

Gutachten zur Blendwirkung des geplanten Agri-PV Projekts „Gramschatz“

Constantin Klyk

Agri-PV Consulting

Jörg Zürn Str. 22

88339 Bad Waldsee

constantinklyk@agri-pv-consulting.de



1.	Einleitung.....	2
1.1.	Ziel und Zweck des Gutachtens	2
1.2.	Anlagenbeschreibung	2
1.3.	Umgebungsbeschreibung	3
1.4.	Methodisches Vorgehen.....	4
2.	Technische Beschreibung der Anlage.....	5
2.1.	Funktionsprinzip einachsiger Tracker.....	5
2.2.	Nachführmechanik und Backtracking-Algorithmus	5
3.	Physikalische Grundlagen der Reflexion.....	7
3.1.	Reflexionsgesetz.....	7
3.2.	Charakteristik der Moduloberflächen.....	7
3.3.	Wirkung von Anti-Reflex-Beschichtungen.....	7
4.	Normative Rahmenbedingungen.....	9
4.1.	Rechtliche Grundlagen.....	9
4.2.	LAI-Leitfaden: Blendwirkung von PV-Anlagen	9
5.	Software	11
6.	Blendwirkung auf Schützenswerte Infrastruktur.....	12
6.1.	Blendwirkung auf Gebäude	12
6.2.	Blendwirkung auf Verkehrswege	13
6.3.	Analyse der Ergebnisse	14
7.	Gesamtbewertung der Blendwirkung	19
7.1.	Empfehlungen	19
7.2.	Schlussfolgerung	19
8.	Haftungsausschluss.....	20
9.	Grundlegende Annahmen in der Software ForgeSolar	21
10.	Literaturverzeichnis	23

1. Einleitung

1.1. Ziel und Zweck des Gutachtens

Ziel dieses Gutachtens ist es, die mögliche Blendwirkung einer einachsig nachgeführter Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) mit einer Nord-Süd-orientierten Achse für das Projekt Gramschatz 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 Projektes. Es soll die Grundlage für die Einschätzung bieten, ob zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung oder Begrenzung von Blendwirkungen erforderlich sind.

1.2. Anlagenbeschreibung

Die geplante PV Anlage weist folgende Eigenschaften auf:

Parameter	Angabe/Wert
Geokoordinaten (Breite, Länge)	49° 56' 4.73"N, 9° 58' 1.35"E
Art der Anlage	Agri-PV Freiflächenanlage
Modultyp	Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung
Aufständigung	Einachsig nachgeführt mit Backtracking
PV-Fläche	Ca. 26 ha
Nennleistung (DC)	Ca 17 MW
Achsausrichtung (Azimut)	PV Feld 1: 143° und PV Feld 2 und 3: 159°
Höhe Drehachse	2,8m
Ground Cover Ratio	0,34



Abbildung 1 Satellitenbild der Umgebung mit Geplanten Anlagenteilen

1.3. Umgebungsbeschreibung



Abbildung 2 Draufsicht auf die Geplante PV Anlage sowie in die Untersuchung einbezogene Objekte

Umgebungsbeschreibung

Im Umfeld des geplanten Anlagenstandortes befinden sich mehrere potenziell relevante Objekte, bei denen im Rahmen der Blendbewertung geprüft wurde, ob eine visuelle Beeinträchtigung durch reflektiertes Sonnenlicht auftreten kann. Zur Analyse wurden in allen Himmelsrichtungen jeweils die nächstgelegenen Strukturen und Verkehrswege berücksichtigt:

- **Westlich** der Anlage verläuft in einem **Mindestabstand von ca. 130 m** die **Arnsteiner Straße**. Aufgrund ihrer Verkehrsfunktion wurde sie in die blendtechnische Untersuchung einbezogen.
- **Südlich** von **PV-Feld 1** befindet sich die **Retzstädter Straße**, in einem Abstand von etwa **164 m**. Auch dieser Verkehrsweg wurde im Rahmen der Blendbewertung berücksichtigt.
- Auch **Südlich** in einer Entfernung von ca. **236m** befindet sich eine Gruppe von Wohnhäusern. Diese Gruppe wird als **Schützenswertes Gebäude** betrachtet und in die Untersuchung mit einbezogen. Abbildung 5 zeigt, dass das höchste Gebäude zwei Geschosse hat. Es wird mit einer Höhe von 10m angenommen. Das höchste Fenster liegt etwas niedriger bei ca. 8m.
- Ebenfalls **südlich**, in einer Entfernung von rund **124 m**, befindet sich eine gemäß Abbildung 4 **landwirtschaftlich genutzte Scheune**. Aufgrund der Nutzung und der Entfernung > 100m wurde dieses Objekt als **nicht relevant** für die Blendbewertung eingestuft.

- **Östlich** liegt in nur **22 m Abstand** eine weitere **Scheune**, die gemäß Abbildung 3 ebenfalls als **nicht blendrelevant** bewertet wurde. Hierbei handelt es sich um ein unbewohntes Wirtschaftsgebäude ohne schutzwürdige Nutzungen.



Abbildung 3 Scheune im Westen



Abbildung 4 Scheune im Süden



Abbildung 5 Gruppe von Wohnhäusern

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.

Das Gutachten wird abschließend eine schlüssige Gesamtbewertung der Blendwirkung liefern und Schlussfolgerungen zur Relevanz oder Unbedenklichkeit von reflektiertem Licht bei der betrachteten Anlagentechnik ziehen.

2. Technische Beschreibung der Anlage

2.1. Funktionsprinzip einachsiger Tracker

Ein einachsig 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.

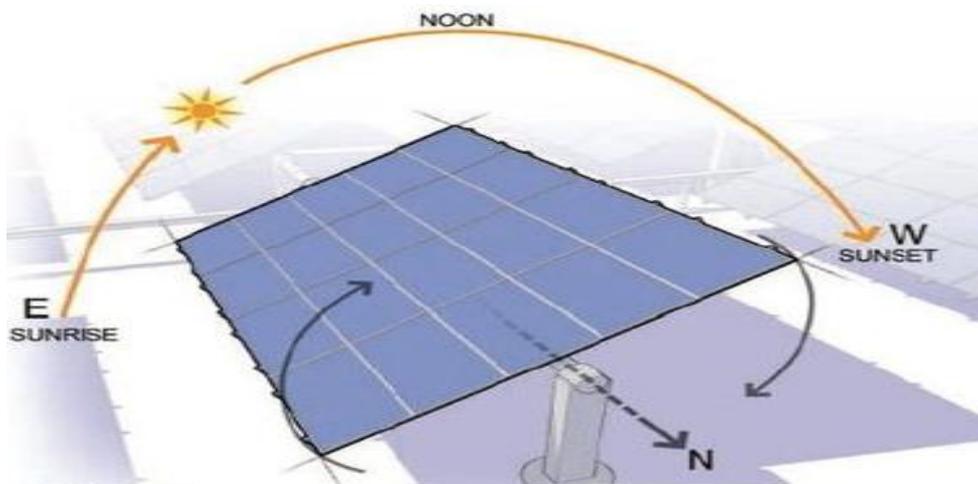


Abbildung 6 Die Abbildung zeigt die Position eines einachsigen PV-Trackers im Tagesverlauf: morgens nach Osten geneigt, mittags horizontal, abends nach Westen. So wird die Sonneneinstrahlung über den Tag hinweg optimal genutzt.

2.2. Nachführmechanik und Backtracking-Algorithmus

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

1. **Astronomische Nachführung:**
 - Integrierte automatische Berechnung der Sonnendaten (Sonnenhöhe und Azimut) basierend auf Datum, Uhrzeit, Breiten- und Längengrad.
 - Stetige Positionskorrektur der Trackerachse im definierten Rotationsbereich ($\pm 60^\circ$).

2. 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°, 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.

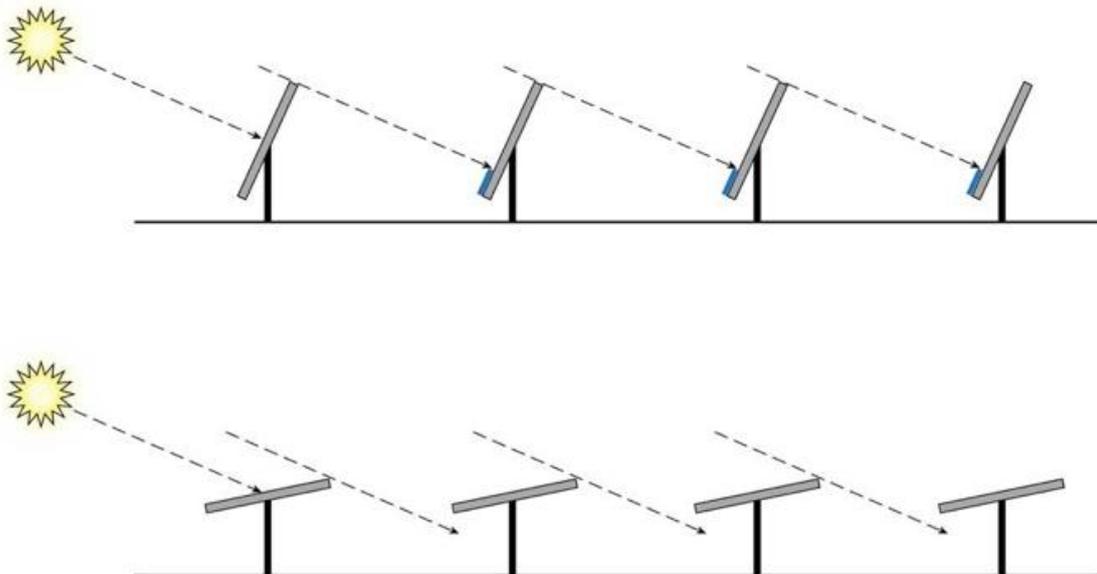


Abbildung 7 Die obere Darstellung zeigt eine PV-Anlage mit einachsigen Trackern bei tiefstehender Sonne ohne Backtracking. Durch das reine astronomische Nachführen verschatten sich die Modulreihen gegenseitig, was zu Ertragsverlusten führt. Die untere Darstellung zeigt dieselbe Anlage mit aktiviertem Backtracking. Die Tracker neigen sich weniger stark, wodurch Verschattung vermieden und der Gesamtertrag optimiert wird – trotz eines suboptimaleren Einstrahlungswinkels.

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.

3. 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. Abbildung 8 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.

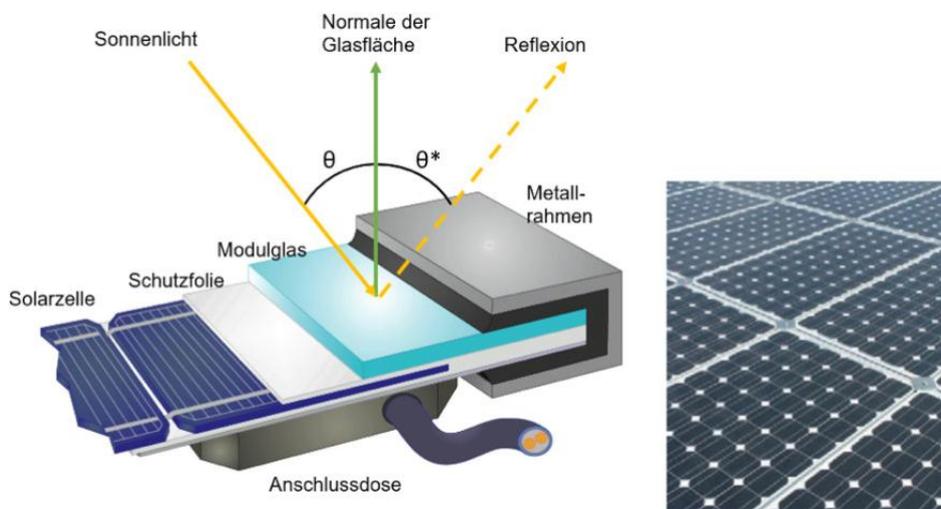


Abbildung 8 Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“

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.



Abbildung 9 Die Abbildung vergleicht die Lichtreflexion an glattem (mitte-rechts) und texturiertem (mitte-links) Modulglas. Glatte Oberflächen zeigen eine gerichtete, stark blendende Spiegelreflexion, während texturiertes Glas das Licht diffus streut und die Blendwirkung deutlich reduziert. Aufnahme: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

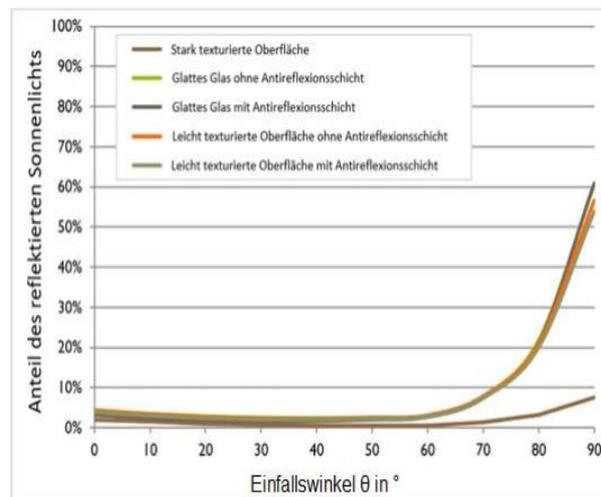


Abbildung 10 ergänzt diese Darstellung und zeigt den Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit vom Einfallswinkel für verschiedene Modulglas-Typen. Deutlich wird, dass mit zunehmendem Einfallswinkel (flacher Sonnenstand) die Reflexionsverluste - insbesondere bei glattem Glas - stark ansteigen.

4. 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/m² 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.

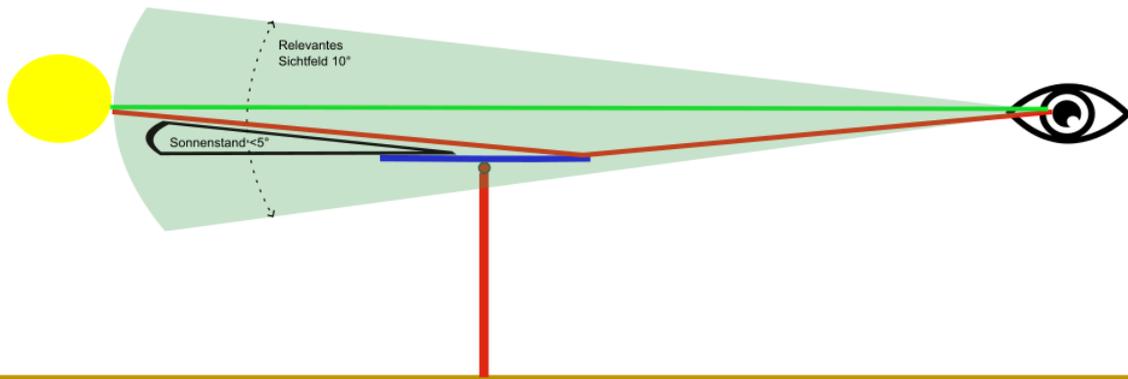


Abbildung 11 zeigt eine typische Situation bei sehr flachem Sonnenstand (Sonnenhöhe $< 5^\circ$). In diesem Winkelbereich wird die mögliche Blendwirkung durch Reflexion an der PV-Moduloberfläche von der deutlich dominanteren direkten Sonnenblendung überlagert. Befindet sich der Winkel zwischen der reflektierten Strahlrichtung und der direkten Sonneneinstrahlung unter 10° , ist die Reflexion visuell kaum vom direkten Sonnenlicht zu unterscheiden. In solchen Fällen verliert die durch die PV-Anlage verursachte Blendung an Relevanz und kann in der Bewertung als vernachlässigbar eingestuft werden.

Der Leitfaden empfiehlt die Verwendung vereinfachter Prüfmethode(n) (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.

5. 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 Blendefahr durch reflektiertes Sonnenlicht an PV-Anlagen durchgesetzt und erfüllt unter anderem Anforderungen der Federal Aviation Administration (FAA) sowie europäischer und internationaler Regelwerke.

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.

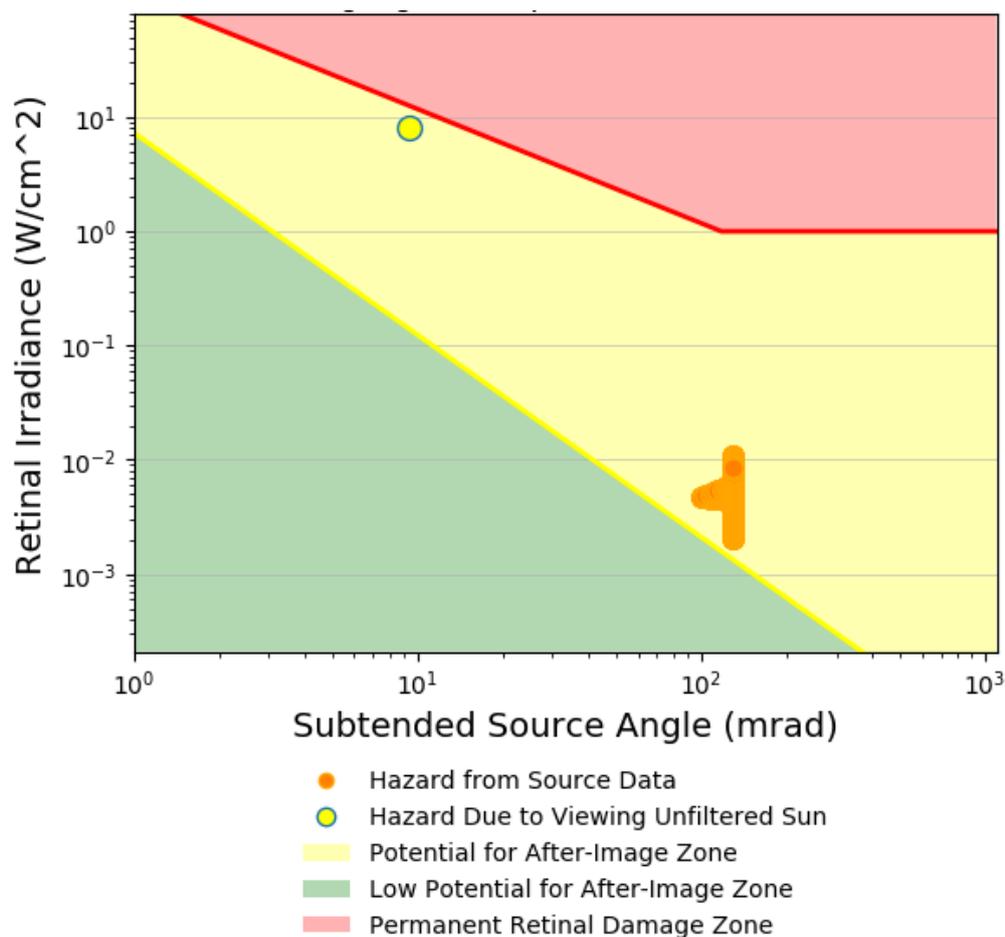


Abbildung 12 Beispielhafte Ergebnisdiagramme, die die jährliche Blenddauer und die Auswirkungen jeder Minute Blendung auf das Auge anzeigen

6. Blendwirkung auf Schützenswerte Infrastruktur

6.1. Blendwirkung auf Gebäude

Methodik zur Bewertung der Blendwirkung auf Gebäude

Die Bewertung potenzieller Blendwirkungen auf umliegende Gebäude einschließlich zugehöriger Freiflächen (Terrassen, Balkone) orientiert sich am LAI-Leitfaden „Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen“

Schutzbedürftige Immissionsorte

Nach LAI zählen zu den schutzbedürftigen Räumen diejenigen Innen- und Außenflächen, welche eine besondere Aufenthaltsfunktion erfüllen:

- **Wohnräume**
- **Schlafräume**, darunter auch Gästeräume in Beherbergungsbetrieben sowie Patientenzimmer in Krankenhäusern und Sanatorien
- **Unterrichtsräume** in Schulen, Hochschulen und vergleichbaren Bildungseinrichtungen
- **Arbeitsräume**, hierzu gehören Büroräume, Praxis- und Schulungsräume
- **Angrenzende Außenflächen** wie Terrassen und Balkone, sofern sie direkt an schutzbedürftige Räume anschließen

Räumlicher Geltungsbereich

Gemäß LAI kann bei einem Abstand von mehr als **100 m** zwischen PV-Anlage und Immissionsort von vernachlässigbaren Blendbelastungen ausgegangen werden.

Modellansatz und Terminologie

- **Kernblendung:** Simulation eines ideal verspiegelten Moduls ohne Anti-Reflex-beschichtung gemäß LAI-Vereinfachungsmodell, bei dem das Sonnenlicht vollständig gerichtet reflektiert wird.

Dieser Fall kann als Worst-Case Szenario betrachtet werden, und ist somit für alle Fälle anwendbar.

Ausschlusskriterium für unwesentliche Reflexionen

Reflexionen, die am Immissionsort im Winkel von $\leq 10^\circ$ zur direkten Sonneneinstrahlung eintreffen, gelten aufgrund der Überlagerung mit dem direkten Sonnenlicht nicht als relevante Blendung.

6.2. Blendwirkung auf Verkehrswege

Methodik der Blendbewertung

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 (LKW-, PKW- und Lokführer) orientieren. Dabei wird unterstellt, dass die Blickrichtung der jeweiligen Fahrtrichtung entspricht und das relevante Sehfeld um 50° geöffnet ist. Die Einteilung erfolgt wie folgt:

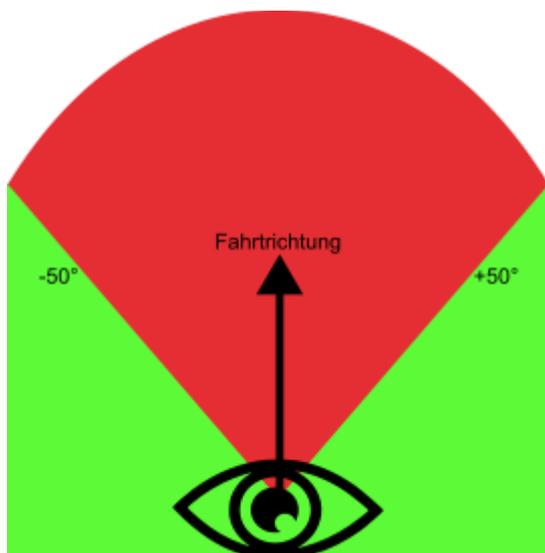


Abbildung 13 Als relevant eingedorder Sehbereich

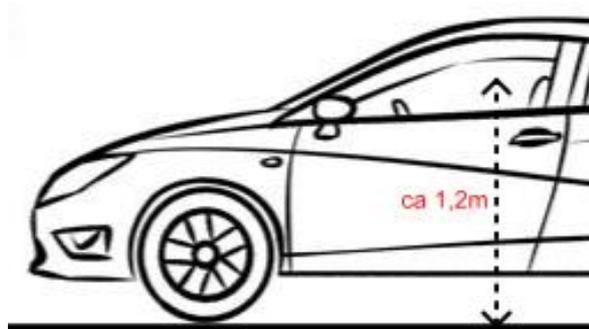


Abbildung 14 Sichtfeldhöhe eines Autofahrers

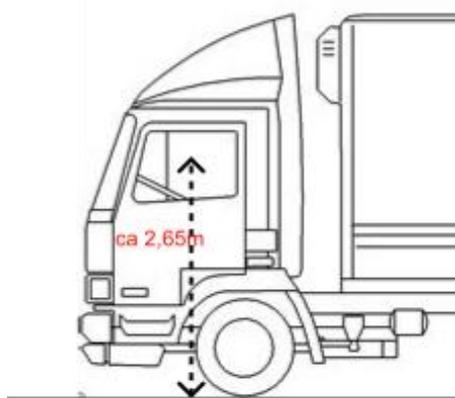


Abbildung 15 Sichtfeldhöhe eines LKW Fahrers

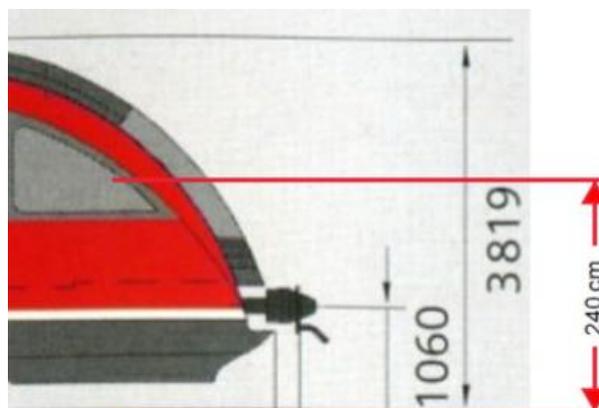


Abbildung 16 Sichtfeldhöhe eines Triebwagenführers der Bahn

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

6.3. Analyse der Ergebnisse

Schutzbedürftige Räume

Wie in Kapitel 1.3 ausführlich dargelegt, befinden sich im relevanten Untersuchungsraum der geplanten Photovoltaikanlage schutzwürdige Aufenthaltsräume im Sinne der technischen Regelwerke und einschlägigen Richtlinien. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Gruppe von Wohngebäuden im südlichen Bereich des Projektstandorts (vgl. Abbildung 5), für die im Rahmen der Blendanalyse potenzielle Reflexionen ermittelt wurden.

Die durch die Simulation mit ForgeSolar festgestellten Blendereignisse werden jedoch aufgrund zweier wesentlicher Kriterien als **nicht erheblich** im Sinne der geltenden Bewertungsmaßstäbe eingestuft:

1. Dauer und Häufigkeit:

Die Blendereignisse treten – wie in Abbildung 18 dargestellt – an den betreffenden Tagen jeweils für weniger als 30 Minuten pro Tag auf.

Die aggregierte Jahresdauer beträgt lediglich 440 Minuten und liegt somit deutlich unterhalb des allgemein anerkannten Richtwerts von 1.000 Minuten pro Jahr (vgl. Abbildung 17, Darstellung der Verteilung über Tage und Tageszeiten).

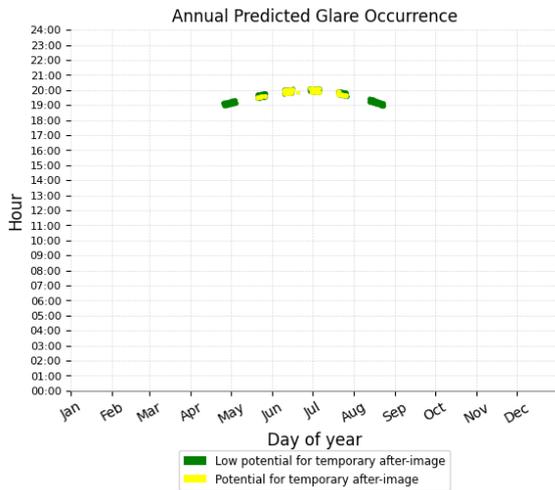


Abbildung 17 Tage mit Blendereignis

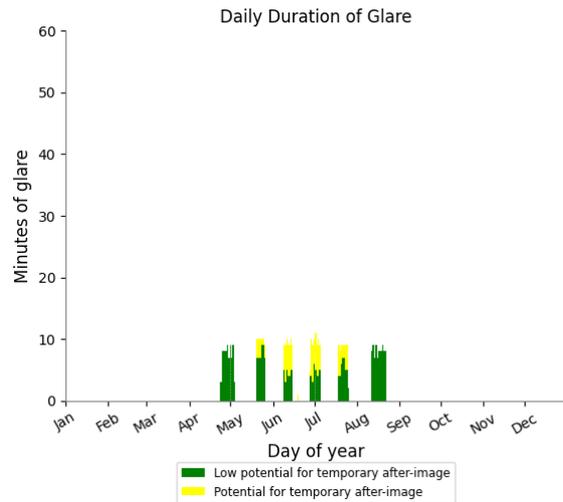


Abbildung 18 Dauer der Blendereignisse pro Tag

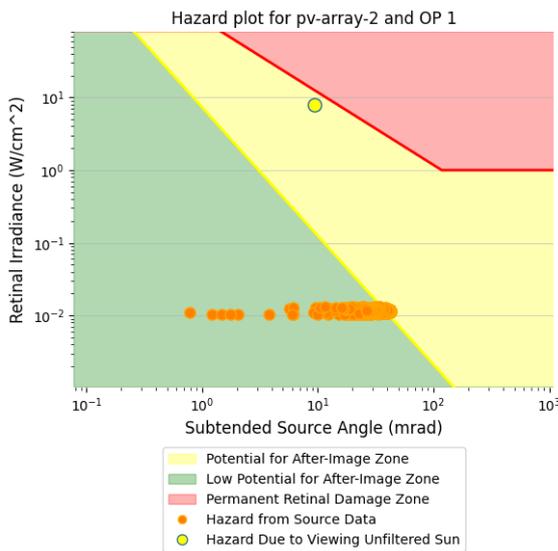


Abbildung 19 Intensität der Blendereignisse

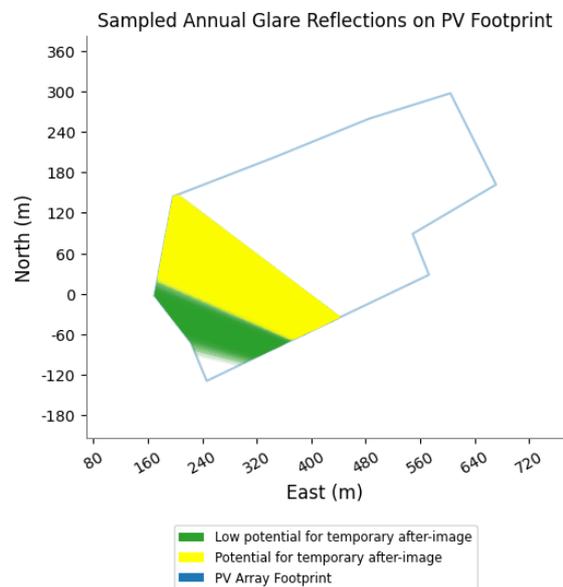


Abbildung 20 Ursprung der Blendereignisse

2. Intensität und Überstrahlung durch Direktstrahlung:

Sämtliche Blendereignisse treten zu Zeitpunkten auf, bei denen die Sonnenhöhe $\leq 5^\circ$ liegt (vgl. Abbildung 22).

Gleichzeitig bleibt der Winkel zwischen Sonnenstandsvektor und Reflektionsrichtung stets unter 10° (vgl. Abbildung 21).

Unter diesen Bedingungen ist davon auszugehen, dass die jeweilige Blendung durch die direkte Sonneneinstrahlung überlagert bzw. überstrahlt wird und somit keine zusätzliche visuelle Belastung entsteht.

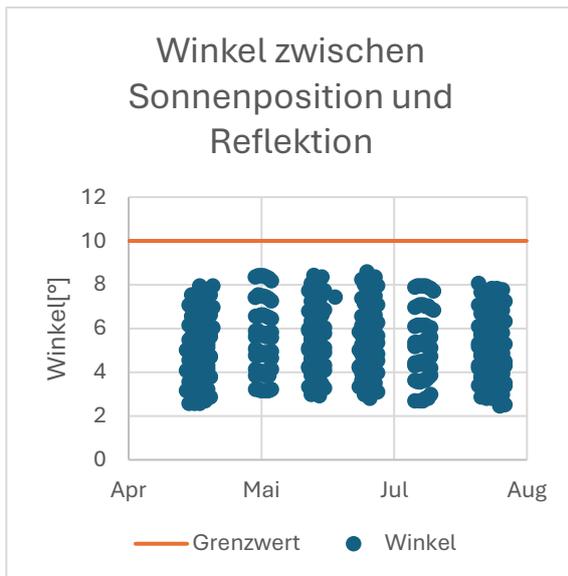


Abbildung 21 Winkel zwischen Sonnenvektor und Reflektionsvektor

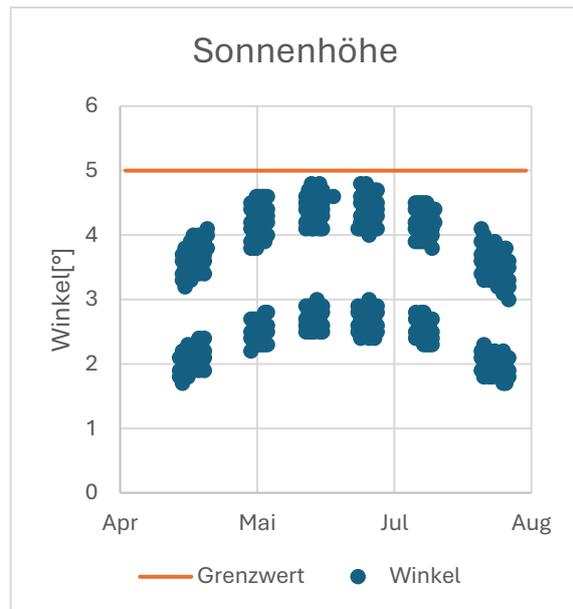


Abbildung 22 Sonnenhöhe an Tagen mit Blendereigniss

Verkehrswege

Schienen

Wie in Kapitel 1.3 dargelegt, verlaufen im näheren Umfeld der geplanten Photovoltaikanlage keine schienengebundenen Verkehrswege. Eine Überprüfung georeferenzierter Daten hat ergeben, dass weder Bahnstrecken des Personen- oder Güterverkehrs noch sonstige infrastrukturell relevante Gleisanlagen innerhalb des potenziellen Einflussbereichs der Anlage vorhanden sind. Damit sind im Hinblick auf mögliche Blendwirkungen keine Auswirkungen auf den schienengebundenen Verkehr zu erwarten, und eine weiterführende Bewertung in diesem Zusammenhang ist nicht erforderlich.

Straßen

Wie in Kapitel 1.3 dargestellt, befinden sich in der Umgebung der geplanten Photovoltaikanlage zwei relevante Straßenabschnitte, die im Rahmen der Blendbewertung berücksichtigt wurden. Die Simulationen mit der Software ForgeSolar ergaben, dass von PV-Feld 1 und PV-Feld 3 zu keinem Zeitpunkt relevante Blendwirkungen auf die betrachteten Verkehrswege ausgehen.

Im Fall von PV-Feld 2 wurde im Rahmen der Simulation eine reflektierende Situation mit möglicher Blendung identifiziert.

Abbildung 23 stellt die Kalendertage dar, an denen im Rahmen der Simulation potenziell eine Blendung auftreten könnte. Abbildung 24 zeigt die jeweilige Blenddauer an den betroffenen Tagen, während Abbildung 25 die Intensität der berechneten Reflexionen veranschaulicht.

Von der potenziellen Blendwirkung betroffen wäre ein **Teilabschnitt der Arnsteiner Straße (St2294)** (vgl. Abbildung 26), wobei sich die Beeinträchtigung auf bestimmte Zeifenster mit niedriger Sonnenhöhe beschränkt. Die Auswertung erfolgt dabei auf Grundlage der ForgeSolar-Simulation unter Berücksichtigung definierter Beobachtungspunkte entlang des Straßenverlaufs.

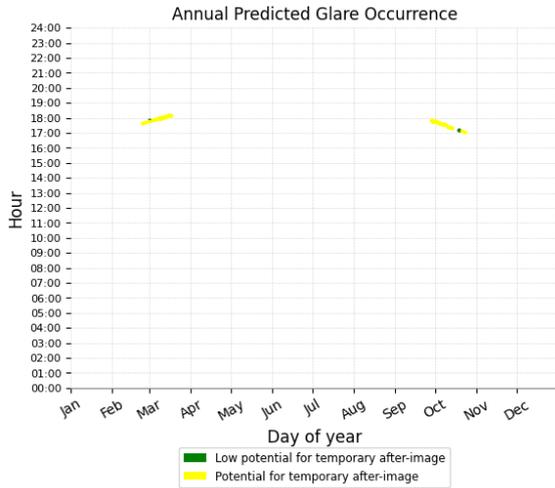


Abbildung 23 Tage Im Jahr mit möglicher Blendung

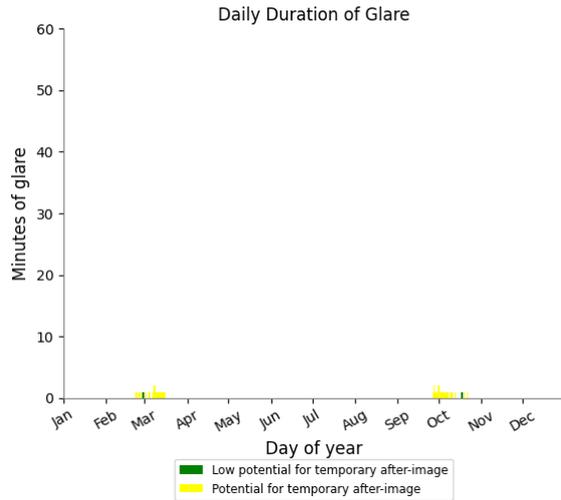


Abbildung 24 Dauer der möglichen blendung an den beschriebenen Tagen

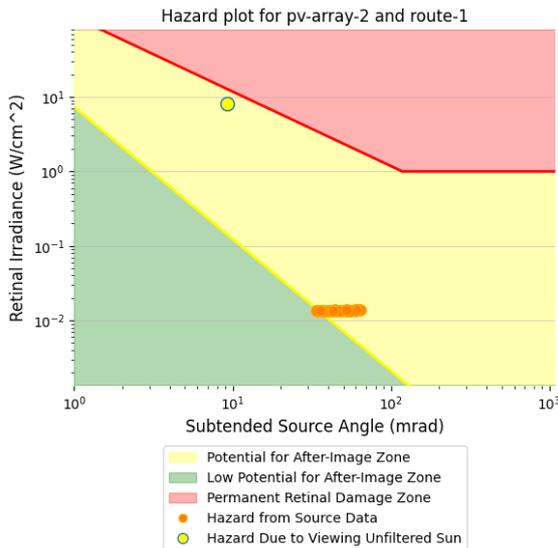


Abbildung 25 Stärke der beschriebenen Blendung an den beschriebenen Tagen

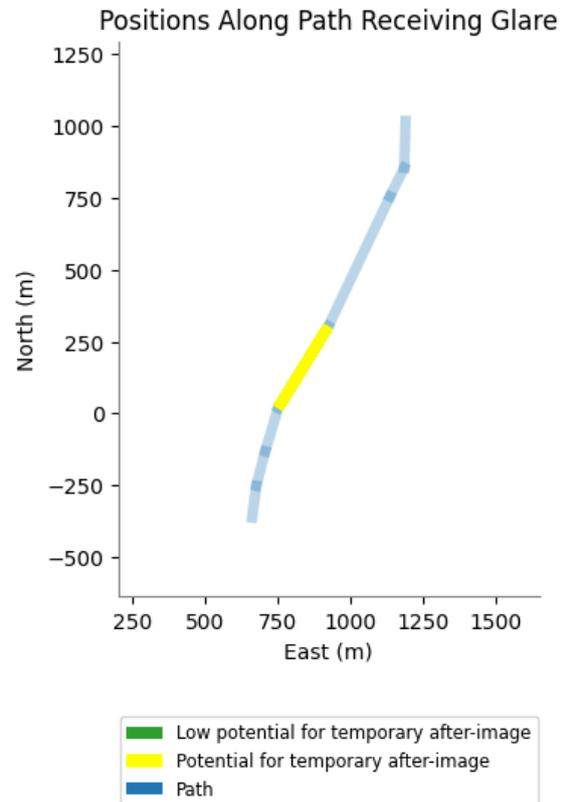


Abbildung 26 Teil der Route, die von der möglichen Blendung betroffen wäre

Die tieferegreifende Analyse zeigt jedoch, dass diese **Reflexion als nicht relevant einzustufen** ist. Der Winkel zwischen direkter Sonneneinstrahlung und Reflexionsrichtung liegt in allen berechneten Fällen unterhalb von 2°, während der Sonnenhöhenwinkel gleichzeitig stets ≤ 2° beträgt. Abbildung 27 und Abbildung 28 veranschaulichen den Einfallswinkel der Sonnenstrahlung und die Verhältnisse zwischen dem Winkel zwischen Reflexion und direkter Sonneneinstrahlung.

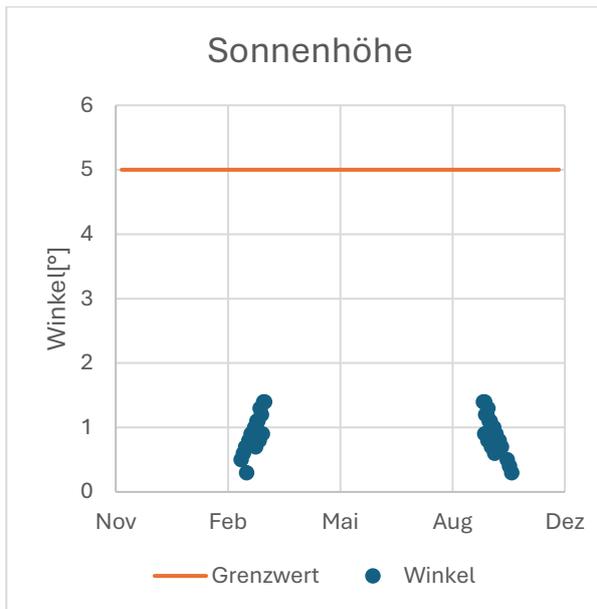


Abbildung 27 Sonnenhöhe für alle Blendereignisse im Jahr

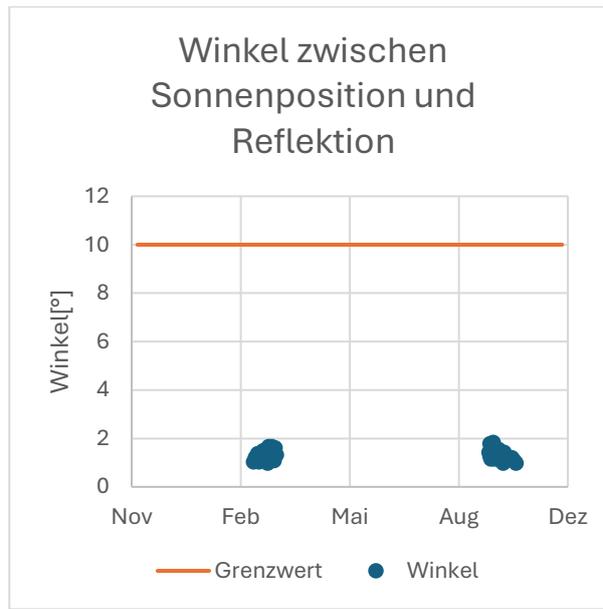


Abbildung 28 Winkel zwischen Sonnenpositionsvektor und Reflektionsvektor für alle Blendereignisse im Jahr

Zur Einordnung der Relevanz dieser Reflexion wird auf die im LAI-Leitfaden (Länderausschuss für Immissionsschutz) genannten Bewertungskriterien Bezug genommen. Demnach gelten Blendungen als nicht erheblich, wenn:

- der Winkel zwischen Reflexionsrichtung und direkter Sonneneinstrahlung weniger als 10° beträgt und
- der Sonnenhöhenwinkel gleichzeitig unter oder gleich 5° liegt.

Diese beiden Kriterien sind im vorliegenden Fall durchgängig erfüllt. Somit kann die festgestellte Reflexion aus Anlagenteil 2 gemäß den Bewertungsmaßstäben als **nicht relevant** eingestuft werden.

7. Gesamtbewertung der Blendwirkung

In diesem Kapitel werden die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse zur Blendwirkung der geplanten Photovoltaikanlage des Projekts *Gramschatz*, bestehend aus **einachsigen nachgeführten Modulen mit Nord-Süd-Ausrichtung**, zusammengeführt und abschließend bewertet.

7.1. Empfehlungen

Auf Grundlage der durchgeführten Blendanalysen mit der Software ForgeSolar ergeben sich **keine Hinweise auf relevante visuelle Beeinträchtigungen** für die betrachteten Verkehrswege, Gebäude oder sonstigen potenziell betroffenen Objekte im Umfeld der Anlage.

Daher sind **keine Anpassungen oder Änderungen an der derzeit vorliegenden Planung** erforderlich, um Blendwirkungen auf sensible Nutzungen oder öffentliche Infrastrukturen zu vermeiden.

7.2. Schlussfolgerung

Für das Vorhaben kann mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden, dass es zu einer **relevanten oder unzumutbaren Blendwirkung** auf die in **Kapitel 1 benannten schutzwürdigen Objekte** kommt. Die Anlage erfüllt somit die geltenden Anforderungen im Hinblick auf visuelle Emissionen, insbesondere im Kontext der Blendwirkung durch reflektiertes Sonnenlicht.

8. 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.

Angefertigt von

Constantin Klyk

Unterschrift



9. 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.

Analyseergebnisse (Daten und Grafiken) werden serverseitig für zwei Jahre gespeichert. Eine lokale Sicherung ist erforderlich, wenn eine längerfristige Archivierung gewünscht ist.

Die geometrische Abbildung des PV-Systems erfolgt vereinfachend. Detaillierte Merkmale wie Modulabstände, unterschiedliche Höhen im Array oder Trägerstrukturen werden nicht explizit berücksichtigt. Dennoch wurde das Modell erfolgreich anhand realer Anlagenstandorte, u. a. in Manchester-Boston und Albuquerque, validiert.

In Version 1 (V1) der Analyse erfolgt die Berechnung teilweise auf Basis des Schwerpunkts (Centroid) des PV-Feldes und nicht des tatsächlichen Reflexionspunkts. Dies kann bei großen Anlagengrößen zu Abweichungen führen, insbesondere bei Pfad-basierten Beobachtungspunkten. Eine Unterteilung in Sub-Arrays kann hier zusätzliche Genauigkeit bieten.

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.

10. 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.

R. Jurado-Piña und J. M. P. Mayora, „Methodology to Predict Driver Vision Impairment

Situations Caused by Sun Glare“, *Transportation Research Record*, Bd. 2120, Nr. 1, S. 12–17, Jan. 2009, doi: 10.3141/2120-02.