



Dipl.-Ing. (FH) Marco Wilke | Mathias Röper, M. Eng. | Dr.-Ing. Stefan Bofinger

Sonnwinne Photovoltaik

Ihre unabhängigen Sachverständigen für Photovoltaik

Blendgutachten

PVA MINDELHEIM

VERSION 2.1

Sachverständiger für Photovoltaik
Mathias Röper, M. Eng.

Achter de Schün 1
25436 Moorrege
+49 (0) 4122 509100
mathias.roeper@sonnwinne.de
www.sonnwinne.de

Moorrege, 04.11.2022

Revisionstabelle

Version	Änderung	Datum	Name
1.0	Erste Fassung	01.07.2022	Mathias Röper
1.1	Korrektur eines Begriffes. Keine inhaltlichen Änderungen	09.08.2022	Mathias Röper
2.0	<u>Anpassung des Gutachtens auf Basis des aktuellen Planungsstands:</u> Reduzierung der dargestellten Anlagenvarianten auf den aktuellen Planungsstand (Azimut = 165°, Modulneigung = 20°). Berücksichtigung des aktuellen Planungsstandes bzgl. der PV-Fläche. Berücksichtigung der geplanten Vegetation (Ausgleichsmaßnahme) am Anlagenrand im Westen. Erneute Simulation unter Verwendung eines genaueren Höhenmodells (DGM1).	04.11.2022	Mathias Röper
2.1	Fehlerhafter Verweis sowie Rechtschreibung korrigiert.	04.11.2022	Mathias Röper

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Fragestellung	4
1.2	Haftungsausschluss	4
1.3	Datengrundlage.....	4
1.4	Methodik	4
2	Anlagenbeschreibung.....	5
3	Zusammenfassung der Ergebnisse	8
4	Grundlagen	9
4.1	Blendwirkung von Modulen	9
4.2	Modellierung der Reflexionen.....	12
5	Umliegende Immissionsorte	13
5.1	Übersicht.....	13
5.2	Simulationsergebnisse	16
5.2.1	Observationspunkt 1	17
5.2.2	Observationspunkt 2	17
5.2.3	Observationspunkt 3	17
5.2.4	Observationspunkt 4	18
5.2.5	Observationspunkt 5	20
6	Umliegender Verkehr	21
6.1	Übersicht.....	21
6.2	Simulationsergebnisse	23
6.2.1	B 16	23
6.2.2	St 2518.....	23
6.2.3	Bahnstrecke (Westen).....	23
6.2.4	Bahnstrecke (Osten)	23
7	Literaturverzeichnis	26
Anhang A:	Annahmen und Limitationen von SGHAT	27

1 Einleitung

Die Stadt Mindelheim hat Mathias Röper, Sachverständiger für Photovoltaik, am 07.04.2022 damit beauftragt, die potenzielle Blendwirkung der geplanten Photovoltaikanlage (PVA) Mindelheim in 87719 Mindelheim zu analysieren und zu bewerten. Am 04.11.2022 wurde das Gutachten grundlegend an den aktuellen Planungsstand angepasst (Version 2.0).

1.1 Fragestellung

Es stellt sich die Frage, ob die Solarmodule der geplanten PVA Sonnenlicht so reflektieren, dass erhebliche Belästigungen durch Lichtimmissionen auf umliegende Gebäude und/oder Beeinträchtigungen durch Blendwirkungen für den umliegenden Straßen- sowie Bahnverkehr entstehen. Dieses Gutachten dient der Beantwortung dieser Frage und stellt dar, ob und mit welcher Häufigkeit Lichtimmissionen/Blendwirkungen auftreten können. Zudem werden die Ergebnisse bewertet.

1.2 Haftungsausschluss

Dieser Bericht wurde für die alleinige Nutzung des Kunden und in dessen Auftrag ausgearbeitet. Die Prüfungen und Auswertungen erfolgten nach bestem Wissen und Gewissen. Irrtümer, Fehler etc. sind hierbei trotz großer Sorgfalt nicht vollständig auszuschließen. Daher wird für Folgeschäden, die aus der Anwendung des Gutachtens resultieren, keine Haftung übernommen. Die Haftung auf Schadenersatz bei grober Fahrlässigkeit oder Vorsatz bleibt unberührt. Wenn der Bericht an Dritte weitergegeben wird, darf er nicht verändert oder bearbeitet werden. Wenn sich Dritte den Inhalt dieses Berichts zu Nutze machen, ist jegliche Haftung grundsätzlich ausgeschlossen.

1.3 Datengrundlage

Die Modellierung der PVA zur Analyse potenzieller Blendwirkungen basiert auf bereitgestellten Planungsunterlagen und Angaben (bereitgestellt von der Energieallianz Bayern). Eine Besichtigung vor Ort fand nicht statt. Zudem wurden Daten zur solaren Einstrahlung aus etablierten Langzeitdatenbanken verwendet [1]. Information bzgl. umliegender Gebäude, Straßenverläufe, Vegetation und der lokalen Topografie wurden Satellitenbildern und Karten entnommen (Google Earth Pro, GeoBasis-DE, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie). Zudem wurde vom Kunden für die Version 2.0 des Berichts ein Höhendatenmodell mit einem Raster von 1 m x 1 m zur Verfügung gestellt (DGM1).

1.4 Methodik

Laut der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) hat der Gesetzgeber bisher keine Regelungen zur Bestimmung und Auswertung der immissionsschutzrechtlichen Erheblichkeitsgrenzen für Lichtimmissionen erlassen [2]. Jedoch hat die LAI mit dem Dokument „Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen“ einen Leitfaden zur Verfügung gestellt (im Folgenden LAI-Leitfaden genannt), welcher in Anhang 2 Empfehlungen zur Ermittlung, Beurteilung und Minderung von PVA-bedingten Blendwirkungen gibt [2]. Die Methodik des Gutachtens basiert auf dem LAI-Leitfaden und wurde um wissenschaftliche Erkenntnisse und etablierte „Best-Practice“-Methoden erweitert, welche an gegebener Stelle im Dokument referenziert werden.

2 Anlagenbeschreibung

Die geplante PVA Mindelheim soll auf einer ehemals landwirtschaftlich genutzten Freifläche in Mindelheim (PLZ: 87719) errichtet werden. Die Fläche grenzt im Westen und Osten an Bahnstrecken. Zudem befindet sich westlich der geplanten PVA ein Wohngebiet.

Relevante Anlagenparameter werden in der folgenden Tabelle aufgeführt. Die Angaben beruhen auf dem aktuellen Planungsstand (bereitgestellt von der Energieallianz Bayern).

Tabelle 1: PVA-Parameter

PVA-Parameter	Wert / Angabe
Nennleistung (Modulleistung gesamt)	ca. 6,5 MWp
Anlagenfläche (eingezäunt)	ca. 67.000 m ²
Modulabmessung	1,754 m x 1,094 m
Modultyp	Vertex S (TSM-DE09.08) – Trina Solar
Modulneigung	20°
Modulausrichtung (Azimut)	165°
Höhe untere Modulunterkante	ca. 80 cm
Höhe obere Modulkante	ca. 2,3 m <i>(der Sachverhalt verändert sich bei höheren Modulkanten nicht signifikant)</i>
Adresse	87719 Mindelheim
Geo-Koordinaten des Geländes	48° 3'8.84"N 10°30'26.65"E



Abbildung 1: Übersicht der Anlagenfläche: Die Fläche mit den PV-Modulen ist in Blau dargestellt.
- Quelle: Planungsunterlagen, Google Earth (modifiziert)



Abbildung 2: Aufnahme des Anlagengeländes, aufgenommen vom östlichen Ende in Richtung Westen -
Quelle: Energieallianz Bayern



*Abbildung 3: Aufnahme des Anlagengeländes, aufgenommen vom nordöstlichen Ende in Richtung Südwesten -
Quelle: Energieallianz Bayern*

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Umliegende Gebäude

Das Gutachten hat ergeben, dass die Grenzwerte des LAI-Leitfadens bzgl. PVA-bedingter Blendwirkungen in/auf schutzwürdige Räume fast durchgängig eingehalten werden. Lediglich im obersten Stockwerk eines Mehrfamilienhauses wird der Grenzwert für die jährliche Gesamtblenddauer zu Beginn (nach der Errichtung der PVA) überschritten. Mittelfristig wird jedoch ein geplanter Vegetationsstreifen, welcher sich zwischen dem Mehrfamilienhaus und der PVA befindet, die Sicht so weit einschränken, dass die Grenzwerte eingehalten werden. Dieser Umstand wird als vertretbar bewertet, da die PVA voraussichtlich keine signifikante, zusätzliche Belästigung verursachen wird, da die Sonne stets tief und aus nahezu der gleichen Richtung scheint wie potenziell auftretende Reflexionen.

Das Gutachten kommt daher zum Schluss, dass die PVA keine erhebliche Belästigung durch Blendwirkungen in der Nachbarschaft verursachen wird.

Umliegende Verkehrswege

Lediglich auf der Bahnstrecke östlich der PVA können in einem sehr begrenzten Umfang schwache Blendwirkungen entstehen. Diese werden jedoch als vertretbar eingestuft, da sie nur in 450 Minuten pro Jahr auftreten können (vorausgesetzt, der Himmel ist nie bedeckt). Zudem scheint die Sonne stets sehr tief (Sonnenhöhe $< 5^\circ$) und aus nahezu der gleichen Richtung wie die Reflexionen. Da die Sonne in den entsprechenden Zeiträumen nur noch knapp über dem Horizont steht, ist die Intensität der Reflexionen nicht mehr ausreichend hoch, um starke Blendwirkungen verursachen zu können.

Die Blendwirkungen auf der Bahnstrecke (östlich der PVA) werden demnach als vertretbar eingestuft. Auf keinem anderen Verkehrsweg werden Blendwirkungen auftreten.

Fazit

Die geplante PVA kann realisiert werden, ohne erhebliche Belästigungen für Anwohner sowie relevante Beeinträchtigungen für den Straßen- und Bahnverkehr zu verursachen.

4 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Bestimmung von PVA-bedingter Blendwirkung dargestellt.

4.1 Blendwirkung von Modulen

Ein Photovoltaikmodul besteht aus einer Vielzahl von Solarzellen, welche Sonnenlicht in elektrische Energie umwandeln. Zur Stabilisierung und zum Schutz vor Witterungseinflüssen liegen diese üblicherweise hinter einer Glasscheibe (Modulglas). Das Modulglas ist maßgeblich für die Blendwirkung verantwortlich. Da die Menge der generierten elektrischen Energie proportional zur Einstrahlungsstärke des Sonnenlichts ist, versuchen Modulhersteller Reflexionen am Modul zu minimieren – denn umso geringer die Reflexionen sind, desto höher ist der Ertrag. Aus diesem Grund besitzt das Modulglas i. d. R. eine spezielle Oberflächentexturierung und eine sog. Antireflexionsschicht. Beides sorgt dafür, dass möglichst viel Licht auf die Solarzellen trifft und nicht durch Reflexionen verloren geht [3].

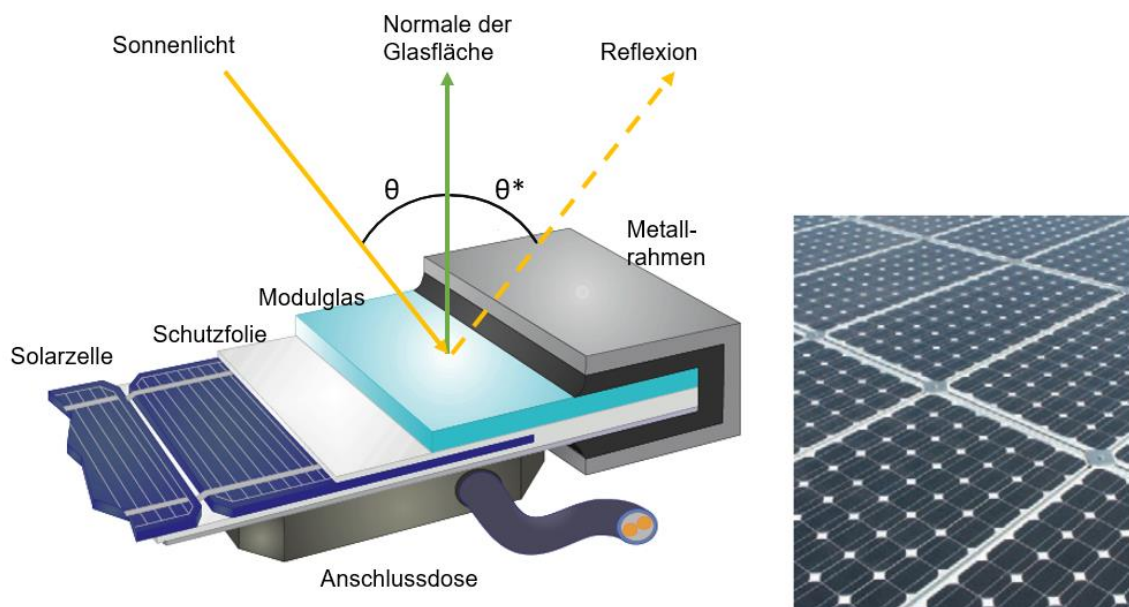


Abbildung 4: Aufbau eines Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ –
Quelle: [4] (modifiziert)

Aus diesem Grund reflektieren Solarmodule nur einen Bruchteil des Sonnenlichts (ca. 5 %), vorausgesetzt, der Einstrahlungswinkel θ (siehe Abbildung 4) ist klein. Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass trotz Texturierung und Antireflexionsschicht der Anteil des reflektierten Sonnenlichts bei höherem Einstrahlungswinkel exponentiell zunimmt (siehe Abbildung 5).

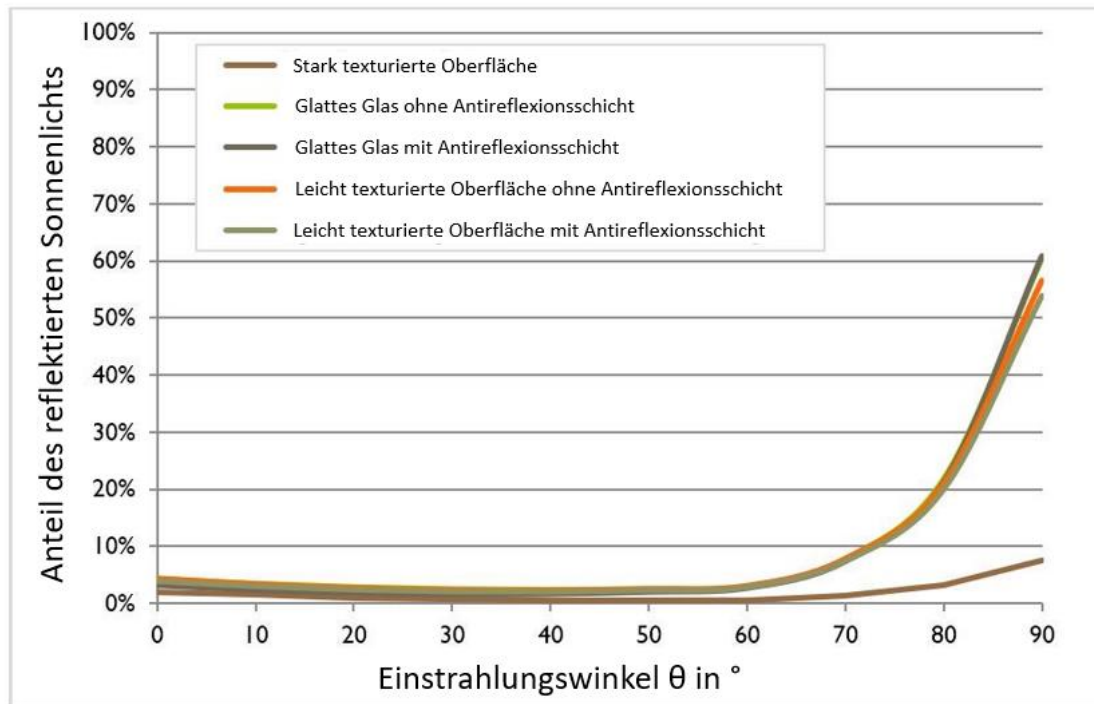


Abbildung 5: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einstrahlungswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypen – Quelle: [5], modifiziert

Da bereits Reflexionen von unter 1 % des Sonnenlichts zu einer Absolutblendung führen können [2], müssen alle Einstrahlungswinkel berücksichtigt werden.

Die Oberflächentexturierung von Modulglas führt dazu, dass Sonnenlicht zwar deutlich weniger intensiv, aber dafür gestreut reflektiert wird, d. h. der Immissionsort der Reflexion vergrößert sich. Die Intensität von Reflexionen an Solarmodulen ist somit auch nicht mit Reflexionen an z. B. Fensterscheiben oder Wasserflächen zu vergleichen, wo das Sonnenlicht gerichtet reflektiert wird. Neue PV-Module besitzen i. d. R. eine Antireflexionsschicht sowie zumindest eine leicht texturierte Oberfläche.



Abbildung 6: Veranschaulichung der Reflexion an einem texturierten Modulglas (mitte-links) und einem glatten Modulglas (mitte-rechts) – Quelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Dem Datenblatt des Moduls, welches auf der Anlage verwendet werden soll, ist zu entnehmen, dass das Modulglas eine entsprechende Antireflexionsschicht besitzt. Eine leichte Oberflächentexturierung wird angenommen.

MECHANISCHE DATEN

Solarzellen	Monokristallin
Zellanordnung	120 Zellen
Modulmaße	1.754×1.096×30 mm
Gewicht	21,0 kg
Glas	3,2 mm, hochtransparentes, anti-reflexbeschichtetes hitzevorgespanntes Glas
Verkapselungsmaterial	EVA/POE
Rückseitenfolie	Weiß
Rahmen	30 mm eloxierte Aluminiumlegierung
Anschlussdose	IP 68
Kabel	Photovoltaikkabel: 4,0 mm ² Querformat: 1.100/1.100 mm Hochformat: 280/280 mm*
Stecker	TS4/MC4 EV02*

Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Moduldatenblatt – Quelle: Trinasolar

4.2 Modellierung der Reflexionen

Reflexionen an PV-Modulen können geometrisch hergeleitet werden. Dafür werden die Module, die relevanten Immissionsorte und die Sonne in einem gemeinsamen Koordinatensystem modelliert [2]. Der standortbezogene Sonnenverlauf kann auf Basis mathematischer Funktionen für jeden Zeitpunkt im Jahr bestimmt werden [6]. Durch Winkelbeziehungen und Strahlengesetze kann nachvollzogen werden, wo und wann Blendwirkungen auftreten. Das Einbeziehen von Modulglas-spezifischen Streuwinkeln und Reflexionskoeffizienten ermöglicht eine noch genauere Betrachtung [5].

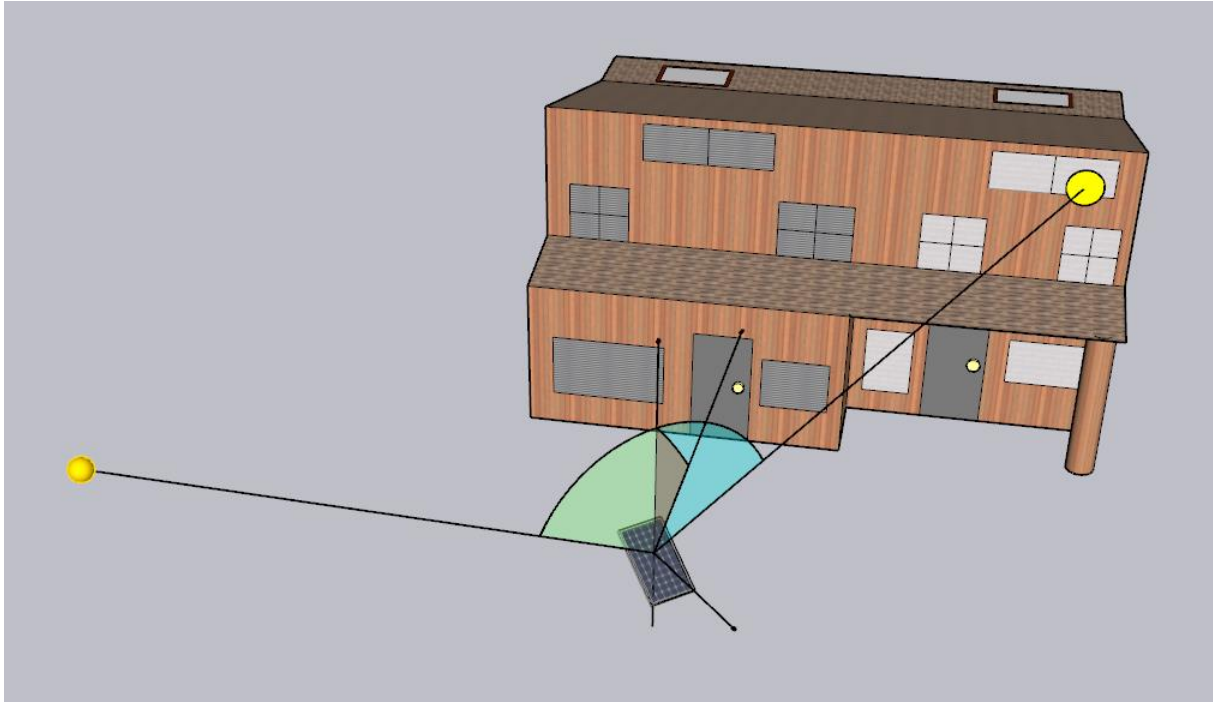


Abbildung 8: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion – Quelle: Eigene Abbildung

Im Rahmen der Simulation wird mit der Software ForgeSolar die Blendwirkung 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.

In der Simulation wird immer von einem klaren Himmel ausgegangen – daher stellen Zeitraumangaben für Lichtimmissionen bzw. Blendwirkungen sog. „Worst-Case“-Betrachtungen dar. Eine erweiterte Liste der Annahmen und Limitationen bzgl. der Simulation können Anhang A entnommen werden.

5 Umliegende Immissionsorte

5.1 Übersicht

Der LAI-Leitfaden benennt als maßgebliche Immissionsorte schutzwürdige Räume, sofern sie zu einer der folgenden Kategorien gehören [2]:

- 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)

In der Umgebung der geplanten PVA befindet sich eine Vielzahl von schutzwürdigen Räumen, welche ausschließlich in die Gruppe „Wohnräume“ fallen. Ein schutzwürdiger Raum bzw. eine Gruppe von unmittelbar zusammenliegenden schutzwürdigen Räumen wird in der Simulation durch einen sog. Observationspunkt (OP) repräsentiert. Ein OP stellt einen statischen Betrachter mit Blick auf die PVA dar. Bei Gebäuden erfährt i. d. R. das höchstgelegene Fenster die meisten Blendwirkungen. Dementsprechend ist der OP für ein Gebäude immer am höchsten Fenster definiert. Tabelle 2 listet die schutzwürdigen Räume bzw. ihre Repräsentationen durch Observationspunkte auf.

Die Observationspunkte wurden so gewählt, dass sie repräsentativ für das gesamte Wohngebiet stehen. So sind die höchsten Gebäude vertreten und alle relevanten Himmelsrichtungen werden abgedeckt. Weiter entfernt liegende schutzwürdige Räume (> 100 m) erfahren i. d. R. keine übermäßigen Blendwirkungen [2] und werden demnach nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Übersicht der Gruppen von umliegenden, schutzwürdigen Räumen

OP Nr.	Immissionsort	Kategorie	Entfernung zur PVA ¹
1	Einfamilienhaus	Wohnraum	67 m
2	Einfamilienhaus	Wohnraum	78 m
3	Mehrfamilienhaus	Wohnraum	96 m
4	Mehrfamilienhaus	Wohnraum	70 m
5	Einfamilienhaus	Wohnraum	94 m

¹ Ermittelt wurde die Entfernung (Luftlinie) zwischen Observationspunkt und der effektiven PV-Fläche.



Abbildung 9: Übersicht der Observationspunkte
- Quelle: Planungsunterlagen, Google Earth (modifiziert)



Abbildung 10: Aufnahme von OP1 – Quelle: Kunde

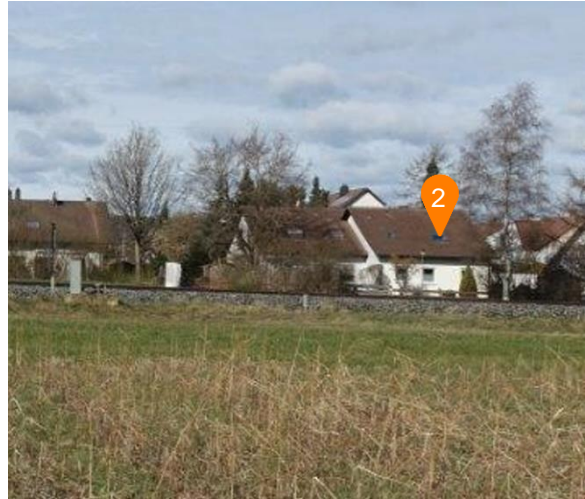


Abbildung 11: Aufnahme von OP2 – Quelle: Kunde



Abbildung 12: Aufnahme von OP3 – Quelle: Kunde



Abbildung 13: Aufnahme von OP4 – Quelle: Kunde

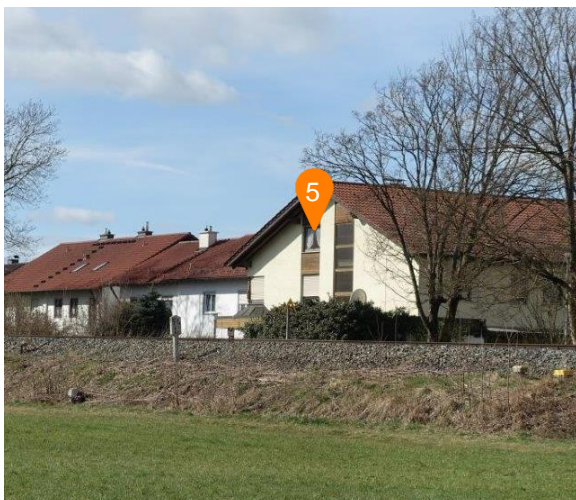


Abbildung 14: Aufnahme von OP5 – Quelle: Kunde

5.2 Simulationsergebnisse

Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse bzgl. der Lichtimmissionen/Blendwirkungen auf die Observationspunkte (OP) dargestellt (welche die umliegenden Wohnhäuser repräsentieren).

Laut dem LAI-Leitfaden findet eine erhebliche Belästigung (durch PVA-bedingte Lichtimmissionen) statt, wenn ein schutzwürdiger Raum mehr als 30 Minuten pro Tag und/oder 30 Stunden pro Jahr Blendwirkungen erfährt [2]. Jedoch sind laut dem Leitfaden für die Ermittlung der Blendzeiträume nicht alle Reflexionen zu berücksichtigen.

Der LAI-Leitfaden schreibt für die Ermittlung der Blendzeiträume ein vereinfachtes Modell vor, das die Solarmodule als ideal verspiegelte Oberflächen darstellt [2]. Eine Spiegeloberfläche reflektiert Sonnenlicht gerichtet – es kommt also zu keiner (bzw. nur einer sehr kleinen) Streuung des Sonnenlichts (bei weniger Streuung verkleinern sich die Blendzeiträume). In der Simulation wurde jedoch ein realistisches Modell verwendet, welches die oberflächenspezifischen Eigenschaften von realen Solarmodulen berücksichtigt. Um dennoch eine Auswertung nach der LAI-Leitfaden zu ermöglichen, werden die Blendwirkungen, die mit dem vereinfachten Modell ermittelt werden würden, im Folgenden als sog. „**Kernblendung**“ bezeichnet (die übrigen als sog. „**gestreute Reflexion**“) und stets differenzierbar dargestellt.

Außerdem sollen laut der LAI-Leitfaden Reflexionen, welche am Immissionsort mit einem **Differenzwinkel von $\leq 10^\circ$** in Relation zur direkten Sonnenstrahlung auftreten, nicht als relevante Blendwirkungen betrachtet werden [2]. Somit wird der Umstand berücksichtigt, dass wenn die Sonne tief und aus nahezu der gleichen Richtung scheint wie die Reflexionen an den Modulen, die PVA-bedingten Blendwirkungen von der Sonne überlagert werden. Auch diese Reflexionen werden im Folgenden differenzierbar dargestellt (sofern sie auftreten).

Zeitangaben (Uhrzeiten) sind stets in der mitteleuropäischen Normalzeit (MEZ, UTC+1) dargestellt.

5.2.1 Observationspunkt 1

Zu OP 1 sind (geometrisch gesehen) keine Reflexionen von der PVA möglich.

5.2.2 Observationspunkt 2

Bei OP 2 werden pro Tag maximal 11 Minuten und pro Jahr insgesamt rund 670 Minuten Kernblendungen auftreten. Demnach werden die Grenzwerte des LAI-Leitfadens eingehalten. Eine erhebliche Belästigung findet in diesem Sinne nicht statt.

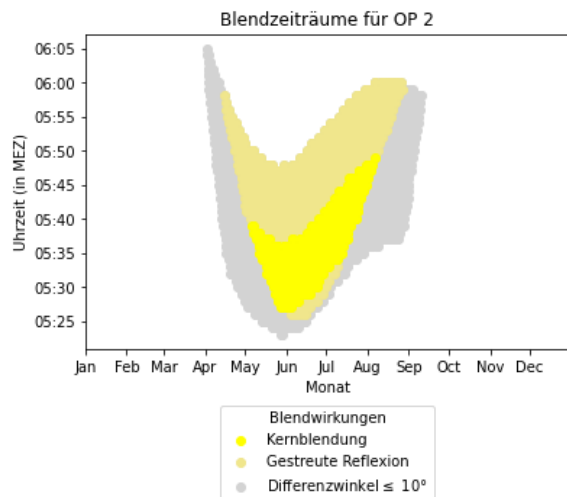


Abbildung 15: Blendzeiträume für OP 2

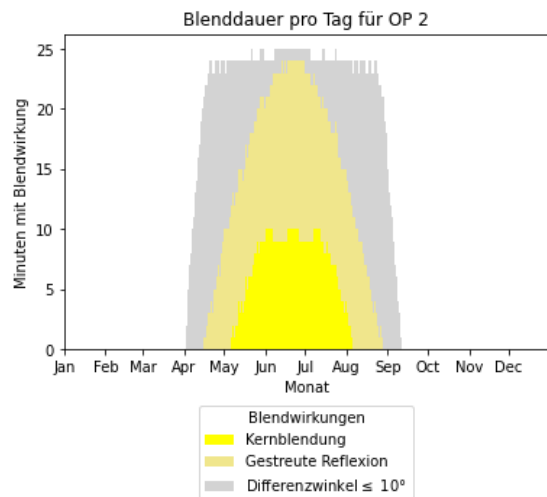


Abbildung 16: Blenddauer pro Tag für OP 2

5.2.3 Observationspunkt 3

Bei OP 3 werden pro Tag maximal 21 Minuten und pro Jahr insgesamt rund 1570 Minuten Kernblendungen auftreten. Demnach werden die Grenzwerte des LAI-Leitfadens eingehalten. Eine erhebliche Belästigung findet in diesem Sinne nicht statt.

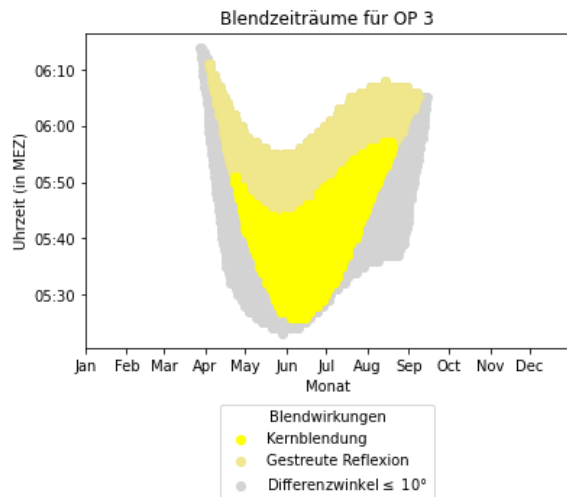


Abbildung 17: Blendzeiträume für OP 3

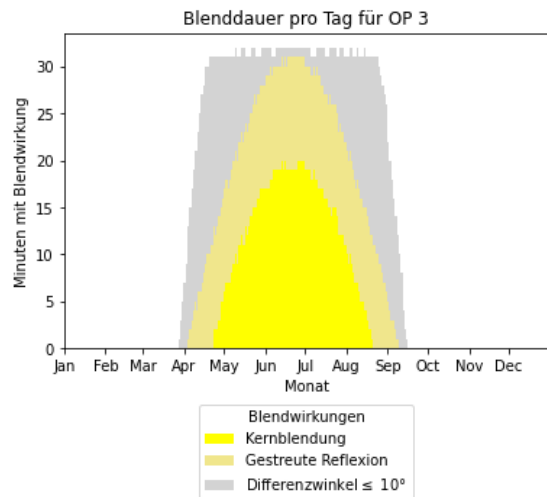


Abbildung 18: Blenddauer pro Tag für OP 3

5.2.4 Observationspunkt 4

Bei OP 4 werden pro Tag maximal 26 Minuten und pro Jahr insgesamt rund 2600 Minuten Kernblendungen auftreten. Somit wird der Grenzwert für die jährliche Blenddauer von 30 Stunden (1800 Minuten) um ca. 13,3 Stunden überschritten. Dennoch wird die Blendwirkung bei OP 4 als vertretbar eingestuft (siehe folgende Erörterung).

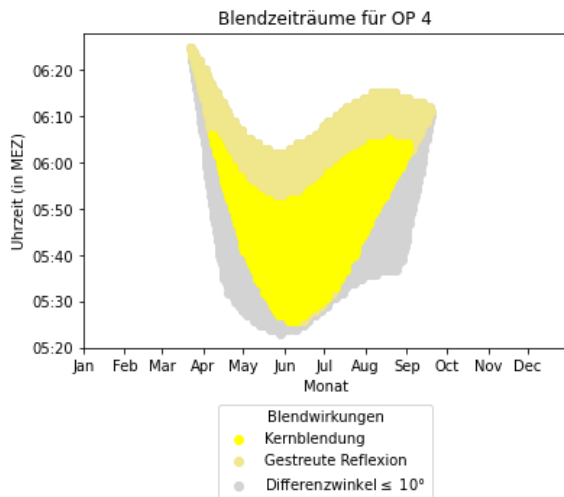


Abbildung 19: Blendzeiträume für OP 4 (Eingrünung nicht Berücksichtigt)

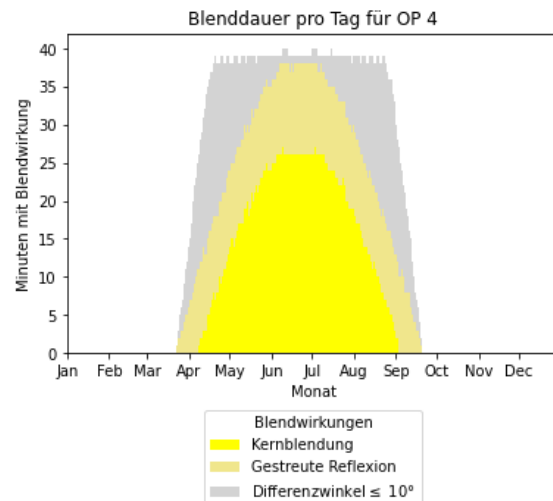


Abbildung 20: Blenddauer pro Tag für OP 4 (Eingrünung nicht Berücksichtigt)

Die Blendzeiträume liegen ausschließlich in den frühen Morgenstunden. Dementsprechend finden die Reflexionen zu OP 4 zu Zeiten statt, wenn die Sonne tief und aus (relativ) gleicher Richtung (Osten) scheint. Es ist demnach zu erwarten, dass die Reflexionen an den Modulen zu keinen größeren, zusätzlichen Belästigungen führen, da bereits zur gleichen Zeit ein stärkerer Lichteinfall durch die Sonne stattfindet. Abbildung 21 stellt den Blick von OP 4 am 21.06. um 06:00 Uhr (MEZ) dar. Der dargestellte Sonnenstand entspricht dabei der Realität zum entsprechenden Zeitpunkt. Es ist zu erkennen, dass die Sonne tief und aus nahezu der gleichen Richtung scheint, wie die Reflexionen (der zu OP 4 reflektierende Bereich der PVA ist in Gelb dargestellt). Der dargestellte Sonnenstand stellt den höchsten zu erwartenden Sonnenstand während der Blendzeiträume dar. Zu allen anderen Zeiten, wenn Reflexionen auftreten, steht die Sonne ansonsten (in gleicher Richtung) noch tiefer.

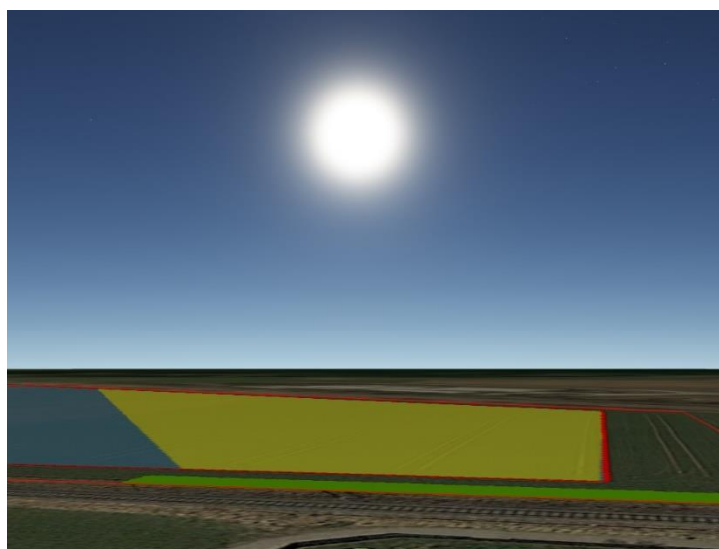


Abbildung 21: Blick von OP4 in Richtung Osten am 21.06 um 6:00 Uhr (MEZ): Der reflektierende Bereich der PVA ist mit Gelb markiert - Quelle: Google Earth Pro

Hinzu kommt der Umstand, dass zwischen OP 4 und dem potenziell reflektierenden Bereich der PVA als Ausgleichsmaßnahme eine Eingrünung geplant ist. Der geplante Vegetationsstreifen wird mittelfristig eine Höhe von 4 m erreichen. Da die Reflexionen (Kernblendung) zu OP 4 nur in den Monaten zu erwarten sind, wenn die lokale Vegetation Blattwerk trägt (April bis Anfang September), ist auch mittelfristig mit einer Blickfestigkeit des Vegetationsstreifens zu rechnen. Abbildung 22 zeigt nochmals die Sicht von OP 4 nach Osten. Diesmal ist der geplante Vegetationsstreifen mit einer Höhe von 4 m als (grünes) 3D-Objekt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass obwohl OP 4 relativ hoch gelegen ist, die Eingrünung die Sicht auf einen Großteil des reflektierenden Bereiches der PVA einschränkt. Vom weiterhin einsehbaren Bereich sind (aufgrund der Entfernung) keine stärkeren Blendwirkungen zu erwarten.

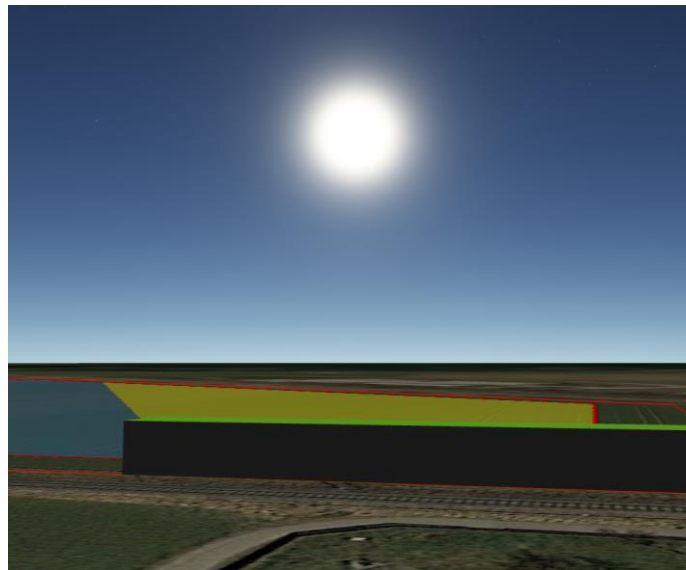


Abbildung 22: Sicht von OP 4 auf das Anlagengelände: Die geplante Vegetation (Eingrünung) ist als grünes Objekt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass so die Sicht auf die nächstgelegenen Module genommen wird. Quelle: Abbildung: Google Earth Pro

Wird die hochgewachsene Eingrünung in der Simulation berücksichtigt, so reduzieren sich die relevanten Blendzeiträume (Kernblendung) auf maximal 11 Minuten pro Tag und auf insgesamt rund 1000 Minuten pro Jahr (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Demnach würden die Grenzwerte mittelfristig eingehalten werden.

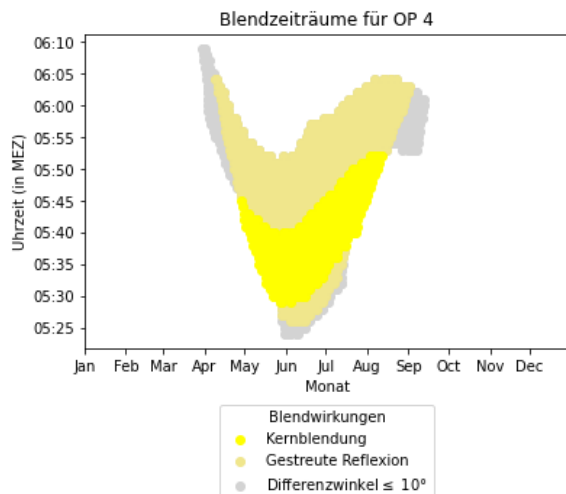


Abbildung 23: Blendzeiträume für OP 4 (**Eingrünung Berücksichtigt**)

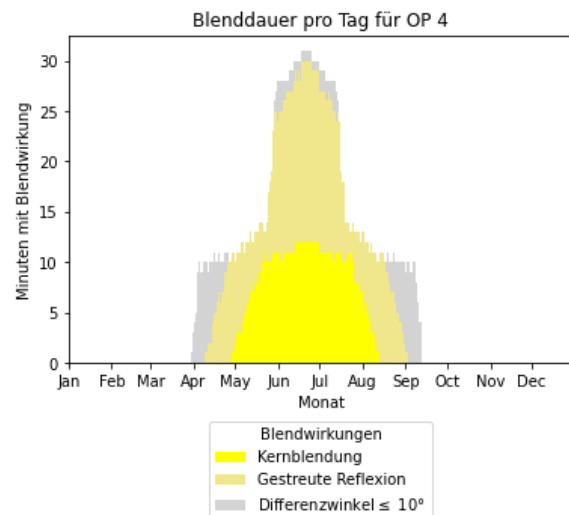


Abbildung 24: Blenddauer pro Tag für OP 4 (**Eingrünung Berücksichtigt**)

Es lässt sich demnach aussagen, dass anfangs (nach der Errichtung der PVA) der im LAI-Leitfaden genannte Grenzwert für die jährliche Blenddauer bei OP 4 nicht eingehalten wird. Mittelfristig, nachdem die eingesetzten Pflanzen an Höhe gewonnen und eine gewisse Blickfestigkeit entwickelt haben, werden die Grenzwerte jedoch eingehalten. Bis die Vegetation eine Höhe von 4 m erreicht hat, können mehrere Jahre vergehen. Jedoch verbessert sich die Situation schon bei einer Vegetationshöhe von ca. 2 m signifikant, da dann bereits die nächstgelegenen Module (welche potenziell am stärksten Blenden) verdeckt werden. Da die Pflanzen mit einer vorgezogenen Höhe von ca. 1 m eingesetzt werden, dürfte eine Höhe von 2 m relativ schnell erreicht werden.

Die Anfangszeit, in der der jährliche Grenzwert um ca. 13,3 Stunden überstiegen wird, wird aufgrund des Umstandes, dass die Sonne stets tief und aus nahezu der gleichen Richtung scheint, als vertretbar eingestuft.

5.2.5 Observationspunkt 5

Zu OP 5 sind (geometrisch gesehen) keine Reflexionen von der PVA möglich.

6 Umliegender Verkehr

6.1 Übersicht

Im Folgenden werden relevante Verkehrswege aufgeführt, welche aufgrund ihrer Nähe zur PVA in der Simulation berücksichtigt werden. Straßen/Wege landwirtschaftlicher oder forstwirtschaftlicher Art (sog. Feldwege) sowie nur sporadisch befahrene Straßen werden als nicht relevant eingestuft und somit nicht weiter betrachtet. Zudem werden die Straßen innerhalb des Wohngebietes nicht weiter betrachtet, da aufgrund der Gebäude von dort keine Sicht auf die PVA besteht.

Unmittelbar westlich und östlich des PVA-Geländes verläuft eine Bahnstrecke. Zudem verläuft östlich der PVA (mit etwas Abstand) die Bundesstraße B 16 und südlich die Staatsstraße St 2518.



Abbildung 25: Übersicht der umliegenden, relevanten Verkehrswege -
Quelle: Planungsunterlagen, Google Earth Pro (modifiziert)

In der Simulation werden als Verkehrsteilnehmer PKW- und LKW-Fahrer sowie Lokführer berücksichtigt, welche sich durch ihre Sitzhöhe (und somit Augenhöhe) unterscheiden. Die Augenhöhe von PKW-Fahrern wurde auf 1,20 m, die von LKW-Fahrern auf 2,65 m und die von Lokführern auf 2,40 m festgelegt (Annahme).

Reflexionen, welche im peripheren Sichtbereich einer Person emittiert werden, führen i. d. R. zu keiner nennenswerten Blendwirkung. Der relevante (horizontale) Sichtbereich einer fahrenden Person wurde in Anlehnung an [7] auf 60° festgelegt (jeweils 30° zu beiden Seiten der Blickrichtung). Für Fahrzeugführer wird angenommen, dass die Blickrichtung der Fahrtrichtung entspricht. In der Simulation werden daher nur Blendwirkungen berücksichtigt, welche innerhalb des relevanten Sichtfelds emittiert werden (siehe Abbildung 28).

Anders verhält es sich im Straßenverkehr an Kreuzungen: Hier wird ein relevantes Sichtfeld von 360° angenommen, um das Abbiegen aus verschiedenen Richtungen (mit intensivem Umschauen/Schulterblicken/etc.) zu berücksichtigen.

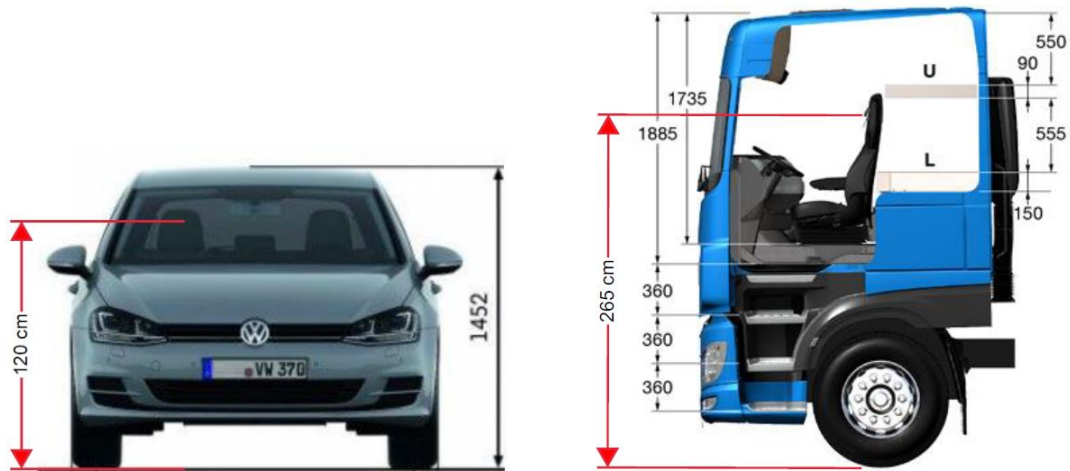


Abbildung 26: Augenhöhe der Straßenverkehrsteilnehmer - Quelle: Volkswagen AG, BTS GmbH & Co. KG, modifiziert

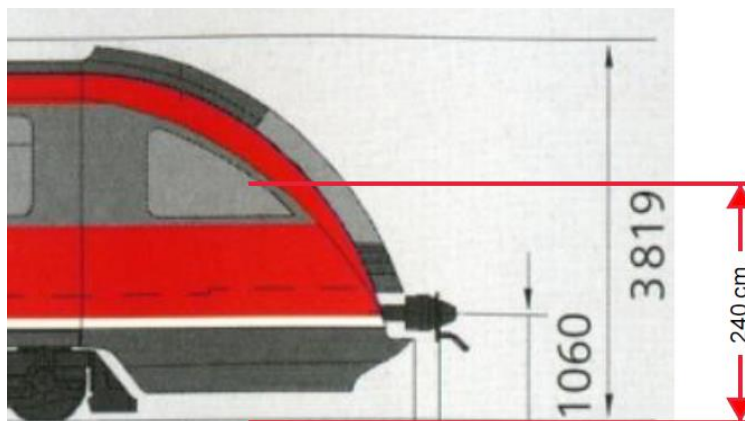


Abbildung 27: Augenhöhe von Lokführern - Quelle: www.nahverkehr-franken.de, modifiziert

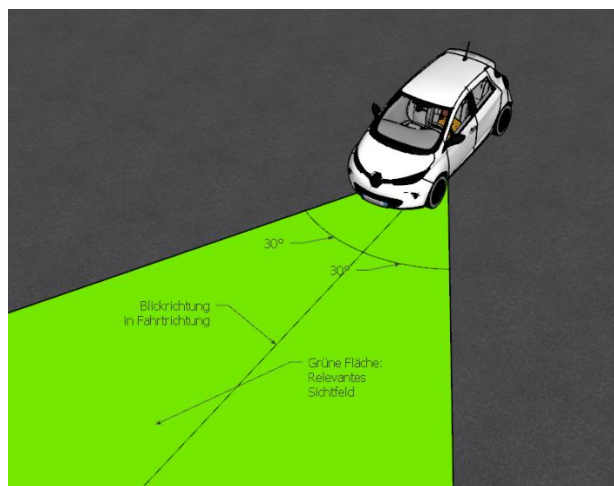


Abbildung 28: Darstellung des für Blendwirkungen relevanten Sichtfeldes von Fahrzeugführern während der Fahrt
Quelle: Eigene Abbildung

6.2 Simulationsergebnisse

Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse bzgl. der Blendwirkungen auf den umliegenden Verkehrswegen dargestellt. Der Berechnung liegt ein realistisches Modell zu Grunde, welches auch diffuse Reflexionen berücksichtigt.

6.2.1 B 16

Blendwirkungen sind auf der B 16 auszuschließen. Der Bahndamm sowie weitere Hindernisse (Bäume, Lagerhallen etc.) blockieren an den relevanten Stellen vollständig die Sicht auf das PVA-Gelände.

6.2.2 St 2518

Blendwirkungen auf der St 2518 sind aufgrund der Lage der Straße gänzlich auszuschließen (geometrisch gesehen sind hier keine Blendwirkungen möglich).

6.2.3 Bahnstrecke (Westen)

Auf der Bahnstrecke westlich der PVA können keine Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Lokführer auftreten.

6.2.4 Bahnstrecke (Osten)

Auf der Bahnstrecke östlich der PVA können bei Fahrtrichtung gen Süden in einem sehr begrenzten Umfang schwache Blendwirkungen auftreten. Diese werden von den PV-Modulen emittiert, welche sich unmittelbar neben der Bahnstrecke befinden. Im Worst-Case könnten auf der östlichen Bahnstrecke pro Tag maximal 16 Minuten und im ganzen Jahr insgesamt rund 450 Minuten Blendwirkungen auftreten. Die folgenden Diagramme zeigen die Blendzeiträume.

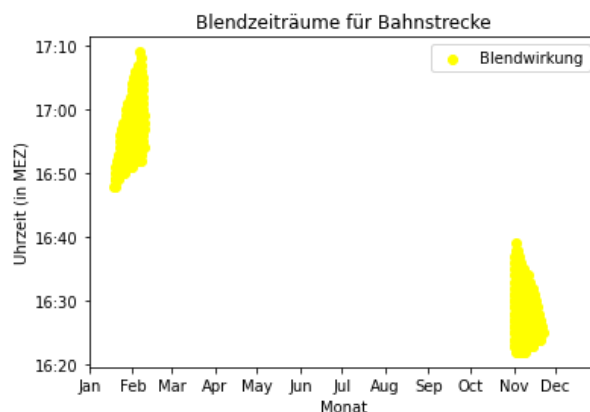


Abbildung 29: Blendzeiträume auf der Bahnstrecke im Osten

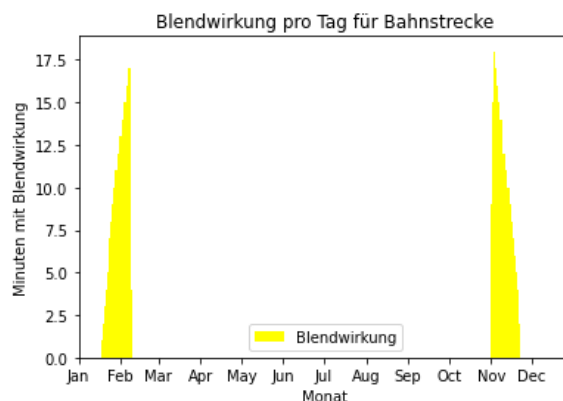


Abbildung 30: Blenddauer pro Tag auf der Bahnstrecke im Osten

Demnach finden die Blendwirkungen in den Wintermonaten und zudem am Abend statt. Die Sonne geht dabei stets (aus Sicht des Lokführers) in nahezu der gleichen Richtung unter, von wo die Reflexionen zu erwarten sind. Dies wird durch das folgende Diagramm (Abbildung 31) deutlich. Dabei ist jede Minute mit Blendwirkung pro Jahr als gelber Punkt aufgetragen. Die x-Achse zeigt den Differenzwinkel zwischen Sonnenstrahlung und Reflexion (bezogen auf den Lokführer) und die y-Achse die entsprechende Sonnenhöhe. Bei einer Sonnenhöhe von unter 5° ist davon auszugehen, dass die Sonne signifikant in die Fahrerkabine scheint.

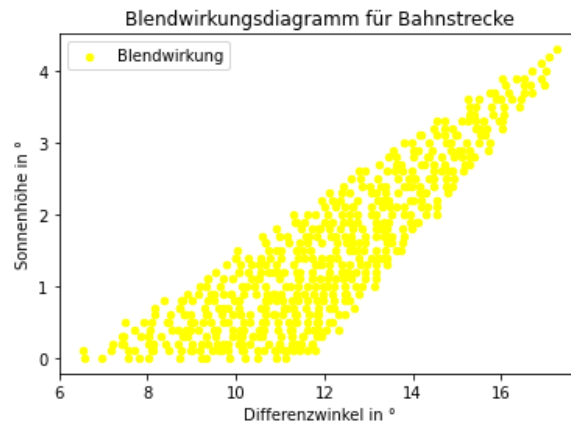


Abbildung 31: Sonnenhöhe vs. Differenzwinkel: Aufgetragen ist jede Minute mit Blendwirkung pro Jahr als Punkt

Der höchste Sonnenstand ($4,3^\circ$), der während der Blendzeiträume zu erwarten ist, konnte Anfang Februar ermittelt werden. Die folgende Visualisierung stellt den Sonnenstand aus Sicht eines Lokführers dar.

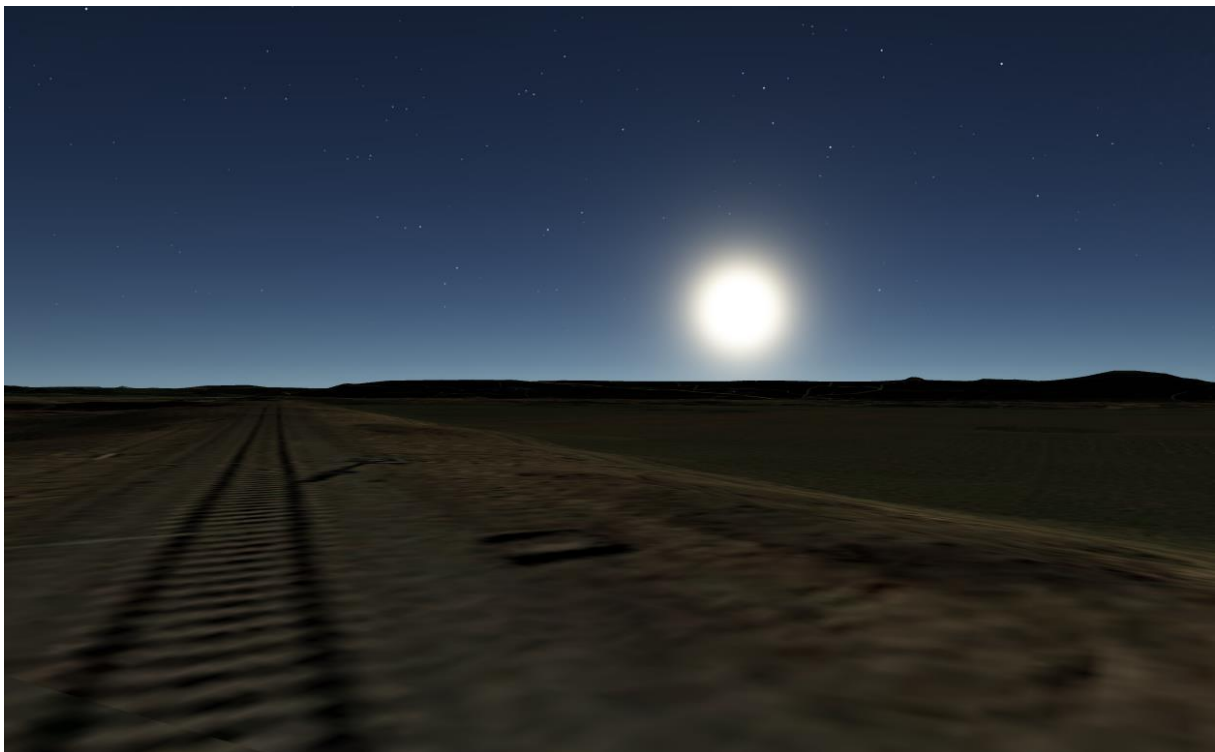


Abbildung 32: Sicht eines Lokführers bei Fahrtrichtung gen Süden Anfang Februar um 16:55 Uhr – Quelle
Abbildung: Google Earth Pro

Demnach ist davon auszugehen, dass die Sonne die Blendwirkungen der PVA auf der Bahnstrecke stets überlagert. Zudem ist die Sonneneinstrahlung während der Blendzeiträume bereits so schwach, dass die Reflexionen (laut Simulation) zu keinen stärkeren Blendwirkungen mehr führen können.

Die Blendwirkungen auf der Bahnstrecke werden auf Basis der dargestellten Umstände als unerheblich eingestuft.

7 Literaturverzeichnis

- [1] B. CATTANEO, „Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)“, *EU Science Hub - European Commission*, 15. Juni 2018. <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> (zugegriffen 17. April 2021).
- [2] 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
- [3] K. Mertens, *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, 5. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2020.
- [4] Volker Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*, 9. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [5] J. Yellowhair und C. K. Ho, „Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts“, San Diego, California, USA, Juni 2015, S. V002T11A003. doi: 10.1115/ES2015-49481.
- [6] J. A. Duffie und W. A. Beckman, „Solar Engineering of Thermal Processes“, Bd. 4, 2013.
- [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.

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