

[Dipl.-Ing. \(FH\) Marco Wilke](#) | [Mathias Röper, M. Eng.](#) | [Dr.-Ing. Stefan Bofinger](#) | [Max Krug, St. g. Techniker](#)

SONNWINN

Netzwerk unabhängiger Gutachter für Photovoltaik und Stromspeicher

BLENDGUTACHTEN

PVA BRUNNTHAL

VERSION 1.4

Bearbeitet:

Sachverständiger für Photovoltaik
Mathias Röper, M. Eng.

Achter de Schün 1
D-25436 Moorrege
+49 4122 509100
mathias.roeper@sonnwin.de
www.sonnwin.de

Moorrege, 14.11.2024

Revisionsstabelle

| Version | Änderung | Datum | Name |
|---------|--|------------|---------------|
| 1.4 | Aktueller Belegungsplan berücksichtigt (entsprechend wurden die Abbildungen angepasst) | 14.11.2024 | Mathias Röper |
| 1.3 | Definierte Maßnahmen bzgl. Blendwirkungen auf die A 99 (Diskussion und Zusammenfassung); Höhe Moduloberkante; Redaktionelle Änderung | 12.11.2024 | Mathias Röper |
| 1.2 | Redaktionelle Änderungen: Formulierungen auf Seite 6; ergänzende Anmerkung in Tabelle 5 (S. 21) | 24.10.2024 | Mathias Röper |
| 1.1 | Neue Ausrichtung der PVA | 02.10.2024 | Mathias Röper |
| 1.0 | Erste Fassung | 29.05.2024 | Mathias Röper |

Das Gutachten ist nur in seiner aktuellen Fassung gültig.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 1.1 | Fragestellung | 3 |
| 1.2 | Haftungsausschluss | 3 |
| 1.3 | Datengrundlage | 3 |
| 1.4 | Übersicht der angewendeten Methodiken | 4 |
| 2 | Anlagenbeschreibung..... | 5 |
| 3 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 6 |
| 4 | Grundlagen | 7 |
| 4.1 | Blendwirkung von Modulen | 7 |
| 4.2 | Berechnung von Reflexionen | 9 |
| 4.3 | Verwendete Software, Annahmen und Limitationen | 9 |
| 5 | Blendwirkungen auf Gebäude (und Pferdekoppel) | 10 |
| 5.1 | Auswertungsmethodik..... | 10 |
| 5.2 | Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA..... | 11 |
| 5.3 | Observationspunkte | 13 |
| 5.4 | Ergebnisse..... | 14 |
| 6 | Blendwirkungen auf Verkehrswege | 15 |
| 6.1 | Auswertungsmethodik..... | 15 |
| 6.2 | Relevante Verkehrswege | 17 |
| 6.3 | Observationspunkte | 18 |
| 6.4 | Topografische Zwischenbetrachtung..... | 19 |
| 6.5 | Berücksichtigte Waldfläche | 20 |
| 6.6 | Ergebnisse..... | 21 |
| 7 | Diskussion der Ergebnisse | 23 |
| 7.1 | Gebäude und Pferdekoppel | 23 |
| 7.2 | Verkehrswege..... | 23 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 29 |
| | Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT | 30 |

1 Einleitung

Herr Mathias Röper, Sachverständiger für Photovoltaik, wurde beauftragt, die möglichen Blendwirkungen folgender Photovoltaikanlage (PVA) zu untersuchen und zu bewerten:

Table 1: Projektübersicht

| | |
|-------------------------|--|
| Auftraggeber | VISPIRON EPC GmbH & Co. KG |
| Projektname | PVA Brunenthal |
| Adresse | Taufkirchner Str., 85649 Brunenthal |
| Stand der Projektierung | <input type="checkbox"/> Bestand <input type="checkbox"/> Im Bau <input checked="" type="checkbox"/> Planung |

1.1 Fragestellung

Es stellt sich die Frage, ob die Solarmodule der geplanten Photovoltaikanlage Sonnenlicht so reflektieren, dass erhebliche Belästigungen bzw. Beeinträchtigungen für folgende Immissionsorte auftreten können:

- Schutzwürdige Räume (z. B. Wohnräume)
- Straßenverkehr

Dieses Gutachten dient der Beantwortung dieser Frage und stellt dar, ob und mit welcher Häufigkeit belästigende bzw. beeinträchtigende Blendwirkungen auftreten können. Zudem werden die Ergebnisse bewertet.

1.2 Haftungsausschluss

Dieser Bericht wurde ausschließlich für den Gebrauch des Auftraggebers und in dessen Auftrag erstellt. Die Berechnungen und Auswertungen erfolgten nach bestem Wissen und Gewissen. Trotz sorgfältiger Durchführung können Fehler oder Irrtümer nicht vollständig ausgeschlossen werden. Für Folgeschäden, die aus der Nutzung des Gutachtens resultieren, wird keine Haftung übernommen. Die Haftung für Schadensersatz bei grober Fahrlässigkeit oder Vorsatz bleibt unberührt. Bei Weitergabe des Gutachtens an Dritte darf dieses weder verändert noch bearbeitet werden. Eine Haftung gegenüber Dritten, die sich den Inhalt dieses Gutachtens zunutze machen, ist grundsätzlich ausgeschlossen.

1.3 Datengrundlage

Table 2: Verwendete Daten/Informationen und ihre Quellen

| Information/Daten | Quelle |
|---------------------------|---------------------------------|
| Angaben zur geplanten PVA | Auftraggeber |
| Umliegende Vegetation | Google Earth Pro, OpenStreetMap |
| Umliegende Bebauung | |
| Höhendaten (DGM1) | Bayrische Vermessungsverwaltung |

1.4 Übersicht der angewendeten Methodiken

Die Auswertung der Blendwirkungen auf die Immissionsorte wurde entsprechend folgender Tabelle durchgeführt.

Tabelle 3: Methodiken

| Immissionsort | Methodik |
|--|--|
| Schutzbedürftige Räume (Wohnräume, Büros etc.) | Gemäß dem Leitfaden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI-Leitfaden) [1] |
| Verkehrswege | Eigene Auswertungsmethodik (siehe Kapitel 6) |

2 Anlagenbeschreibung

Tabelle 4: Relevante Anlagenparameter

| Parameter | Angabe/Wert |
|--------------------------------|--|
| Geokoordinaten (Breite, Länge) | 48.0305944, 11.6697061 |
| Art der Anlage | Freiflächenanlage |
| Modultyp | Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung |
| Aufständering | Fest aufgeständert |
| PV-Fläche | ca. 4,3 ha |
| Nennleistung (DC) | - |
| Modulausrichtung (Azimut) | ca. 196° Südwest (Norden = 0°) |
| Modulneigung | 20° |
| Höhe Modulunterkante | ca. 0,8 m |
| Höhe Moduloberkante | 3,5 m |



Abbildung 1: Grundriss der PV-Fläche - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im relevanten Umfeld der Photovoltaikanlage (100 m Radius) befinden sich keine schutzwürdigen Gebäude im Sinne des LAI-Leitfadens (wie z. B. Wohngebäude), weshalb erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen nicht zu erwarten sind. Der LAI-Leitfaden definiert erhebliche Blendwirkungen quantitativ. Wenn an einem Immissionsort mehr als 30 Minuten Kernblendung pro Tag und/oder mehr als 30 Stunden pro Jahr auftreten, wird von erheblichen Belästigungen gesprochen. Obwohl sich keine schutzwürdigen Räume im näheren Umfeld befinden (ab einem Abstand von 100 m werden die Grenzwerte i. d. R. eingehalten), wurden Simulationen für die nächstgelegenen Gebäude östlich und südöstlich der Anlage durchgeführt (in diese Richtungen sind Reflexionen möglich). Die Ergebnisse zeigen nur vereinzelt Reflexionen, die als nicht relevante Belästigungen eingestuft werden. Hinzu kommt, dass es sich bei den betroffenen Gebäuden nicht um schutzwürdige Objekte handelt.

Die Auswertung ergab zudem, dass keine Reflexionen in Richtung Nordosten, einschließlich der Pferdeställe und des Siedlungsgebiets an der Waldstraße, auftreten.

Reflexionen in Richtung Osten, Südosten und Südwesten, wo sich theoretisch Pferde auf den Wiesen aufhalten könnten, sind möglich. Da wissenschaftliche Untersuchungen zu möglichen Irritationen bei Pferden durch Reflexionen fehlen, kann dies nicht abschließend bewertet werden. Mittelfristig kann die geplante 5 m hohe Eingrünung Blendwirkungen in diesen Bereichen vollständig verhindern. Die Ställe bleiben stets frei von Reflexionen (ungeachtet der Eingrünung).

Relevante Verkehrswege wie die A 99 und die Taufkirchener Straße wurden ebenfalls untersucht.

Aufgrund eines dichten Waldbereichs und eines blickfesten Vegetationsstreifens zwischen der Autobahn und der Anlage sind keine Reflexionen in Richtung Autobahn zu erwarten (Ist-Zustand).

Vegetationsstreifen zählen jedoch nicht als Sichtschutz (laut Vorgabe des Fernstraßen-Bundesamtes). Daher ist eine geeignete Maßnahme umzusetzen, die im Fall der Rodung bzw. Entfernung des Vegetationsstreifens erhebliche Blendwirkungen auf die A99 verhindert. Nach Abwägung der Situation wurden zwei zielführende Maßnahmen identifiziert: ein hoher Sichtschutzzaun im Nordwesten der PV-Anlage oder der Einsatz blendfreier Solarmodule im Nordwesten der PV-Anlage. Kapitel 7.2.1 stellt die Maßnahmen im Detail dar. Eine der Maßnahmen (oder beide, in diesem Fall als Option) sollte im Bebauungsplan als Bedingung für die Errichtung der PV-Anlage festgelegt werden.

Die Waldfläche im Westen/Südwesten der Photovoltaikanlage wurde als Sichtschutz zwischen der A 99 und der Anlage berücksichtigt. Ohne diese Waldfläche wären störende Reflexionen in Richtung Westen/Südwesten, also zur Fahrbahn der Autobahn, möglich.

Auf der Taufkirchner Straße sind keine Reflexionen zu erwarten. Aufgrund der leichten Südwest-Ausrichtung der Modultische können von der Straße aus keine Modulvorderseiten eingesehen werden. Zusätzlich wird die geplante Eingrünung der PV-Anlage mittelfristig die Sicht von der Straße auf die Anlage einschränken.

Die abschließende Beurteilung obliegt der zuständigen Genehmigungsbehörde.

4 Grundlagen

4.1 Blendwirkung von Modulen

Ein PV-Modul setzt sich aus zahlreichen Solarzellen zusammen, die Sonnenlicht in elektrische Energie umwandeln. Um Stabilität zu gewährleisten und vor Witterungseinflüssen zu schützen, sind die Solarzellen normalerweise hinter einer Glasscheibe (Modulglas) angebracht. Das Modulglas ist maßgeblich für mögliche Blendwirkungen verantwortlich. Da die erzeugte elektrische Energie in direktem Verhältnis zur Intensität der Sonneneinstrahlung auf die Solarzellen steht, bemühen sich Modulhersteller, Reflexionen am Modulglas zu reduzieren – je weniger Reflexionen, desto höher der Ertrag. Daher verfügt das Modulglas typischerweise über eine spezielle Oberflächentexturierung und eine sogenannte Antireflexschicht. Beide Elemente gewährleisten, dass möglichst viel Licht auf die Solarzellen trifft und Reflexionsverluste minimiert werden [2].

Daher reflektieren Solarmodule bei geringen Einfallswinkeln θ (siehe Abbildung 2) lediglich einen kleinen Teil des Sonnenlichts (etwa 5 %). Studien zeigen jedoch, dass trotz Texturierung und Antireflexbeschichtung der Anteil des reflektierten Sonnenlichts mit ansteigendem Einfallswinkel exponentiell zunimmt (siehe Abbildung 3).

Da bereits Reflexionen von weniger als 1 % des Sonnenlichts zu einer Absolutblendung führen können [1], müssen demnach Einfallswinkel berücksichtigt werden.

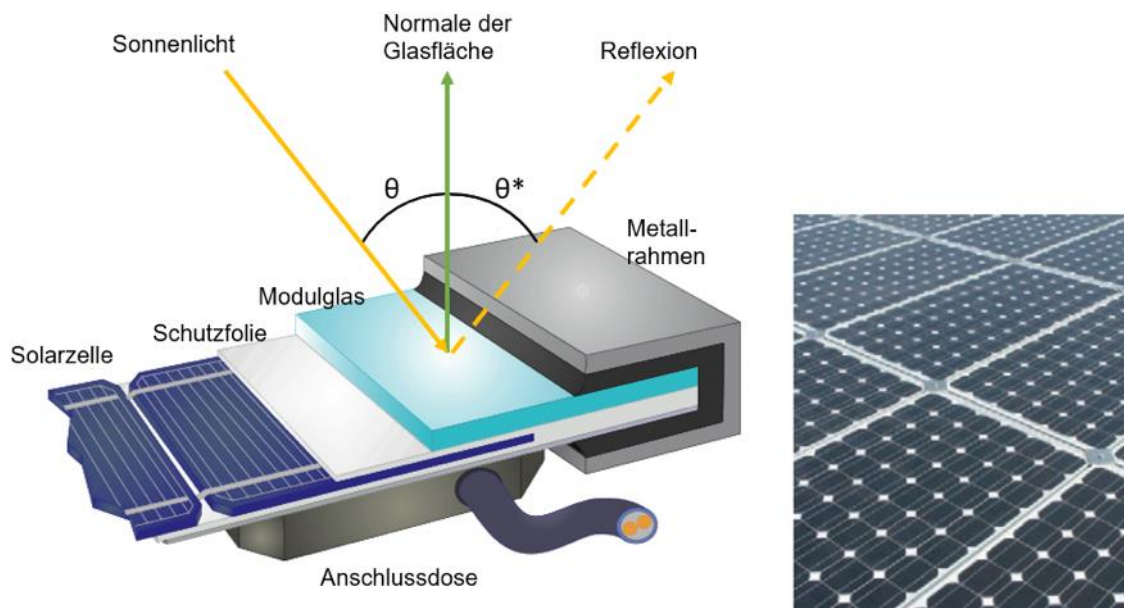


Abbildung 2: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“
- Quelle: [3] (modifiziert)

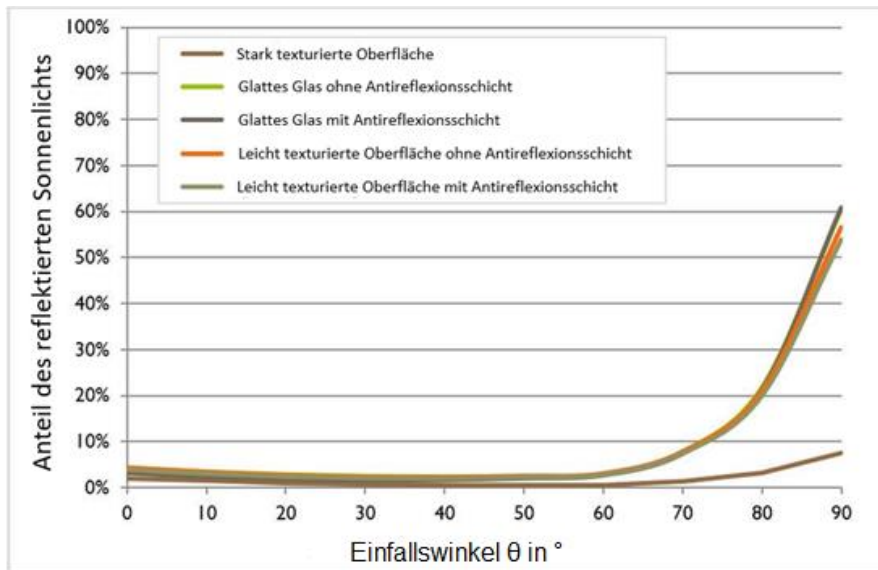


Abbildung 3: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypen - Quelle: [4], modifiziert

Die Oberflächentexturierung des Modulglases bewirkt eine weniger intensive, aber diffuse (gestreute) Reflexion des Sonnenlichts, wodurch der Immissionsort der Reflexion vergrößert wird. Daher sind die Intensitäten von Reflexionen an Solarmodulen nicht mit denen an beispielsweise glatten Fensterscheiben vergleichbar, bei denen das Sonnenlicht gerichteter reflektiert wird. Neue PV-Module verfügen in der Regel über eine Antireflexbeschichtung und zumindest eine leicht texturierte Oberfläche. Dies gilt auch für den später verwendeten Modultyp.



Abbildung 4: Veranschaulichung der Reflexion an einem texturierten Modulglas (mitte-links) und einem glatten Modulglas (mitte-rechts) - Quelle Aufnahme: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

4.2 Berechnung von Reflexionen

Reflexionen an PV-Modulen können geometrisch hergeleitet werden. Hierzu werden die Module, die relevanten Immissionsorte und die Sonne in einem gemeinsamen Koordinatensystem modelliert [1]. Der standortbezogene Sonnenverlauf kann für jeden Zeitpunkt im Jahr auf Basis mathematischer Funktionen ermittelt werden [5]. Durch Winkelbeziehungen und Strahlungsgesetze lässt sich nachvollziehen, wo und wann Blendwirkungen auftreten. Die Berücksichtigung von modulglasspezifischen Streuwinkeln und Reflexionskoeffizienten ermöglicht eine noch präzisere Betrachtung [4].

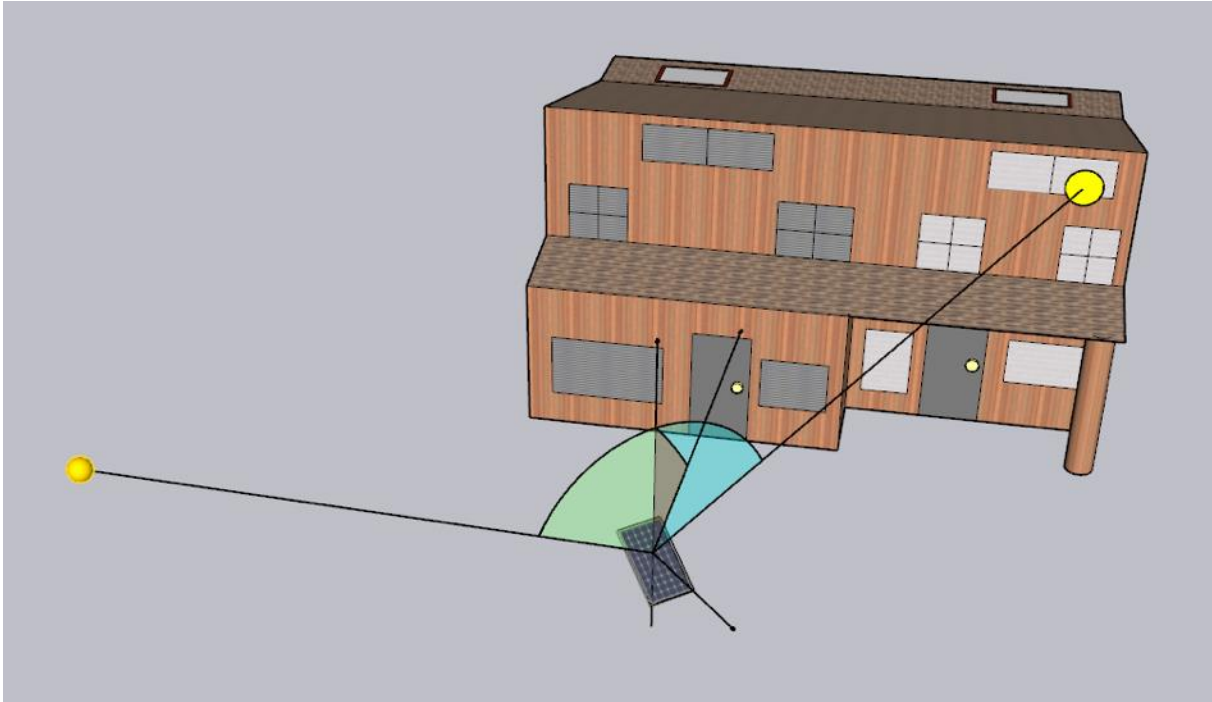


Abbildung 5: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion - Quelle: Eigene Abbildung

4.3 Verwendete Software, Annahmen und Limitationen

Für die Berechnungen der Reflexionen/Blendwirkungen wurde die Software ForgeSolar verwendet. Dabei wurden die Reflexionen/Blendwirkungen der PVA mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute für ein ganzes Jahr berechnet. Die Software basiert auf dem „Solar Glare Hazard Analysis Tool“ (SGHAT) der Sandia National Laboratories. Im Rahmen der Simulation werden die Höhendaten der PV-Fläche sowie der Immissionsorte berücksichtigt. Die Simulation basiert auf der Annahme eines immer klaren Himmels. Demnach wird ein abstrakter Worst-Case betrachtet.

Obwohl ForgeSolar zu den etabliertesten und professionellsten Programmen gehört, um PVA-bedingte Blendwirkungen zu berechnen, kann die Realität nur vereinfacht dargestellt werden. Somit werden die Generatorfelder als Ebenen zusammengefasst, abweichende Modulausrichtungen im Feld (z. B. Modultische, die aufgrund der Topografie eine Neigung entlang der Tischachse besitzen und somit die effektive Ausrichtung der Module beeinflussen) teilweise verloren gehen. Die Limitationen der Software werden nach Möglichkeit durch zusätzliche Berechnungen kompensiert und die Ergebnisse stets validiert. Dennoch können Abweichungen von der späteren Realität nicht ausgeschlossen werden.

Eine weiterführende Auflistung der Annahmen und Einschränkungen bzgl. der Simulation befindet sich in Anhang A.

5 Blendwirkungen auf Gebäude (und Pferdekoppel)

5.1 Auswertungsmethodik

Die Auswertung der Blendwirkungen auf umliegende Gebäude (inkl. Terrassen und Balkone) basiert auf dem Leitfaden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) [1].

Der LAI-Leitfaden benennt als maßgebliche Immissionsorte schutzbedürftige Räume, sofern sie zu einer der folgenden Kategorien gehören:

- 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
- An relevanten Gebäuden anschließende Außenflächen (z. B. Terrassen und Balkone)

Räume, die keiner dieser Kategorien zuzuordnen sind, wurden im Rahmen des Gutachtens nicht auf Blendwirkungen untersucht.

Gemäß dem LAI-Leitfaden gelten (ca.) 100 Meter als räumlicher Grenzwert: Liegt ein Immissionsort weiter als 100 Meter von der PVA entfernt, können erhebliche Belästigungen in der Regel ausgeschlossen werden.

Laut dem LAI-Leitfaden soll zur Ermittlung der Blendzeiten ein vereinfachtes (idealisiertes) Modell verwendet werden, bei dem die Solarmodule als ideal verspiegelte Flächen dargestellt werden. Da eine Spiegelfläche das Sonnenlicht gerichtet reflektiert, findet keine oder nur eine sehr geringe Streuung des Sonnenlichts statt. Je geringer die Streuung, desto kürzer sind die Blendzeiten. In der Simulation wurde jedoch ein realistisches Modell verwendet, das die oberflächenspezifischen Eigenschaften realer Solarmodule berücksichtigt. Um dennoch eine Bewertung nach dem LAI-Leitfaden zu ermöglichen, werden im vorliegenden Gutachten die Blendwirkungen, die lediglich mit dem vereinfachten Modell ermittelt würden, als „Kernblendung“ und die übrigen als „gestreute Reflexion“ bezeichnet und stets differenzierbar dargestellt (sofern relevante Blendwirkungen auftreten).

Zudem sind laut dem Leitfaden Reflexionen, die am Immissionsort mit einem Differenzwinkel $\leq 10^\circ$ zur direkten Sonneneinstrahlung auftreten, nicht als relevante Blendungen zu betrachten. Dies berücksichtigt den Umstand, dass bei tiefstehender Sonne PVA-bedingte Blendwirkungen von der direkten Sonneneinstrahlung überlagert werden.

Laut dem LAI-Leitfadens liegt eine erhebliche Belästigung durch PVA-bedingte Blendwirkungen vor, wenn ein schutzwürdiger Raum mehr als 30 Minuten pro Tag und/oder 30 Stunden (1.800 Minuten) pro Jahr *Kernblendungen* erfährt.

Es hat sich bewährt, in der Simulation nicht jedes einzelne Gebäude in der Umgebung der PVA auszuwerten, sondern lediglich die nächstgelegenen in verschiedenen Himmelsrichtungen. Im Rahmen der Simulation wird darauf geachtet, die potenziell am stärksten betroffenen schutzbedürftigen Räume zu analysieren (Worst-Case-Betrachtung).

In der Simulation werden keine Hindernisse wie Vegetationsstreifen oder Gebäude berücksichtigt. In der Diskussion (Kapitel 7) werden Hindernisse jedoch ggf. berücksichtigt.

5.2 Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA

Ab einem Abstand zwischen Immissionsort (z. B. Wohngebäude) und einer nach (ca.) Süden ausgerichteten PVA von 100 m können erhebliche Belästigungen (i. d. R.) pauschal ausgeschlossen werden [1].

Abbildung 6 veranschaulicht den Bereich, der 100 Meter oder näher an der Photovoltaikanlage liegt.

Es lässt sich feststellen, dass im 100-Meter-Umkreis keine schutzwürdigen Gebäude vorhanden sind. Erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen in schutzwürdigen Räumen können daher ausgeschlossen werden.



Abbildung 6: Übersicht der 100-Meter-Zone - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

Die Pferdeställe befinden sich im Nordosten der PVA. Aufgrund der Ausrichtung der Module nach Südwesten sind Reflexionen in diese Richtung nicht möglich. Die folgende Abbildung zeigt ein 3D-Modell der PVA mit der Kameraposition bei den Ställen. Aus nordöstlicher Richtung werden keine Modulvorderseiten einsehbar sein (und somit keine Blendwirkungen auftreten). Außerdem zeigt die Abbildung die geplante Eingrünung (5 m Maximalwuchshöhe) in transparentem Grün. Mittelfristig wird die Anlage aus dieser Richtung nicht mehr einsehbar sein.

In Richtung Nordosten, insbesondere zu den Ställen, werden daher keine Reflexionen möglich sein.

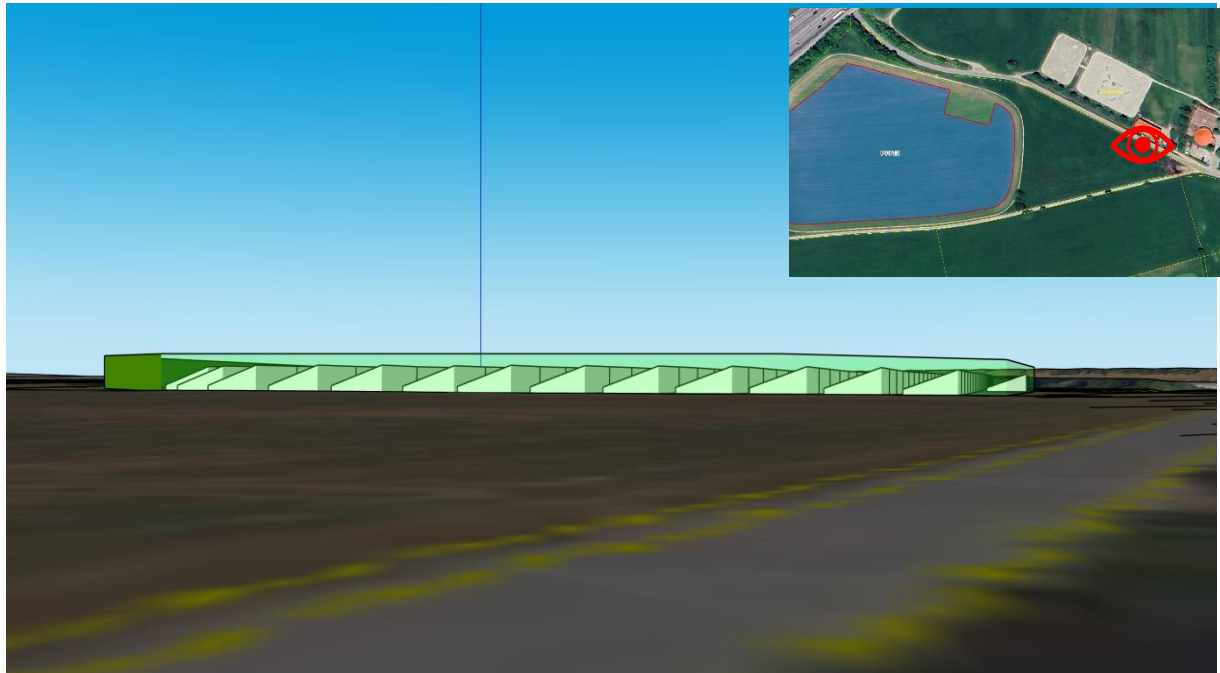


Abbildung 7: 3D-Modell der Anlage mit der Kameraposition bei den Ställen im Nordosten



Abbildung 8: Bereich ohne Reflexionen: Nördlich der roten Linie können keine Modulvorderseiten eingesehen werden. - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

5.3 Observationspunkte

Für die Gebäude östlich/südöstlich der PVA, wo theoretisch Reflexionen auftreten könnten, wurden im Rahmen der Begutachtung 3 Observationspunkte (OP) definiert. Diese OP dienen in der Simulation als Detektorpunkte für einfallende Reflexionen. Die OP wurden einheitlich in einer Höhe von 2 m über der umliegenden Geländeoberkante festgelegt. Alle Gebäude befinden sich in einem Abstand von über 100 m zur PVA, sodass bereits festgestellt werden kann, dass die quantitativen LAI-Grenzwerte eingehalten werden. Die Simulation dient lediglich als Nachweis, dass die Blendwirkungen auf Kirchstockach als unbedenklich einzustufen sind (keine erheblichen Belästigungen).

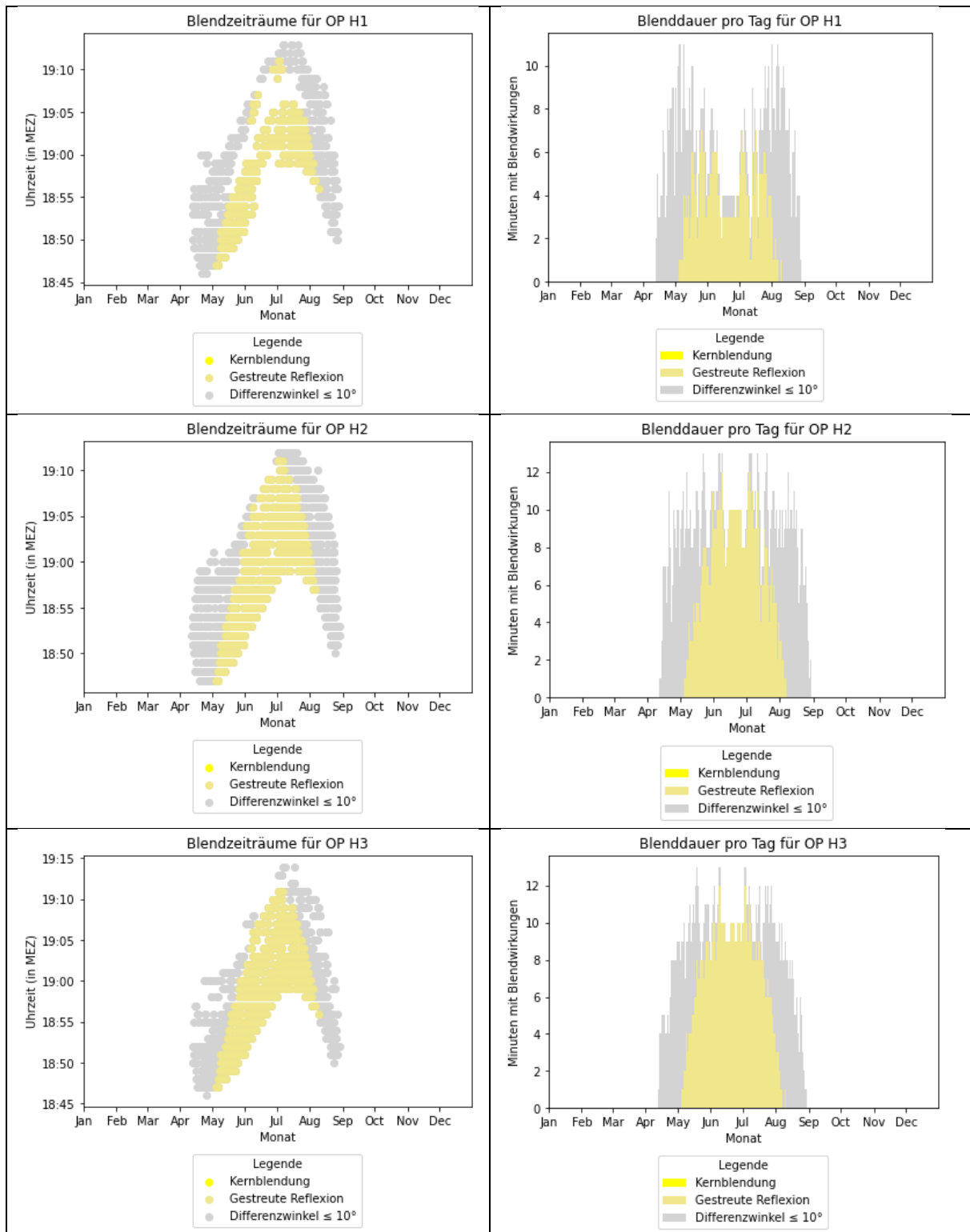


Abbildung 9: Positionen von OP H1 bis H3 - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

5.4 Ergebnisse

Im Rahmen der Simulation konnten keine Kernblendungen an den Gebäuden östlich der PVA ermittelt werden. Insgesamt treten nur vereinzelt Blendwirkungen in den Abendstunden der Sommermonate auf. Es gilt zu beachten, dass die Uhrzeit in den folgenden Diagrammen der deutschen Winterzeit entspricht.

Ergebnisdiagramme 1: Ergebnisse für die OP Hx



6 Blendwirkungen auf Verkehrswege

6.1 Auswertungsmethodik

Vorgaben zur Bewertung der Blendwirkungen von Photovoltaikanlagen auf Verkehrswege (Straßen und Bahnstrecken) sind in keiner Norm, Leitlinie oder sonstigen Regelwerken definiert bzw. standardisiert und werden auch im LAI-Leitfaden nicht thematisiert. Die Bewertung der Blendwirkungen auf die umgebenden Verkehrswege erfolgte daher auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse und etablierter Verfahren, die im Folgenden dargestellt werden.

Zur Beurteilung der Blendwirkungen durch Photovoltaikanlagen auf Verkehrswege ist es gängige Praxis, ein oder mehrere Sichtfelder von Fahrzeugführern (Kraftfahrzeug- und Lokführer) zu definieren, welche sich dann durch ihre Relevanz bezüglich Blendwirkungen unterscheiden. Anschließend wird mittels Simulation geprüft, ob Reflexionen in diesen Sichtfeldern auftreten. Es wird dabei angenommen, dass die Blickrichtung eines Fahrzeugführers mit der Fahrtrichtung übereinstimmt [6].

Es wird zwischen folgenden Sichtfeldern bzw. Sichtfeldgrenzen unterschieden (siehe Abbildung 10 für eine grafische Darstellung):

- **Erheblichkeitsgrenze:** In Anlehnung an [6] und [7] wird eine Erheblichkeitsgrenze von $\pm 30^\circ$, bezogen auf die Fahrtrichtung, definiert. Finden Reflexionen außerhalb dieses Sichtfeldes statt, so führen diese i. d. R. zu keinen erheblichen Beeinträchtigungen.
- **Beeinträchtigungsgrenze:** In Anlehnung an [8] wird zudem eine Beeinträchtigungsgrenze von $\pm 50^\circ$, bezogen auf die Fahrtrichtung, definiert. Finden Reflexionen außerhalb dieses Sichtfeldes statt, so führen diese i. d. R. zu keinen Beeinträchtigungen. Demnach wird diesen Reflexionen im Rahmen des Gutachtens bei normaler Fahrt keine Blendwirkung (im Sinne einer nennenswerten physiologischen Beeinträchtigung) zugeschrieben.
- **Ausnahme Bahnstrecken:** Für Lokführer wird eine gemeinsame Erheblichkeits- und Beeinträchtigungsgrenze von $\pm 30^\circ$ angesetzt.

Für die Analyse der Blendwirkungen auf den Straßenverkehr genügt es, lediglich LKW-Fahrer zu betrachten, da diese höher sitzen als PKW-Fahrer - und höher gelegene Immissionsorte generell stärkeren Blendwirkungen ausgesetzt sind (somit der Worst-Case betrachtet).

Des Weiteren gelten PVA-bedingte Blendwirkungen selbst innerhalb der Erheblichkeitsgrenze als vernachlässigbar (irrelevant), wenn die verursachenden Reflexionen mit einem Differenzwinkel $\leq 10^\circ$ zur direkten Sonneneinstrahlung auftreten und gleichzeitig der Höhenwinkel der Sonne $\leq 5^\circ$ beträgt. Wenn beide Kriterien erfüllt sind, überlagert die Sonne die Blendwirkung der PVA aus der gleichen Richtung (definiert in Anlehnung an [1]) und kann in der Regel nicht mehr durch eine Blende abgeschirmt werden (Annahme). Die Reflexionen der PVA stellen dann keine zusätzliche Beeinträchtigung dar.

In der Simulation werden keine Hindernisse wie Vegetationsstreifen oder Gebäude berücksichtigt. In der Diskussion (Kapitel 7) werden Hindernisse jedoch ggf. berücksichtigt.

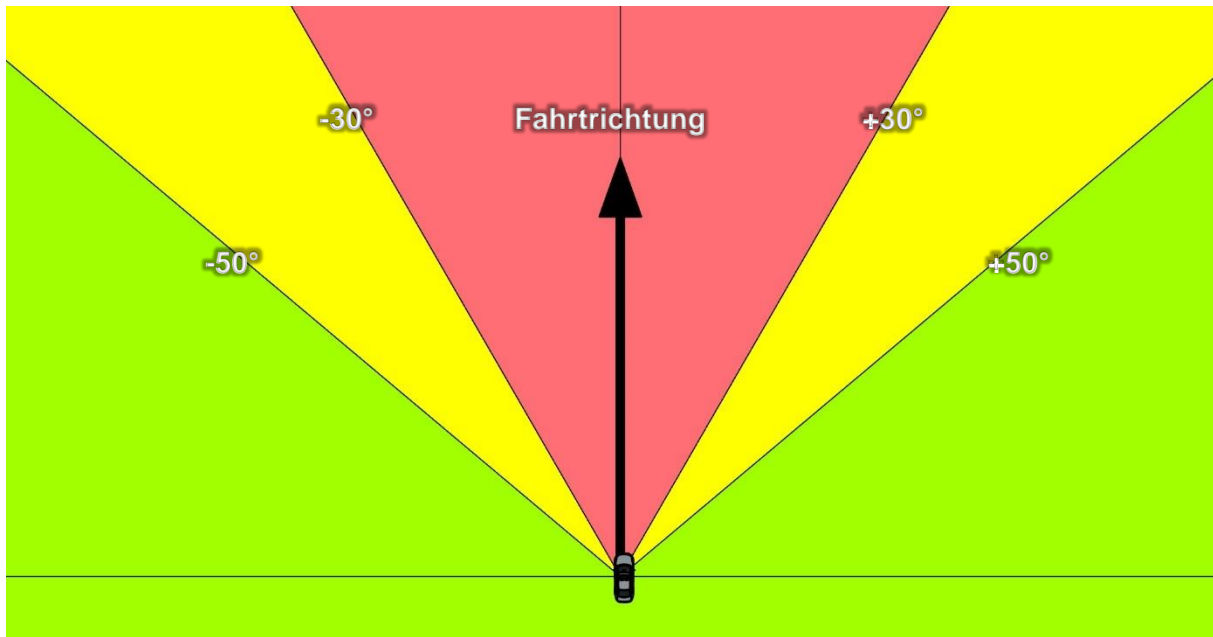


Abbildung 10: Definierte Sichtfelder eines Fahrzeugführers
 – Quelle: Eigene Abbildung Relevante Verkehrswege

Die folgenden Abbildungen zeigen die geschätzten Augenhöhen der Verkehrsteilnehmer. Diese Angaben sind im Rahmen der Simulation relevant (siehe Kapitel 6.3).



Abbildung 11: Augenhöhe der Straßenverkehrsteilnehmer
 – Quelle: Volkswagen AG (modifiziert), BTS GmbH & Co. KG (modifiziert)

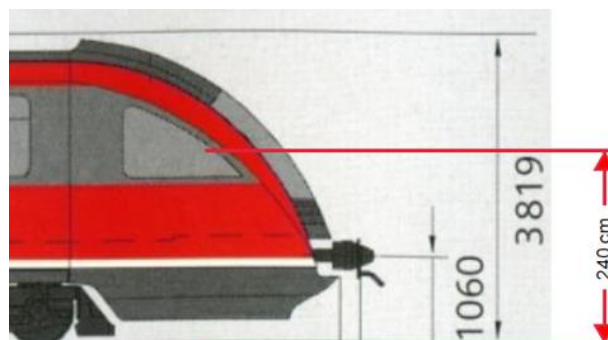


Abbildung 12: Augenhöhe von Lokführern – Quelle: www.nahverkehr-franken.de (modifiziert)

6.2 Relevante Verkehrswege

Im Umfeld der Photovoltaikanlage wurden als relevante Verkehrswege die Bundesautobahn A 99 sowie die Taufkirchener Straße identifiziert.

Wirtschaftswege oder nur sporadisch befahrene Straßen und Zuwegungen wurden aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens als nicht relevant eingestuft und deshalb in der Analyse nicht weiter berücksichtigt.

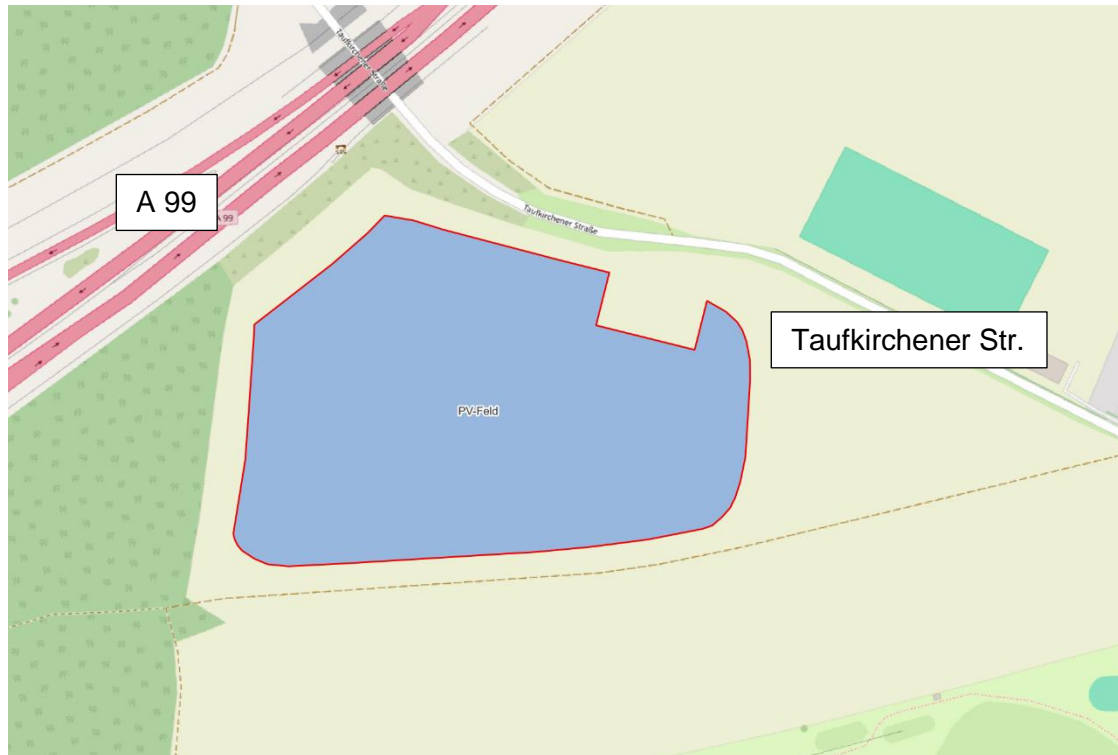


Abbildung 13: Positionen der als relevant eingestuften Verkehrswege - Quelle Karte: OpenStreetMap

6.3 Observationspunkte

Zur Bewertung der Blendwirkungen auf die relevanten Verkehrswege wurden spezifische „Observationspunkte“ (OP) definiert, die in der Simulation als Detektionspunkte für auftretende Reflexionen dienen.

Insgesamt wurden 8 OP zur Analyse der Blendwirkungen auf die Verkehrswege festgelegt:

- OP S1 bis S3 für den Straßenverkehr auf der A 99 Richtung Nordosten.
- OP S4 und S5 für den Straßenverkehr auf der A 99 Richtung Südwesten.
- OP S6 bis S8 für den Straßenverkehr auf der Taufkirchener Str. in beiden Richtungen.

Die OP Sx sind in einer Höhe von 2,65 m über dem Straßenniveau angebracht, entsprechend der Augenhöhe eines LKW-Fahrers.

Abbildung 14 zeigt die Positionen der Observationspunkte.

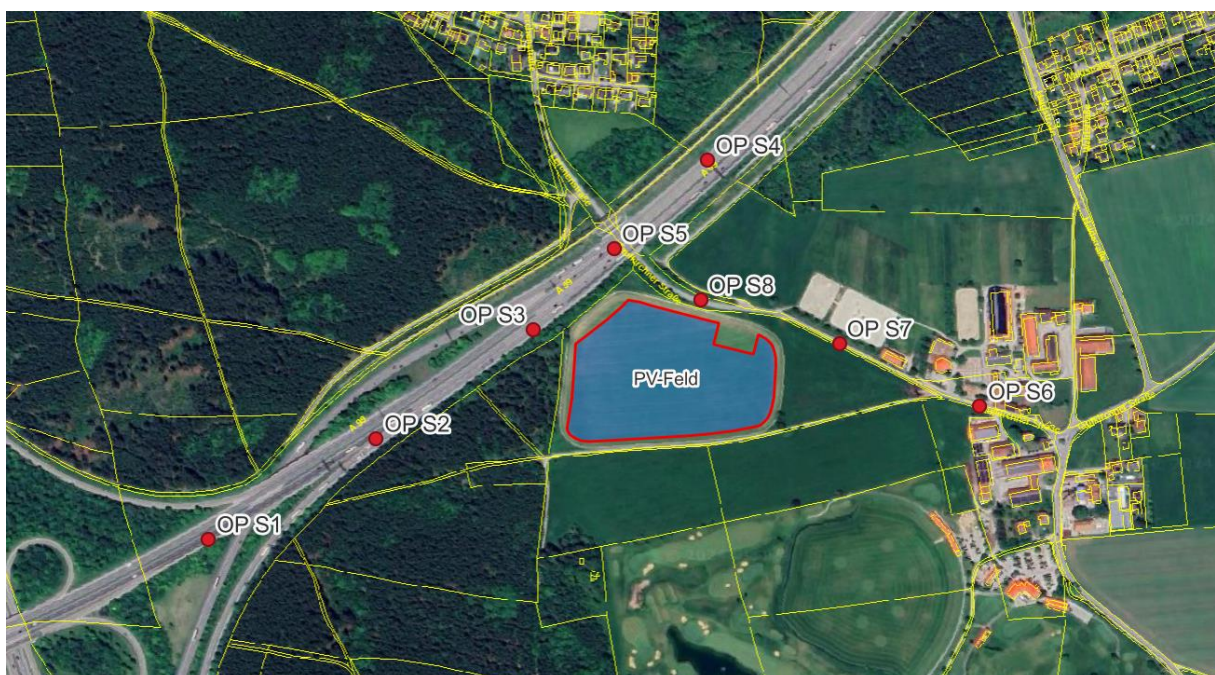


Abbildung 14: Positionen der OP auf den Verkehrswegen - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

6.4 Topografische Zwischenbetrachtung

Die A 99 verläuft im Westen der PVA auf einem Damm - und liegt damit ca. 4 m höher als das Anlagengelände. Richtung Nordosten verringert sich der Höhenunterschied. Zudem ist zu beobachten, dass die Autobahn Richtung Nordosten in eine Senke übergeht, wobei auf beiden Seiten ein Erdwall zu erkennen ist. Die Erdwälle weisen eine Höhe von ca. 5 m (bezogen auf das Straßenniveau) auf. Somit besteht von der A 99 nördlich der Anlage keinerlei Sichtbezug auf das PV-Feld. Westlich (bzw. direkt nordwestlich) der PVA besitzt die A 99 Richtung Osten (also zwischen Fahrbahn und PV-Feld) ebenfalls einen Erdwall. Dieser ist dort jedoch nur 1 bis 1,5 m hoch (bezogen auf das Straßenniveau). Hochsitzende Fahrzeugführer werden dort demnach über den Erdwall hinwegsehen und die PVA einsehen können, falls keine Vegetation vorhanden wäre.

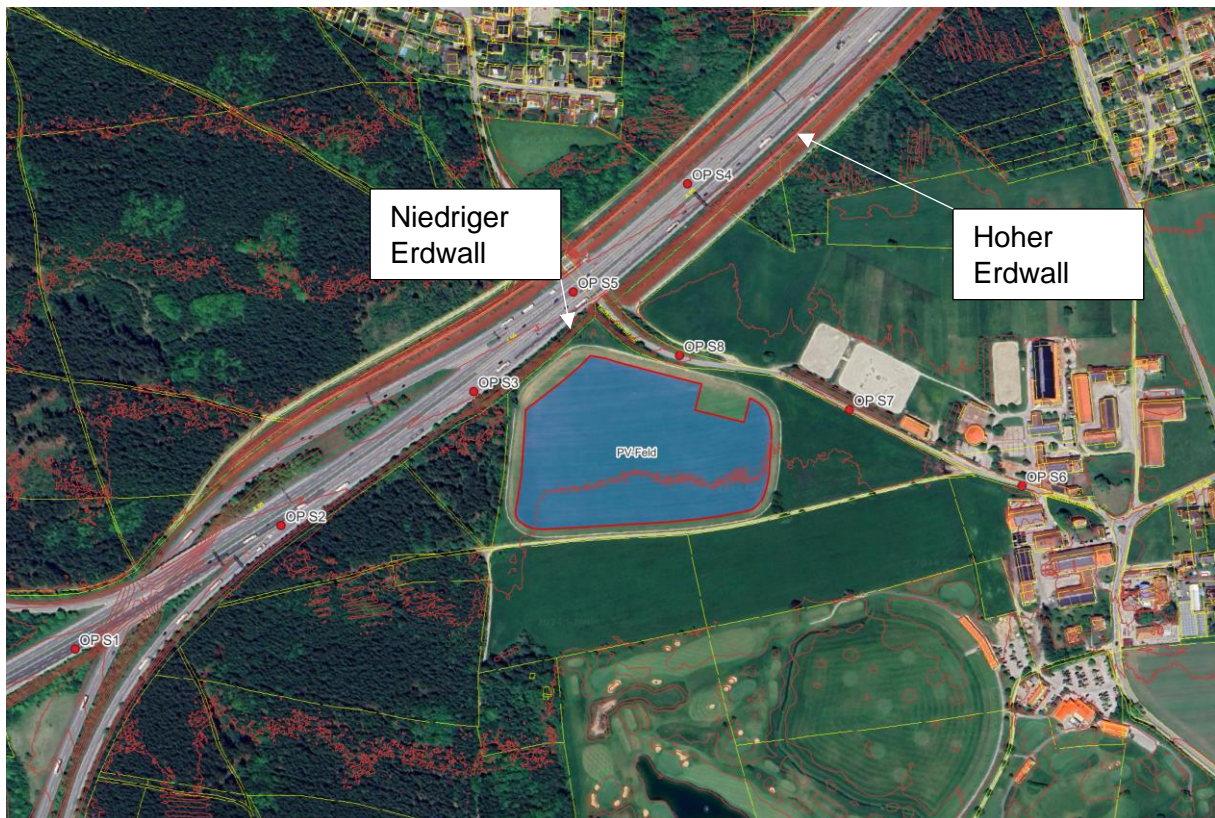


Abbildung 15: Darstellung der Höhenlinien (1 Linie = 1 m Höhenunterschied) - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro, Quelle Höhendaten: Bayerische Vermessungsverwaltung

Eine Vor-Ort-Besichtigung fand nicht statt. Es wurde jedoch ein detailliertes 3D-Modell der Anlage inklusive Umgebung auf Basis von DGM1-Höhendaten erstellt. Zudem wurden vom Auftraggeber Drohnenaufnahmen des Anlagengeländes zur Verfügung gestellt.

6.5 Berücksichtigte Waldfläche

Die Waldfläche im Westen/Südwesten der PVA wurde als Sichtschutz in der Auswertung berücksichtigt.



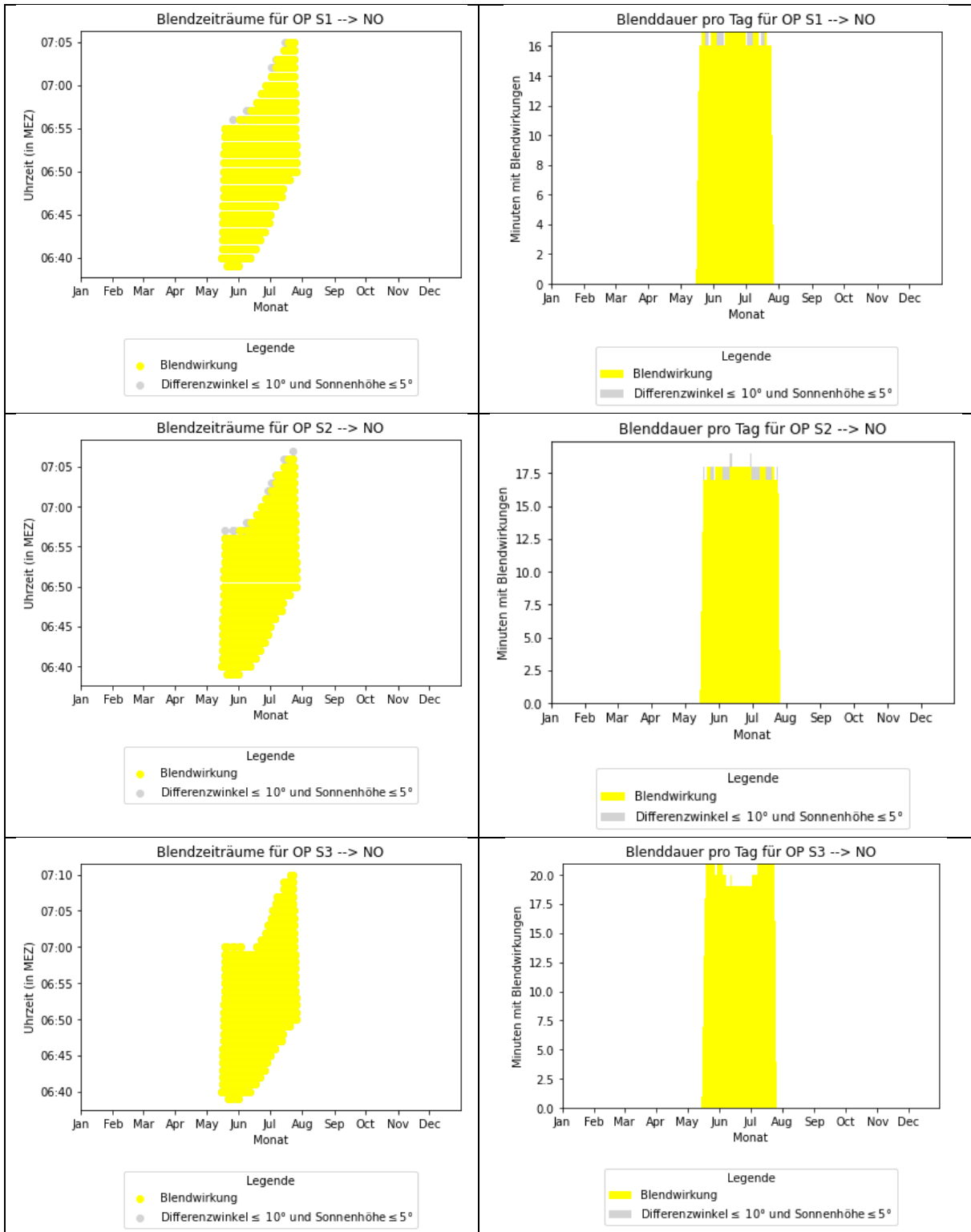
Abbildung 16: Berücksichtigte Waldfläche - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

6.6 Ergebnisse

Tabelle 5: Übersicht der Simulationsergebnisse für die Observationspunkte auf den Verkehrswegen

| Verkehrsweg | OP | Fahrtrichtung | Min. Winkel zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle (ca.) | Werden die Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze vollständig von der Sonne überlagert? | Anmerkung |
|--|------------|---------------|--|---|---|
| A 99 | S1 | Nordosten | 15° | nein | Waldfläche blockiert die Sicht. |
| | S2 | Nordosten | 15° | nein | |
| | S3 | Nordosten | 15° | nein | Vegetationsstreifen blockiert die Sicht. <i>Anmerkung: Diese Spalte wurde rot markiert, da Vegetationsstreifen gemäß den Vorgaben des Fernstraßen-Bundesamtes (FBA) nicht pauschal als permanenter Sichtschutz berücksichtigt werden sollen.</i> |
| | S4 | Südwesten | - | - | Keine Reflexionen |
| | S5 | Südwesten | - | - | |
| Taufkirchener Str. | S6 | Nordwesten | - | - | Keine Reflexionen |
| | | Südosten | | | |
| | S7 | Nordwesten | | | |
| | | Südosten | | | |
| S8 | Nordwesten | | | | |
| | Südosten | | | | |
| LEGENDE | | | | | |
| Relevante Blendwirkungen innerhalb der Erheblichkeitsgrenze | | | | | |
| Relevante Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze (aber außerhalb der Erheblichkeitsgrenze) | | | | | |
| Relevante Blendwirkungen außerhalb der Beeinträchtigungsgrenze / keine Reflexionen | | | | | |

Ergebnisdiagramme 2: Geometrisch mögliche Reflexionen zu den OP auf den Verkehrswegen, sofern diese innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze wahrgenommen werden können (Vegetation nicht berücksichtigt)



7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Gebäude und Pferdekoppel

Im relevanten Umfeld (100 m Radius) der Photovoltaikanlage befinden sich keine schutzwürdigen Gebäude (im Sinne des LAI-Leitfadens), wie z. B. Wohngebäude. Erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen in schutzwürdigen Räumen sind daher nicht zu erwarten. Der LAI-Leitfaden definiert erhebliche Blendwirkungen/Belästigungen quantitativ (sofern über 30 Minuten Kernblendung pro Tag oder über 30 Stunden Kernblendung pro Jahr in einem schutzwürdigen Raum auftreten, wird von erheblichen Belästigungen gesprochen), vgl. Kapitel 5.1.

Dennoch wurde eine Simulation an den nächstgelegenen Gebäuden östlich/südöstlich der PVA durchgeführt. Es konnten nur vereinzelt Reflexionen ermittelt werden, die als nicht relevante Belästigungen zu klassifizieren sind. Zudem handelt es sich bei den Gebäuden nicht um schutzwürdige Gebäude im Sinne des LAI-Leitfadens. Somit können die Blendwirkungen auf die Gebäude bzw. auf Kirchstockach insgesamt als unbedenklich eingestuft werden.

Zudem hat die Auswertung ergeben, dass keine Reflexionen in Richtung Nordosten, also u. a. zu den Pferdeställen, möglich sind (ungeachtet der geplanten 5 m hohen Eingrünung der PV-Fläche in diese Richtung). Dies betrifft auch das Siedlungsgebiet (an der Waldstraße), welches sich ebenfalls im Nordosten befindet.

Reflexionen wären noch auf die Wiesen in Richtung Osten, Südosten und Südwesten der PVA möglich, wo sich theoretisch Pferde aufhalten könnten (Annahme). Die Problematik von Irritationen, die durch Reflexionen an PV-Modulen auf Pferde außerhalb von Ställen ausgelöst werden, ist dem Autor nicht bekannt. Wissenschaftliche Auswertungen fehlen hierzu ebenfalls. Blendwirkungen in den Bereichen östlich/südöstlich können jedoch mittelfristig mit der geplanten 5 m hohen Eingrünung vollständig unterbunden werden.

7.2 Verkehrswege

Im Umfeld der Photovoltaikanlage wurden als relevante Verkehrswege die Bundesautobahn A 99 sowie die Taufkirchener Straße identifiziert.

7.2.1 Bundesautobahn A 99

In Fahrtrichtung Nordosten können Fahrzeugführer auf der A 99 im zentralen Sichtfeld geblendet werden, vorausgesetzt, es bestünde keine Vegetation zwischen der Fahrbahn und der PVA. Im Ist-Zustand ist jedoch eine dichte Waldfläche und ein blickfester Vegetationsstreifen zwischen der Autobahn und der PVA zu erkennen.



Abbildung 17: Übersicht der Vegetation zwischen dem (geometrisch betrachtet) betroffenen Bereich der A 99 und der PVA - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro, Quelle Karte: OpenStreetMap

Entsprechend den aktuellen Vorgaben des Fernstraßen-Bundesamtes dürfen Vegetationsstreifen nicht als Sichtschutz berücksichtigt werden. Es handelt sich hierbei jedoch um einen Streifen hochgewachsener Bäume und dichter Vegetation (siehe folgende Abbildung). Da Reflexionen in Richtung Autobahn nur in den Sommermonaten auftreten, ist zu dieser Zeit mit einer dichten Belaubung zu rechnen. Angesichts der Höhe und des Alters der Bäume wird nicht grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Vegetation entfernt wird. Es könnte in Betracht gezogen werden, die PV-Fläche in Richtung Nordwesten ebenfalls mit einer bis zu 4 bis 5 m hochwachsenden, blickdichten Eingrünung auszustatten (diese ist nach aktueller Planung bereits für andere Bereiche der Anlagengrenze vorgesehen). Wenn diese frühzeitig realisiert wird, könnte sie im Fall einer Entfernung des bestehenden Vegetationsstreifens als Ersatzmaßnahme dienen (ab einer Höhe von 4 m könnte sie die Module ausreichend verdecken). Es wäre ratsam, in Erfahrung zu bringen, ob eine Entfernung der Vegetation am Straßenrand in den nächsten Jahren geplant ist, um sicherzustellen, dass die neue Eingrünung auf dem Projektgelände ausreichend Zeit zum Wachsen hat. Alternativ könnten die nordwestlichsten PV-Tische (nur diese wären bei Wegfall des Vegetationsstreifens von der Autobahn aus einsehbar) nachträglich mit Spezialfolien ausgestattet werden, die Blendfreiheit garantieren. Diese Maßnahme könnte durchgeführt werden, falls die Bestandsvegetation entfernt wird bzw. frühzeitig entfernt werden sollte, sofern eine eigene Vegetation auf dem Projektgelände angelegt wird.



Abbildung 18: Vegetationsstreifen zwischen PVA und Autobahn – Quelle Abbildung: Google Earth Pro

Update Berichtsversion 1.3:

Die Autobahn GmbH des Bundes (Frau Schmid) hat sich am 08.11.2024 per E-Mail zu möglichen Maßnahmen zur Unterbindung von Blendwirkungen auf die A 99 geäußert. Dabei wurde erläutert, dass wirksame Maßnahmen zur Vermeidung von Blendwirkungen auf die A99 unabhängig vom Vegetationsstreifen bereits vor der Inbetriebnahme der Photovoltaikanlage wirksam sein sollen. Somit stehen nur noch zwei Maßnahmenoptionen zur Verfügung:

- Blendschutzmatten an der Zaunanlage (Sichtschutzzaun)
- Blendfreie Spezialmodule verwenden

Zudem wurde bekannt gegeben, dass eine Absicht besteht, die A 99 neben der PVA vierspurig auszubauen, was voraussichtlich eine Rodung der Vegetation in der 40 m breiten Anbauverbotszone zur Folge haben wird.

Sichtschutzzaun:

Im Nordwesten der PVA ist über eine Länge von ca. 128 m ein Sichtschutzzaun (erhöhter Anlagenzaun mit Sichtschutzelementen) mit einer Höhe von 4 m zu errichten (siehe folgende Abbildung).



Abbildung 19: Position des Sichtschutzzaunes im Nordwesten (orange)

7.2.2 Taufkirchner Straße

Auf der Taufkirchner Straße sind keine Reflexionen zu erwarten. Von der Straße aus können aufgrund der leichten Südwest-Ausrichtung der Modultische keine Modulvorderseiten eingesehen werden. Hinzu kommt mittelfristig eine Eingrünung der PVA, die die Sicht von der Straße auf die Anlage einschränken wird.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), *Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen (Leitfaden)*. 2012. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/lichthinweise-2015-11-03mit-formelkorrektur_aus_03_2018_1520588339.pdf
- [2] K. Mertens, *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, 5. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2020.
- [3] Volker Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*, 9. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [4] J. Yellowhair und C. K. Ho, „Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts“, San Diego, California, USA: American Society of Mechanical Engineers, Juni 2015, S. V002T11A003. doi: 10.1115/ES2015-49481.
- [5] J. A. Duffie und W. A. Beckman, „Solar Engineering of Thermal Processes“, Bd. 4, 2013.
- [6] Österreichischer Verband für Elektrotechnik (OVE), „Blendung durch Photovoltaikanlagen - OVE-Richtlinie R 11-3“. 2016.
- [7] 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.
- [8] Jason A- Rogers, Clifford K. Ho, Andrew Mead, Angel Millan, Melissa Beben, und Gena Drechsler, „Evaluation of Glare as a Hazard for General Aviation Pilots on Final Approach“. 2015. Zugegriffen: 15. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/2010s/media/201512.pdf

Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT



4. Assumptions and Limitations

Below is a list of assumptions and limitations of the models and methods used in SGHAT:

- The software currently only applies to flat reflective surfaces. For curved surfaces (e.g., focused mirrors such as parabolic troughs or dishes used in concentrating solar power systems), methods and models derived by Ho et al. (2011) [1] can be used and are currently being evaluated for implementation into future versions SGHAT.
- SGHAT does not rigorously represent the detailed geometry of a system; detailed features such as gaps between modules, variable height of the PV array, and support structures may impact actual glare results. However, we have validated our models against several systems, including a PV array causing glare to the air-traffic control tower at Manchester-Boston Regional Airport and several sites in Albuquerque, and the tool accurately predicted the occurrence and intensity of glare at different times and days of the year.
- SGHAT assumes that the PV array is aligned with a plane defined by the total heights of the coordinates outlined in the Google map. For more accuracy, the user should perform runs using minimum and maximum values for the vertex heights to bound the height of the plane containing the solar array. Doing so will expand the range of observed solar glare when compared to results using a single height value.
- SGHAT does not consider obstacles (either man-made or natural) between the observation points and the prescribed solar installation that may obstruct observed glare, such as trees, hills, buildings, etc.
- The variable direct normal irradiance (DNI) feature (if selected) scales the user-prescribed peak DNI using a typical clear-day irradiance profile. This profile has a lower DNI in the mornings and evenings and a maximum at solar noon. The scaling uses a clear-day irradiance profile based on a normalized time relative to sunrise, solar noon, and sunset, which are prescribed by a sun-position algorithm [2] and the latitude and longitude obtained from Google maps. The actual DNI on any given day can be affected by cloud cover, atmospheric attenuation, and other environmental factors.
- The ocular hazard predicted by the tool depends on a number of environmental, optical, and human factors, which can be uncertain. We provide input fields and typical ranges of values for these factors so that the user can vary these parameters to see if they have an impact on the results. The speed of SGHAT allows expedited sensitivity and parametric analyses.
- Single- and dual-axis tracking compute the panel normal vector based on the position of the sun once it is above the horizon. Dual-axis tracking does not place a limit on the angle of rotation, unless the sun is below the horizon. For single-axis tracking, a maximum angle of rotation can be applied to both the clockwise and counterclockwise directions.

Ausschnitt wurde dem SGHAT-Handbuch (Solar Glare Hazard Analysis Tool) entnommen. Das vollständige Handbuch kann unter folgendem Link gefunden werden:

https://forgesolar.com/static/docs/SGHAT3-GlareGauge_user_manual_v1.pdf