichen Verfahren gilt daher: Reflexblendung ist als erhebliche Umwelteinwirkung zu werten, wenn sie wiederholt, andauernd oder in sensiblen Nutzungsbereichen (z. B. Wohnen, Verkehr) auftritt. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit zur Prüfung sowie gegebenenfalls zur Reduzierung durch technische oder planerische Maßnahmen.

4.2 LAI-Leitfaden: Blendwirkung von PV-Anlagen

Die LAI hat in ihrem Leitfaden zur Beurteilung von Lichtimmissionen (Anlage 2 – PV-Reflexionen) spezifische Hinweise für den Umgang mit Blendung durch Photovoltaikanlagen veröffentlicht.

Relevante untersuchte Immissionsorte sind

- schutzwürdige Räume, die als
- Wohnräume,
- Schlafräume, einschließlich Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten
- und Bettenräume in Krankenhäusern und Sanatorien
- Unterrichtsräume in Schulen, Hochschulen und ähnlichen Einrichtungen
- Büroräume, Praxisräume, Arbeitsräume, Schulungsräume und ähnliche Arbeitsräume genutzt werden

Wesentliche Aussagen:

- Bereits Reflexionsgrade $< 1 \%$ können zur Absolutblendung führen, wenn die direkte Sonnenstrahlung reflektiert wird.
- Eine solche Lichtimmission gilt als erheblich, wenn sie wiederholt und mit Störcharakter in schützenswerte Nutzungen wirkt.
- Nach LAI überschreitet eine Blendwirkung die Schwelle für erhebliche Belästigung, wenn ein schutzwürdiger Raum mehr als 30 Minuten pro Tag und/oder insgesamt 30 Stunden (1800 Minuten) pro Jahr einer Kernblendung ausgesetzt ist.

Nicht jede innerhalb der Erheblichkeitsgrenze auftretende Reflexion ist automatisch als relevant anzusehen. Folgende Kriterien führen dazu, dass Blendwirkungen als vernachlässigbar eingestuft werden:

- Der Winkel zwischen Reflexionsrichtung und direkter Sonneneinstrahlung beträgt höchstens 10° .
- Der Höhenwinkel der Sonne liegt gleichzeitig bei maximal 5° .

Unter diesen Bedingungen wird die Reflexion von der Sonne überstrahlt und stellt keine eigenständige Blendquelle dar.

Der Leitfaden empfiehlt die Verwendung vereinfachter Prüfmethode (z. B. geometrische Sichtbarkeitsanalyse, Simulationssoftware) und orientiert sich an analogen Regelungen wie dem Schattenwurf von Windenergieanlagen (30-min-Regel). Weiterhin wird auf mögliche Abhilfemaßnahmen verwiesen, etwa Modulausrichtung, Antireflexbeschichtung, Begrünung, Sichtschutz oder Abstandserhöhungen.

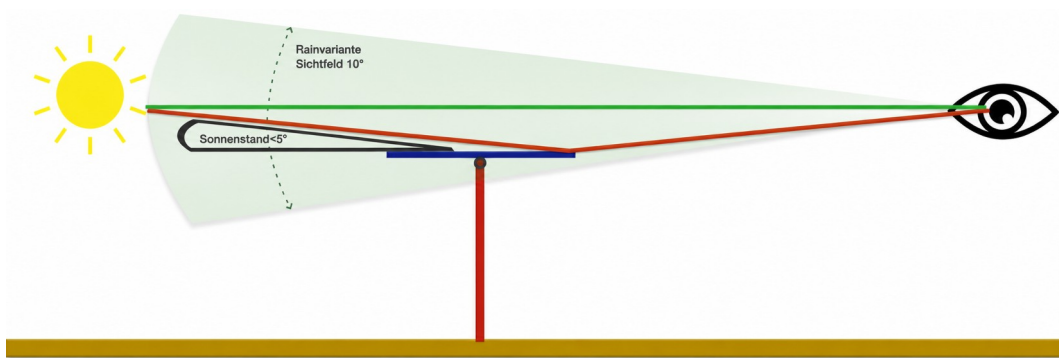


Abbildung 8 Bewertungsschema nach LAI-Leitfaden: relevantes Sichtfeld und Sonnenstandsbedingung

Software.

Zur Bewertung möglicher Blendwirkungen durch Photovoltaikanlagen wird die Software ForgeSolar verwendet. Dabei handelt es sich um ein international etabliertes Analysewerkzeug, das auf der von Sandia National Laboratories entwickelten SGHAT-Technologie basiert. Diese Methode hat sich als Standardverfahren zur Beurteilung der Blendgefahr durch reflektiertes Sonnenlicht an PV-Anlagen durchgesetzt und wird in deutschen Genehmigungsverfahren als anerkanntes Analyseinstrument verwendet.

Die Simulationen werden in zeitlicher Auflösung von einer Minute durchgeführt, um eine präzise Analyse der Blenddauer und -intensität zu ermöglichen. Dabei werden spezifische Immissionsorte definiert, an denen die potenzielle visuelle Beeinträchtigung durch Blendung erfasst und bewertet wird. Dies erlaubt eine differenzierte Betrachtung sowohl für ortsfeste Beobachtungspunkte als auch für sich bewegende Betrachtungspfade, wie beispielsweise Verkehrswege oder Flugrouten.

ForgeSolar ist darauf ausgelegt, sowohl punktuelle als auch flächenhafte Auswertungen durchzuführen und liefert wiederholbare, nachvollziehbare Ergebnisse. Die Software findet Anwendung in Projekten weltweit, insbesondere im Bereich der Genehmigungsplanung, Risikoabschätzung und Umweltverträglichkeitsprüfung von Photovoltaikanlagen.

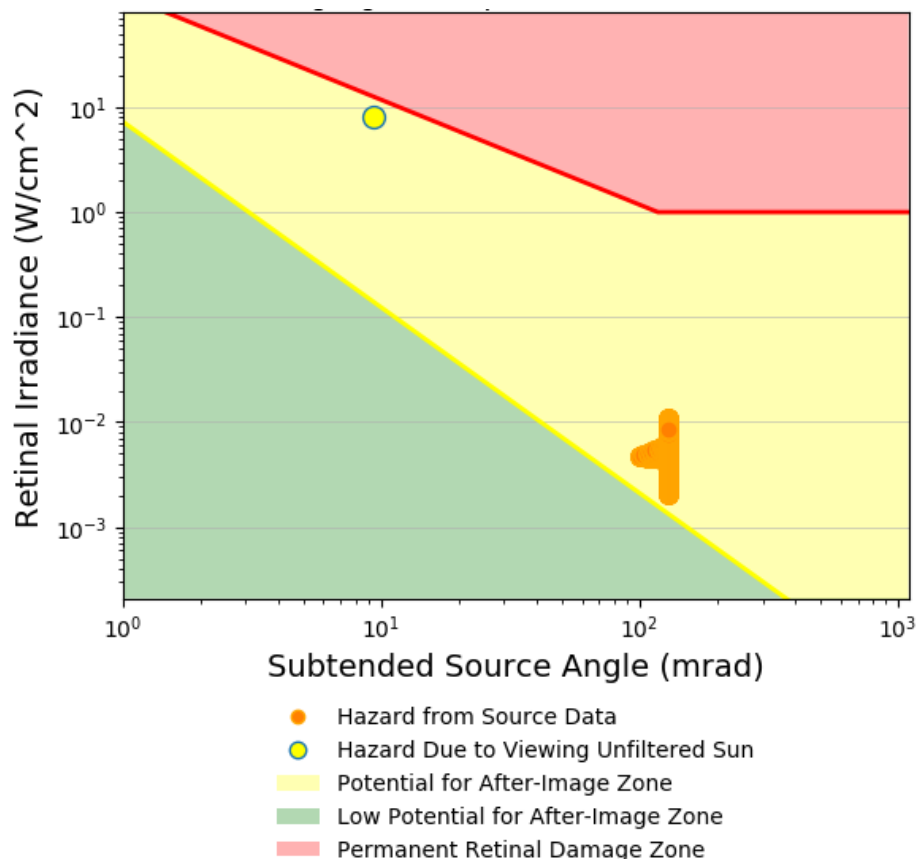


Abbildung 9 Retinale Bestrahlungsstärke vs. Quellwinkel – Gefahrenzonen nach SGHAT-Methodik

Blendwirkung auf schützenswerte Infrastruktur.

6.1 Blendwirkung auf Gebäude

6.1.1 Methodik

Die methodischen Grundlagen zur Bewertung von Blendwirkungen auf schutzbedürftige Räume (Aufzählung der Schutzraum-Kategorien, 100-m-Vereinfachungsregel des LAI, Kernblendungs-Modellansatz als Worst-Case-Annahme einer spiegelnden Glasoberfläche sowie das $10^\circ/5^\circ$ -Ausschlusskriterium) sind in §4.2 vollständig dargestellt und werden hier nicht wiederholt. Die tatsächlich verbauten Module weisen eine Anti-Reflex-Beschichtung (ARC, vgl. §1.2) auf; der in der ForgeSolar-Simulation hinterlegte Worst-Case unterstellt jedoch konservativ eine ideal verspiegelte Glasoberfläche.

6.1.2 Ergebnisse

In der ForgeSolar-Simulation wurden vier Wohngebäude als Immissionsorte modelliert (OP 1 bis OP 4, vgl. §1.3). Für drei der vier Immissionsorte weist die Simulation eine Blendwirkung aus; OP 3 bleibt im gesamten Analysejahr blendfrei. Die Bewertung je Immissionsort:

OP 1 (Wohnhaus) — 15.251 Blendminuten pro Jahr (254,2 h) an 365 Tagen mit einer maximalen Episodendauer von 57 Minuten. Sowohl die Jahresschwelle (30 h) als auch die Tagesschwelle (30 min) des LAI-Leitfadens werden deutlich überschritten.

OP 2 (Wohnhaus) — 37.628 Blendminuten pro Jahr (627,1 h) an 365 Tagen mit einer maximalen Episodendauer von 88 Minuten. Beide LAI-Erheblichkeitsschwellen werden deutlich überschritten; OP 2 ist der am stärksten betroffene Immissionsort.

OP 3 (Wohnhaus) — Keine Blendwirkung im gesamten Analysejahr.

OP 4 (Wohnhaus) — 265 Blendminuten pro Jahr (4,4 h) an 74 Tagen mit einer maximalen Episodendauer von 7 Minuten. Sowohl die Tagesschwelle (30 min) als auch die Jahresschwelle (30 h) werden sicher eingehalten; die Blendwirkung ist als nicht erheblich einzustufen.

Fazit — Für OP 1 und OP 2 ist die Blendwirkung ohne technische Anpassung als erheblich einzustufen. Die zur Minderung erforderliche Anpassung der Nachführung (Anti-Glare-Tracking) ist in Kapitel 7 dargestellt und bewertet.

IMMISSIONSORT	BLENDMINUTEN/ JAHR	TAGE BLENDUNG	MIT MAX. EPISODENDAUER	LAI-BEWERTUNG
---------------	-----------------------	------------------	---------------------------	---------------

			(MIN)	
OP 1	15.251	365	57	überschritten
OP 2	37.628	365	88	überschritten
OP 4	265	74	7	eingehalten

Tabelle 3 Blendminuten je Immissionsort (Gebäude)

6.2 Blendwirkung auf Verkehrswege

6.2.1 Methodik

Aktuell existieren weder Normen noch anerkannte technische Regelwerke, die verbindliche Kriterien zur Bewertung von Blendwirkungen durch Photovoltaikanlagen auf Verkehrswege (Straßen und Bahnstrecken) vorgeben. Auch der Leitfaden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) enthält hierzu keine spezifischen Vorgaben.

Die Bewertung der Blendwirkungen erfolgt daher auf Grundlage etablierter wissenschaftlicher Erkenntnisse sowie bewährter Verfahren aus Gutachtenpraxis, die nachfolgend erläutert werden, orientiert sich aber auch an dem LAI-Leitfaden.

Definition der relevanten Sichtfelder

Zur Einschätzung möglicher Blendwirkungen werden Sichtfelder definiert, die sich an der typischen Blickrichtung von Fahrzeugführern orientieren. Dabei wird unterstellt, dass die Blickrichtung der jeweiligen Fahrtrichtung entspricht und das relevante Sehfeld um 50° geöffnet ist. Die Einteilung erfolgt wie folgt:

Berücksichtigung der Verkehrsteilnehmer

Für die Analyse potenzieller Blendwirkungen auf Straßen- und Schienenverkehr wird ausschließlich die Perspektive von Lkw-Fahrern zugrunde gelegt. Aufgrund ihrer erhöhten Sitzposition im Vergleich zu Pkw-Fahrern und Triebfahrzeugführern werden mögliche Reflexionen auf einem höheren Sichtniveau erfasst. Diese Vorgehensweise stellt eine konservative (Worst-Case-)Betrachtung dar, da Verkehrsteilnehmer mit niedrigerer Augenhöhe unterhalb des relevanten Reflexionswinkels liegen und daher nicht geblendet werden können.

Relevanzkriterien für Reflexionen

Obwohl der LAI-Leitfaden ursprünglich nicht für Verkehrswege ausgelegt ist, wird er mangels spezifischer Alternativen als Referenz herangezogen.

Dabei gilt: Nicht jede innerhalb der Erheblichkeitsgrenze auftretende Reflexion ist automatisch als relevant einzustufen. Folgende Bedingungen führen dazu, dass eine Blendwirkung als vernachlässigbar betrachtet werden kann:

Der Winkel zwischen Reflexionsrichtung und direkter Sonneneinstrahlung beträgt maximal 10°.

Der Sonnenhöhenwinkel liegt gleichzeitig unter oder gleich 5°.

Unter diesen Bedingungen wird die Reflexion durch das direkte Sonnenlicht überstrahlt und tritt visuell nicht als eigenständige Blendquelle in Erscheinung

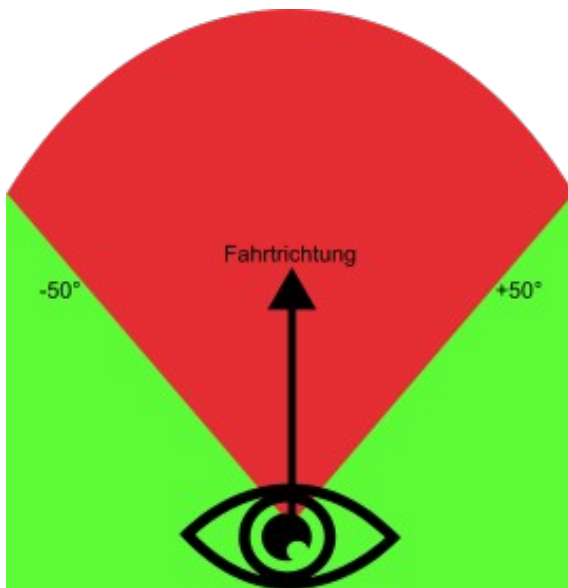


Abbildung 10 Relevantes Sichtfeld eines Fahrzeugführers ($\pm 50^\circ$ um Fahrtrichtung)



Abbildung 11 Augenhöhe PKW-Fahrer: ca. 1,2 m

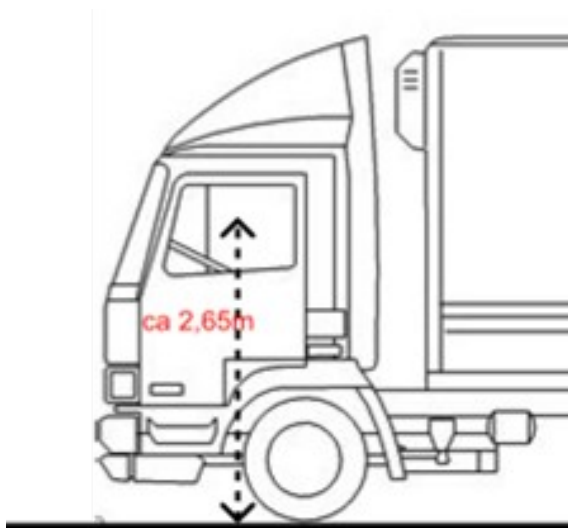


Abbildung 12 Augenhöhe LKW-Fahrer: ca. 2,65 m

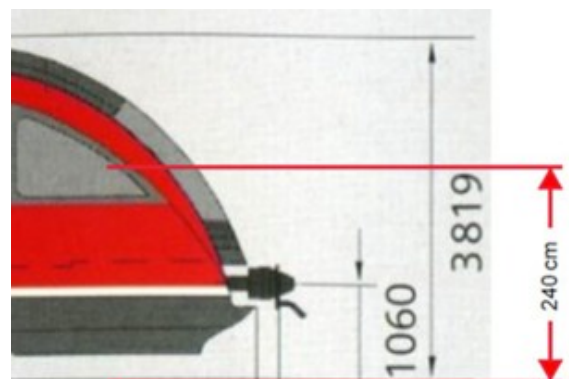


Abbildung 13 Augenhöhe Zugführer: ca. 2,40 m

6.2.2 Schienenwege

Im direkten Umfeld des Projektstandorts befinden sich keine Schienenwege. Eine Bewertung der Blendwirkung auf den Schienenverkehr entfällt daher.

6.2.3 Straßen

Für den untersuchten Verkehrsweg (Route 1) ergibt die ForgeSolar-Analyse zu keinem Zeitpunkt des Analysejahres eine blendrelevante Reflexion. Sämtliche 53.144 relevanten Blendminuten des Projekts (1.169 Episoden an 365 Tagen) entfallen auf die in §6.1 bewerteten Wohngebäude.

Die Ergebnisse für den Verkehrsweg im Überblick:

ROUTE	MINUTEN	STUNDEN	HAZ ≥ 2	EPISODEN	TAGE
Route 1	0	0,0	0	0	0

Tabelle 4 Blendminuten, Episoden und betroffene Tage je Route

Auswertung — Diagramme

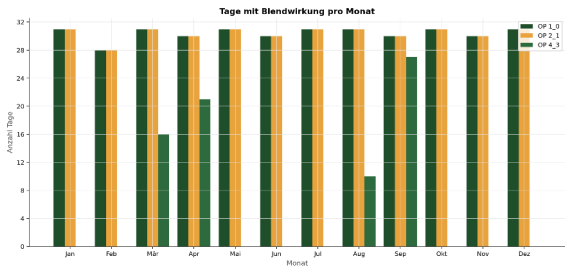


Abbildung 14 Tage mit Blendereignis

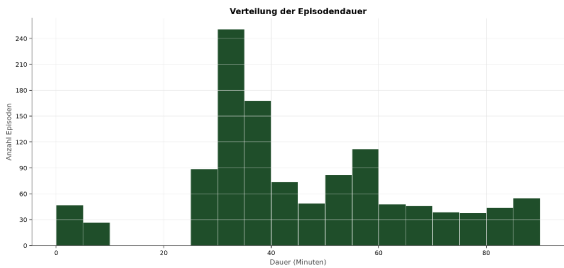


Abbildung 15 Dauer der Blendereignisse

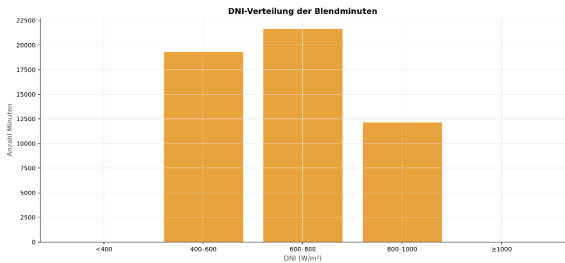


Abbildung 16 Intensität der Blendereignisse

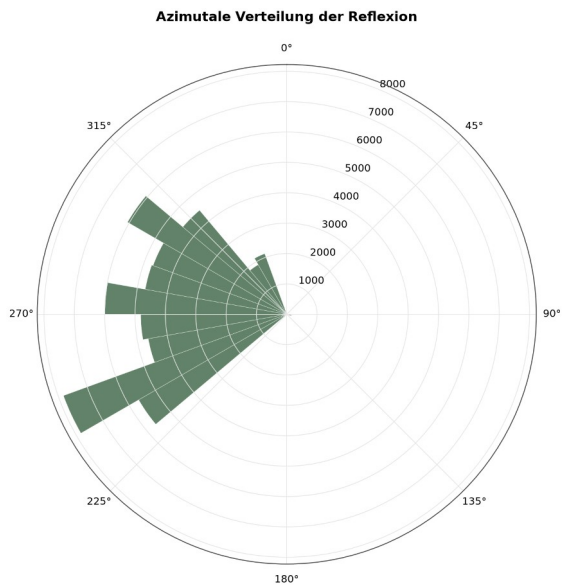


Abbildung 17 Ursprung der Blendereignisse

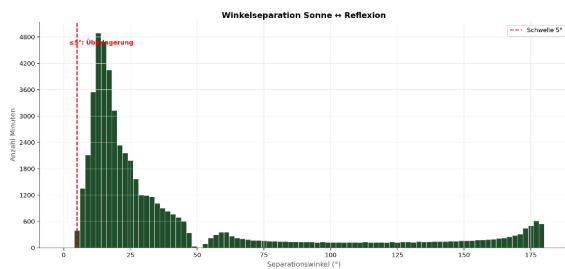


Abbildung 18 Winkel zwischen Sonnenvektor und Reflektionsvektor

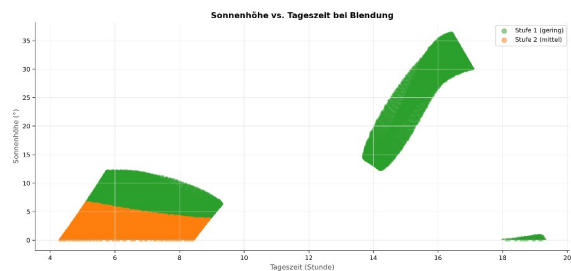


Abbildung 19 Sonnenhöhe an Tagen mit Blendereignis

Betroffene Verkehrswege — Von den untersuchten Verkehrswegen ist keiner von einer Blendwirkung betroffen: Für Route 1 werden im gesamten Analysejahr 0 Blendminuten ermittelt (0 Episoden, 0 Tage, keine Minuten der Gefährdungsstufe Hazard ≥ 2).

Blickrichtung und Reflexionsgeometrie — Die Trackerachse ist mit 180° exakt in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet; die Module schwenken um diese Achse und weisen morgens nach Osten, nachmittags nach Westen. Die Straße verläuft nördlich der Anlage in annähernd West-Ost-Richtung. Die in den Morgen- und Nachmittagsstunden auftretenden Reflexionen werden entlang der Ost-West-Richtung über den Straßenkorridor hinweg abgelenkt und erreichen die Sichtstrahlen der in Fahrtrichtung blickenden Fahrzeugführer nicht. In den Randstunden stehen die Tracker aufgrund des Backtracking-Algorithmus zudem nahezu horizontal, sodass steile Modulstellungen bei tiefem Sonnenstand nicht auftreten.

Modellierte Augenhöhe — Der Bewertung wurde durchgängig die erhöhte Augenhöhe eines Lkw-Fahrers von 2,65 m als maßgebliche Worst-Case-Annahme zugrunde gelegt; Verkehrsteilnehmer mit niedrigerer Sitzposition sind hierin konservativ enthalten und bedürfen keiner gesonderten Betrachtung.

Verkehrssicherheitsbewertung — Da für den Verkehrsweg keine Blendminuten ermittelt werden, ist eine Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit nicht zu besorgen. Das in Kapitel 7 dargestellte Anti-Glare-Tracking dient der Entschärfung der Blendwirkung auf die Wohngebäude (§6.1) und wirkt nicht zulasten des Verkehrswegs.

Vorhandene Sichtschutzelemente — Etwaige zwischen der Anlage und der Straße vorhandene Vegetationsstrukturen (Gehölze, Hecken) wurden in der Simulation bewusst nicht als blendmindernde Elemente angesetzt. Diese konservative Worst-Case-Annahme trägt dem Umstand Rechnung, dass Laubgehölze in der laubfreien Winterperiode keine wirksame Abschirmung bieten. Eine real vorhandene Abschirmung wirkt somit ausschließlich zugunsten der Verkehrssicherheit.

6.3 ForgeSolar-Detaillauswertung je Rezeptor

Für jeden Rezeptor mit nachgewiesener Blendwirkung zeigen die folgenden Abbildungen die zugehörigen ForgeSolar-Detaillauswertungen aus dem SGHAT-Simulationsbericht.

PV array 1 and OP 1

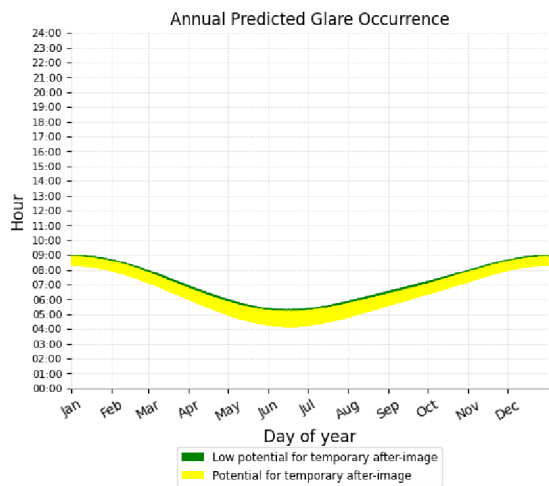


Abbildung 20 ForgeSolar-Auswertung: PV array 1 and OP 1

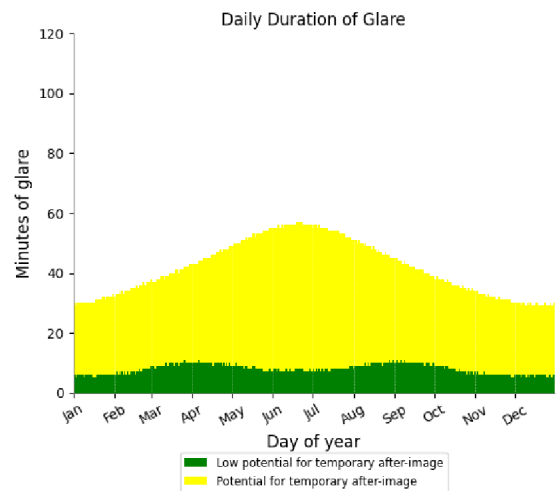


Abbildung 21 PV array 1 and OP 1

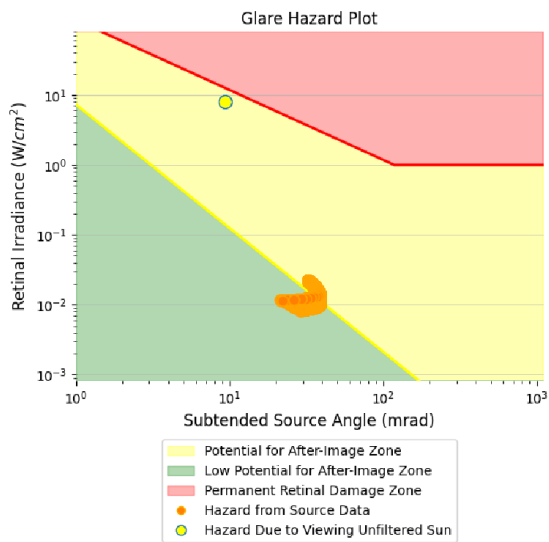


Abbildung 22 PV array 1 and OP 1

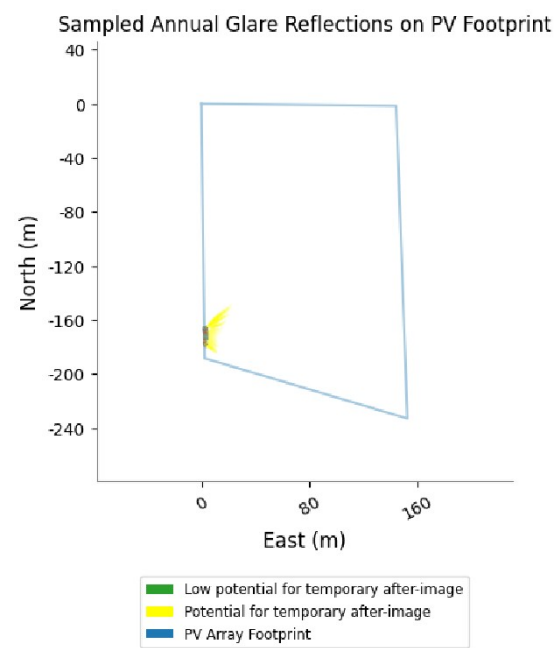


Abbildung 23 PV array 1 and OP 1

PV array 1 and OP 2

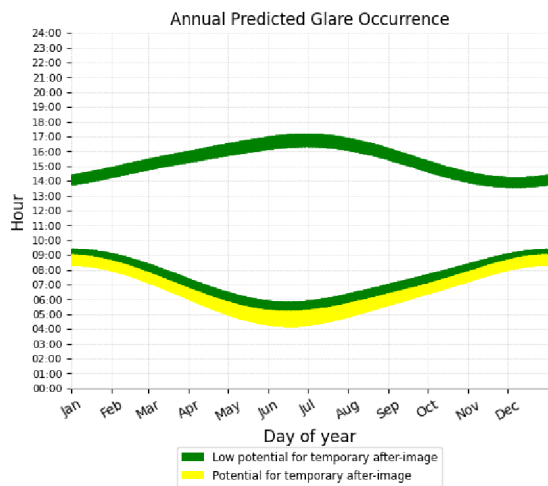


Abbildung 24 ForgeSolar-Auswertung: PV array 1 and OP 2

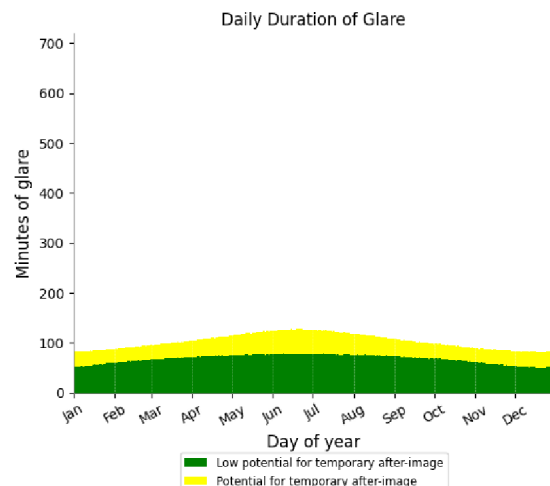


Abbildung 25 PV array 1 and OP 2

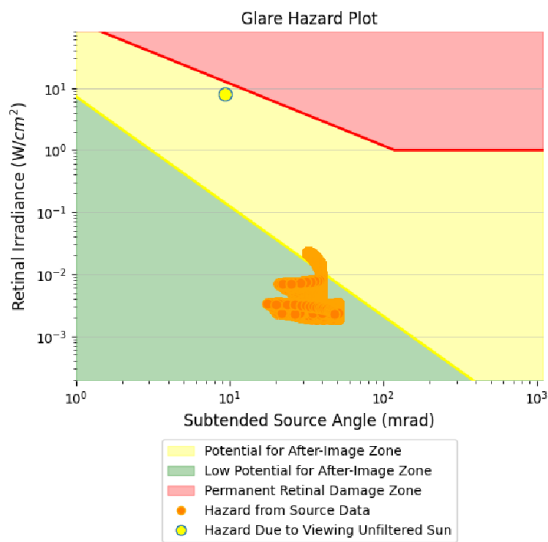


Abbildung 26 PV array 1 and OP 2

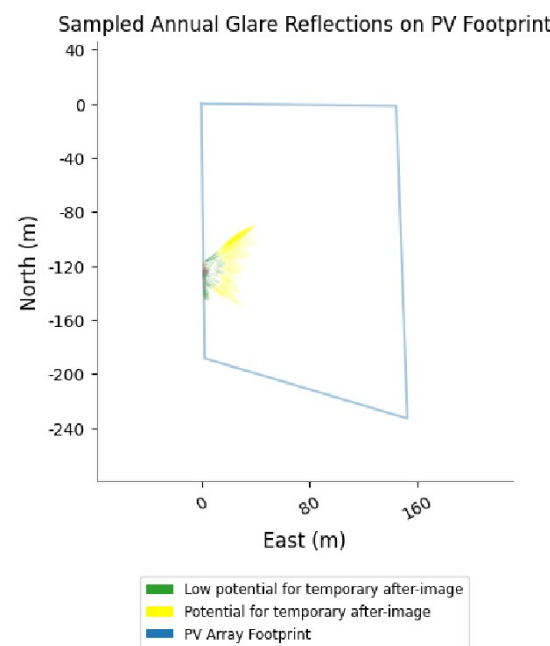


Abbildung 27 PV array 1 and OP 2

PV array 1 and OP 4

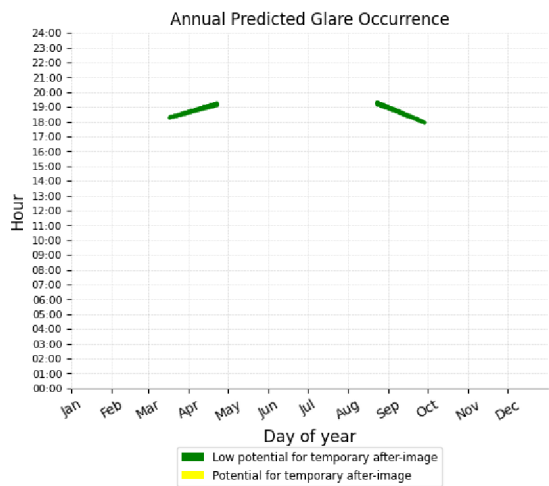


Abbildung 28 ForgeSolar-Auswertung: PV array 1 and OP 4

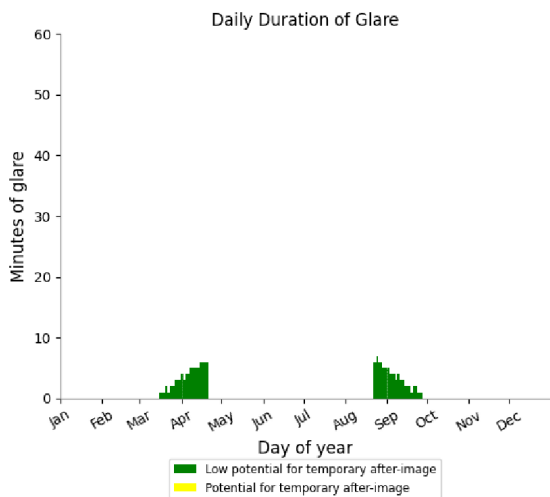


Abbildung 29 PV array 1 and OP 4

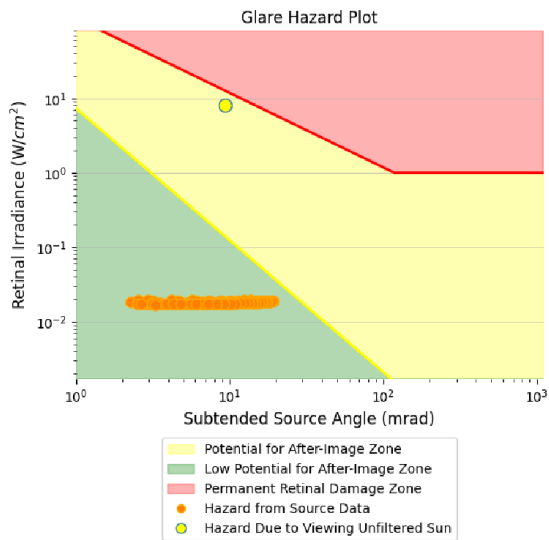


Abbildung 30 PV array 1 and OP 4

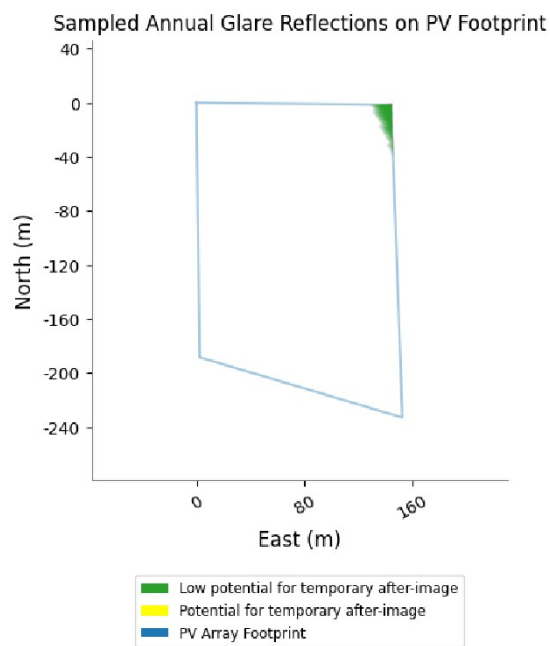


Abbildung 31 PV array 1 and OP 4

Anpassung der Blendwirkung – Anti-Glare-Tracking.

7.1 Ausgangslage und Wirkprinzip

Die 53.144 relevanten Blendminuten (885,7 h/Jahr) überschreiten die LAI-Erheblichkeitsgrenzen (30 min/Tag und 30 h/Jahr) deutlich.

An 365 Tagen wird die Tagesschwelle von 30 Minuten überschritten.

Eine Anpassung der Tracker-Nachführung (Anti-Glare-Tracking) ist daher zwingend erforderlich.

Das vektorielle Reflexionsgesetz $R = 2 \cdot (S \cdot N) \cdot N - S$ liefert für jede Kombination aus Sonnenstand und Modulorientierung die exakte Richtung des reflektierten Strahls im dreidimensionalen Raum. Für jede einzelne Blendminute wird mit den tatsächlichen Vektoren von Sonne (S) und Modulnormale (N) der reflektierte Strahl R berechnet und die Tilt-Richtung über alle Azimute optimiert. Die Tracker-Achsenausrichtung und der Rotationsbereich $\pm 60^\circ$ gehen dabei explizit in die Geometrie ein. Die Ergebnisse wurden gegen die SGHAT-Originaldaten verifiziert (Vektorfehler $< 0,002$, ausschließlich rundungsbedingt).

Pro Blendminute wurde der minimale Tracker-Tilt gesucht, der die folgenden Sicherheitskriterien gleichzeitig erfüllt:

- Reflexions-Altitude mindestens 10° oberhalb des aktuellen Beobachter-Sichtstrahls
- Winkelseparation Reflexion-Beobachter mindestens 10°
- Tilt-Richtung optimal in 5° -Schritten über alle azimutalen Optionen
- Tilt-Wert innerhalb des hardwareseitigen Rotationsbereichs ($\pm 60^\circ$)

Die Optimierung verwendet ausschließlich die vollständige 3D-Vektorgleichung.

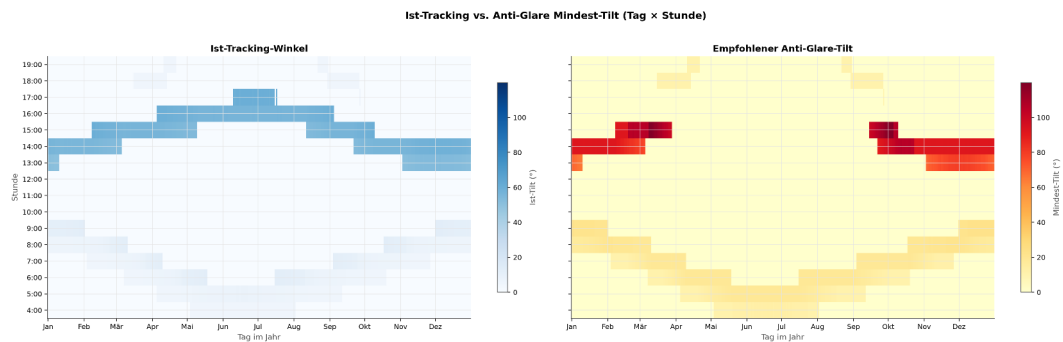
7.2 Ergebnisse

Die vektorielle Tilt-Optimierung wurde für alle relevanten Blendminuten durchgeführt. Die Ergebnisse im Überblick:

KENNGRÖSSE	WERT
Minimaler Tilt	11,0°
Maximaler Tilt	120,0°
Mittlerer Tilt	20,9°

Tabelle 5 Ergebnisse der Anti-Glare-Tilt-Optimierung

Das vollständige minutengenaue Tracker-Tilt-Profil für das gesamte Analysejahr steht als maschinenlesbare CSV-Datei im Download-Bundle zur Verfügung.


Abbildung 32 Anti-Glare Tilt-Heatmap: Mindest-Tilt nach Tag und Stunde

HINWEIS

Die vorliegende Anti-Glare-Anpassung basiert auf den von SGHAT (ForgeSolar) berechneten Trackingwinkeln. Diese modellbasierten Winkel sollten vor Inbetriebnahme mit den tatsächlichen Trackingwinkeln des Tracker-Herstellers abgeglichen werden. Bei Abweichungen zwischen dem SGHAT-Modell und der realen Tracker-Steuerung ist eine Nachjustierung der Anti-Glare-Parameter zwingend erforderlich, um die Wirksamkeit der Blendvermeidung sicherzustellen.

7.3 Umsetzungsempfehlung

Die Umsetzung des Anti-Glare-Schedules erfolgt durch Hinterlegung einer Mindest-Tilt-Tabelle in der Steuerungslogik des Tracker-Herstellers. Folgende Vorgehensweise wird empfohlen:

- Schritt 1: Übergabe der in §7.2 dargestellten anlagenweiten Tilt-Matrix (Heatmap und Min/Max/Mittel-Tabelle) an den Tracker-Steuerungshersteller
- Schritt 2: Implementierung einer „Minimum-Tilt-Constraint“ mit Vorrang vor dem Backtracking-Algorithmus während der gekennzeichneten Zeitfenster
- Schritt 3: Dokumentation des aktiven Anti-Glare-Modus in der Inbetriebnahme-Dokumentation als Auflage des Genehmigungsbescheids

Gesamtbewertung der Blendwirkung.

8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Analyse der Blendwirkung ergibt folgendes Gesamtbild:

- Insgesamt 53.144 relevante Blendminuten (885,7 h/Jahr), verteilt auf 1.169 Episoden an 365 Tagen.
- An 365 Tagen wird die LAI-Tagesschwelle von 30 Minuten überschritten.
- Durch Anti-Glare-Tracking können 87,1 % der relevanten Blendminuten entschärft werden.

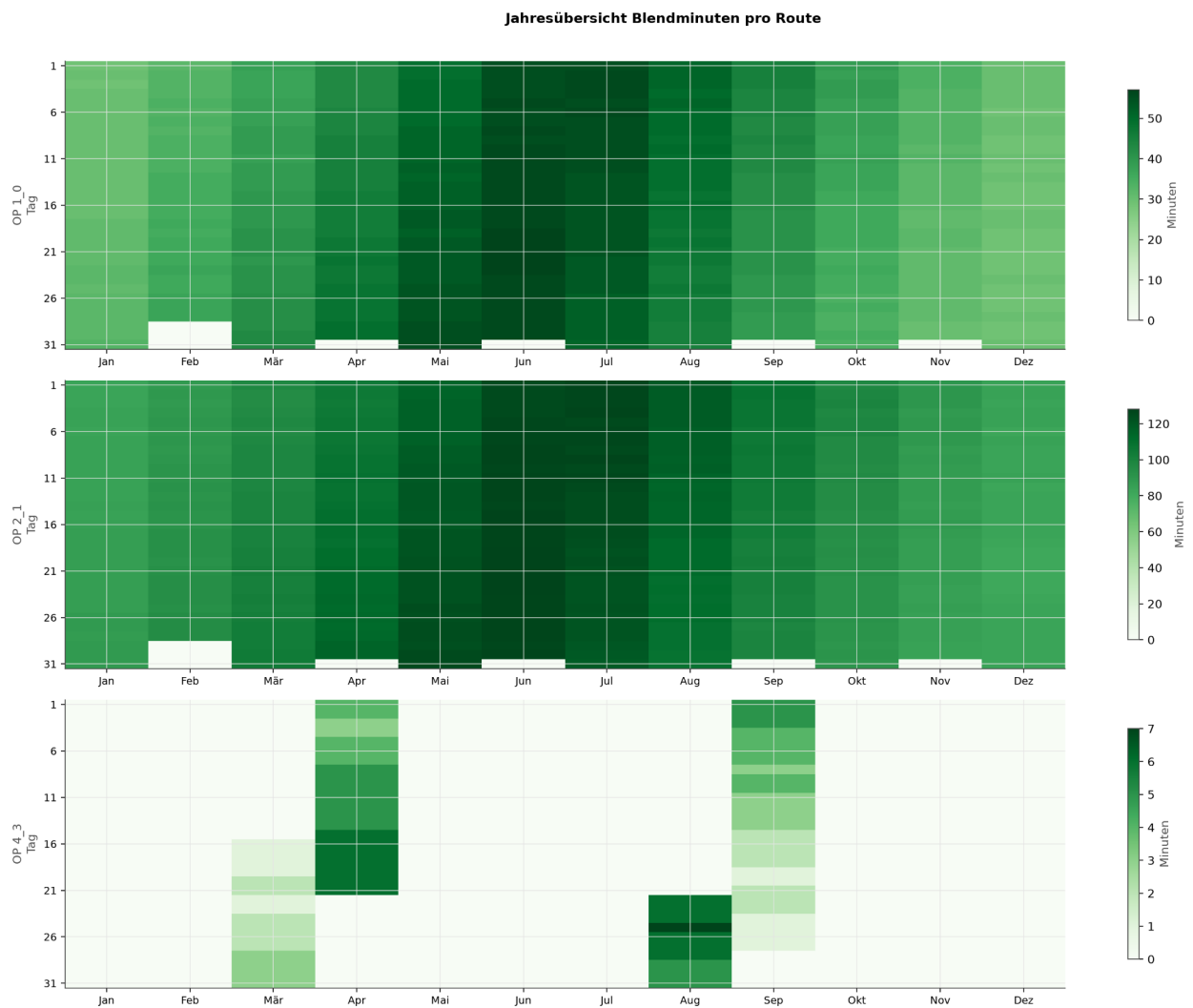


Abbildung 33 Blendminuten nach Route im Jahresverlauf

8.2 Bewertung und Fazit

Einordnung in die LAI-Schwellenwerte — Die ermittelten 53.144 relevanten Blendminuten (885,7 h/Jahr) entfallen vollständig auf die Wohngebäude OP 1, OP 2 und OP 4; der untersuchte Verkehrsweg bleibt blendfrei. An OP 1 und OP 2 werden die LAI-Erheblichkeitsgrenzen (30 min/Tag, 30 h/Jahr) deutlich überschritten – an 365 Tagen des Jahres liegt mindestens ein Immissionsort über der Tagesschwelle von 30 Minuten. OP 4 hält beide Schwellen sicher ein. Ohne technische Adaption wäre die Erheblichkeitsschwelle des LAI-Leitfadens damit überschritten.

Wirksamkeit des Anti-Glare-Trackings — Die vektorielle Tilt-Optimierung (§7) weist nach, dass sich 87,1 % der relevanten Blendminuten durch eine Anpassung der Nachführung entschärfen lassen. Die erforderlichen Mindest-Tilt-Werte liegen zwischen 11,0° und 120,0° (im Mittel 20,9°); Werte oberhalb des hardwareseitigen Rotationsbereichs ($\pm 60^\circ$) sind nicht umsetzbar und verbleiben als Rest-Blendminuten. Die Maßnahme ist umsetzbar, sofern die Tracker-Steuerung die Implementierung einer harten Tilt-Untergrenze als Vorrangbedingung gegenüber dem Backtracking-Algorithmus unterstützt. Für die verbleibenden 12,9 % der Blendminuten sind ergänzende Maßnahmen (z. B. Sichtschutzpflanzungen im Sichtfeld von OP 1 und OP 2) zu prüfen.

Bewertung der Verkehrssicherheit — Der untersuchte Verkehrsweg weist im gesamten Analysejahr keine Blendminuten auf; eine Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit ist nicht zu besorgen. Die Blendwirkung betrifft ausschließlich Wohngebäude; ein erheblicher Anteil der dortigen Blendminuten ist der höheren Gefährdungstufe (Hazard ≥ 2) zuzuordnen und wird durch das Anti-Glare-Tracking entschärft.

Empfehlung für das Genehmigungsverfahren — Die Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens wird hinsichtlich der Blendwirkung befürwortet, sofern die folgenden Auflagen in den Genehmigungsbescheid aufgenommen werden: (1) verbindliche Hinterlegung des in Kapitel 7 dargestellten Anti-Glare-Tilt-Schedules (Mindest-Tilt-Matrix) in der Tracker-Steuerung mit Vorrang vor dem Backtracking-Algorithmus; (2) Dokumentation des aktiven Anti-Glare-Modus in der Inbetriebnahme-Dokumentation; (3) ergänzende Sichtschutzmaßnahmen für die nicht durch das Anti-Glare-Tracking abdeckbaren Rest-Blendminuten an OP 1 und OP 2.

SCHLUSSFOLGERUNG

Sofern die in Kapitel 7 empfohlenen Adaptionsmaßnahmen (Anti-Glare-Tracker-Tilt-Schedule) eingehalten werden, kann die Blendwirkung auf die in Kapitel 1 benannten schutzwürdigen Objekte mit hinreichender Sicherheit vermieden werden. Die Anlage erfüllt unter diesen Voraussetzungen die geltenden Anforderungen des LAI-Leitfadens im Hinblick auf visuelle Emissionen.

Haftungsausschluss.

Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen sowie unter Anwendung anerkannter ingenieurwissenschaftlicher Methoden und etablierter Simulationssoftware erstellt. Die Berechnungen und Bewertungen basieren auf den zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung verfügbaren Daten, üblichen Standards sowie allgemein anerkannten Annahmen.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass trotz sorgfältiger Analyse nicht sämtliche mögliche Einflüsse und Sonderfälle vollständig berücksichtigt werden können. Unvorhergesehene Änderungen der Umgebung, Nutzungsänderungen, außergewöhnliche atmosphärische Bedingungen oder besondere topografische Gegebenheiten können Auswirkungen haben, die außerhalb des hier betrachteten Rahmens liegen.

Eine Haftung für unvorhersehbare, nicht untersuchte oder zukünftig veränderte Bedingungen sowie daraus resultierende Auswirkungen auf die Blendwirkungen kann daher nicht übernommen werden.

Grundlegende Annahmen in der Software ForgeSolar.

Annahmen und Modellvereinfachungen der SGHAT-/ForgeSolar-Methodik

Die Blendbewertung mit SGHAT bzw. ForgeSolar basiert auf einem analytischen Modell, das verschiedene Annahmen und Abstraktionen beinhaltet. Die wichtigsten davon sind im Folgenden zusammengefasst:

Zeitangaben erfolgen in Standardzeit. Bei Sommerzeit ist eine Stunde zu addieren.

Die geometrische Abbildung des PV-Systems erfolgt vereinfachend. Detaillierte Merkmale wie Modulabstände, unterschiedliche Höhen im Array oder Trägerstrukturen werden nicht explizit berücksichtigt.

Bei der jährlichen Blendrisikoanalyse kommen Zufallszahlberechnungen zum Einsatz, wodurch sich minimale Abweichungen zwischen Analyse-Durchläufen ergeben können. Dies betrifft vorrangig stationäre Beobachtungspunkte (z. B. Tower).

Der Subtendierte Winkel (Größe des Blendflecks) wird durch die Ausdehnung des PV-Arrays begrenzt. Eine Unterteilung großer Anlagen in kleinere Segmente reduziert den maximal möglichen Abstrahlwinkel.

Die Software geht von einer idealen Ausrichtung des PV-Arrays in einer gemeinsamen Ebene aus. Für eine präzisere Analyse wird empfohlen, zusätzliche Durchläufe mit minimalen und maximalen Höhenwerten der Modulpunkte vorzunehmen.

Sichtbehindernde Objekte (z. B. Gebäude, Vegetation, Geländeformen) werden vom Algorithmus nicht automatisch erkannt oder berücksichtigt.

Bei Aktivierung der Option zur variablen Direktstrahlung (DNI) wird eine typische Klarwetter-Strahlungskurve verwendet, die über den Tagesverlauf variiert (Minimum morgens/abends, Maximum zu Solar Noon). Diese Kurve ist idealisiert und bildet reale Witterungsbedingungen wie Bewölkung nicht ab.

Die Einschätzung des blendbedingten Augenrisikos beruht auf mehreren Umwelt-, Material- und Wahrnehmungsparametern, deren exakte Ausprägung mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Methodik erlaubt jedoch eine schnelle Durchführung von Sensitivitätsanalysen.

Die Berechnung der Systemleistung basiert auf einem vereinfachten Modell mit konstant klarer Witterung und sollte nicht für detaillierte energetische Auslegungen herangezogen werden.

Die in den Blendgefahr diagrammen dargestellten Gefahrenzonen dienen der Veranschaulichung und stellen keine exakte Grenze dar – tatsächliche Blendwirkungen treten kontinuierlich abgestuft auf.

Die auf Empfängerplots dargestellten Blendpunkte sind approximativ und können in der Realität leicht abweichen.

Literaturverzeichnis.

Kapitel 3

Hecht E. Optik. 5. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag; 2015. Kapitel 3: Reflexion und Brechung.

Green MA. Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; 1982. Kapitel 2: Eigenschaften von Solarglas.

Zhao J, Wang A, Green MA. 24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates. Prog Photovolt Res Appl. 1999;7(6):471–474.

Mobley CD. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters. Academic Press; 1994. Kapitel 3: Reflektionsverhalten von Wasseroberflächen.

Baker N, Steemers K. Daylight Design of Buildings: A Handbook for Architects and Engineers. London: James & James; 2002. Kapitel 4: Reflexions- und Transmissionseigenschaften von Glas.

Kapitel 4

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). BGBl I 2002, S. 3621; zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1353).

Hoppe P, Jarass H. Umweltrecht: Kommentar zum BImSchG. 13. Aufl. München: C.H. Beck; 2021.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI). Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen. Anlage 2: Blendwirkung von Photovoltaikanlagen. Stand: 03.11.2015.

DIN EN 12464-2:2014-05. Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 2: Arbeitsplätze im Freien. Berlin: Beuth Verlag.

Kapitel 5

Österreichischer Verband für Elektrotechnik (OVE), „Blendung durch Photovoltaikanlagen - OVE-Richtlinie R 11-3“. 2016.

Jurado-Piña R, Mayora JMP. „Methodology to Predict Driver Vision Impairment Situations Caused by Sun Glare“. Transportation Research Record. 2009;2120(1):12–17. doi:10.3141/2120-02.