

[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 ZAPEL

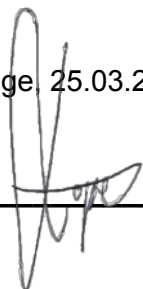
VERSION 1.5

Bearbeitet:

Sachverständiger für Photovoltaik
Mathias Röper, M. Eng.

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

Moorrege, 25.03.2024

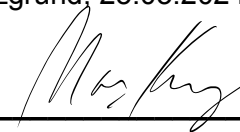


Review:

Sachverständiger für Photovoltaik
Max Krug

Melm 1
96274 Itzgrund
+49 (0) 151 51207524
max.krug@sonnwinn.de
www.sonnwinn.de

Itzgrund, 25.03.2024



Revisionstabelle

Version	Änderung	Datum	Name
1.5	Größe Anlagengelände angepasst (Tabelle 4)	25.03.2024	Mathias Röper
1.4	Neue Modultischmaße berücksichtigt	18.03.2024	Mathias Röper
1.3	Redaktionelle Änderungen	13.12.2023	Mathias Röper
1.2	Redaktionelle Änderungen	05.12.2023	Mathias Röper
1.1	Name Auftraggeber korrigiert	27.10.2023	Mathias Röper
1.0	Erste Fassung	27.10.2023	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 und Fazit	7
4	Grundlagen	8
4.1	Blendwirkung von Modulen	8
4.2	Berechnung von Reflexionen	10
4.3	Verwendete Software	10
5	Blendwirkungen auf Gebäude	11
5.1	Auswertungsmethodik	11
5.2	Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA	12
6	Blendwirkungen auf den Straßenverkehr	13
6.1	Auswertungsmethodik	13
6.2	Relevante Verkehrswege	16
6.3	Observationspunkte	17
6.4	Ergebnisse	18
7	Diskussion der Ergebnisse und Maßnahmen	23
7.1	Gebäude	23
7.2	Straßen	24
8	Literaturverzeichnis	27
	Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT	28

1 Einleitung

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

Tabelle 1: Projektübersicht

Auftraggeber	Solarpark ZaD GmbH & Co. KG
Projektname	PVA Zapel
Standort der PVA	19089 Zapel
Stand der Projektierung	<input type="checkbox"/> Bestand <input type="checkbox"/> Im Bau <input checked="" type="checkbox"/> Planung

Der vorliegende Bericht wurde zudem von Herrn Max Krug, Sachverständiger für Photovoltaik, in externer Zuarbeit geprüft.

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
- Relevante Straßen
- Bahnstrecken

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

Tabelle 2: Verwendete Daten/Informationen und ihre Quellen

Information/Daten	Quelle
Angaben zur geplanten PVA (inkl. Fotoaufnahmen)	Auftraggeber
Umliegende Straßenverläufe	Google Earth Pro, OpenStreetMap
Umliegende Vegetation	
Umliegende Bebauung	
Höhenmodell Anlagengelände und Umgebung (DGM1)	Landesamt für innere Verwaltung Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen Mecklenburg-Vorpommern

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)
Straßen und Bahnstrecken	Eigene Auswertungsmethodik (siehe Kapitel 6.1)

2 Anlagenbeschreibung

Tabelle 4: Relevante Anlagenparameter

Parameter	Wert/Angabe
Geokoordinaten (Breite, Länge)	53.553488°, 11.692545°
Art der Anlage	Freiflächenanlage
Modultyp	Si-kristalline Module mit Antireflexbeschichtung
Aufständigung	Fest aufgeständert
Größe der PV-Fläche	ca. 15,18 ha
Nennleistung (DC)	-
Modulausrichtung (Azimut) ¹	180° Süden
Modulneigung	11°
Höhe Modulunterkante	0,80 m
Höhe Moduloberkante	2,66 m



Abbildung 1: Grundriss der PV-Fläche (Bereich mit PV-Modulen) - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

¹ 0° = Norden, 90° = Osten, 180° = Süden, 270° = Westen

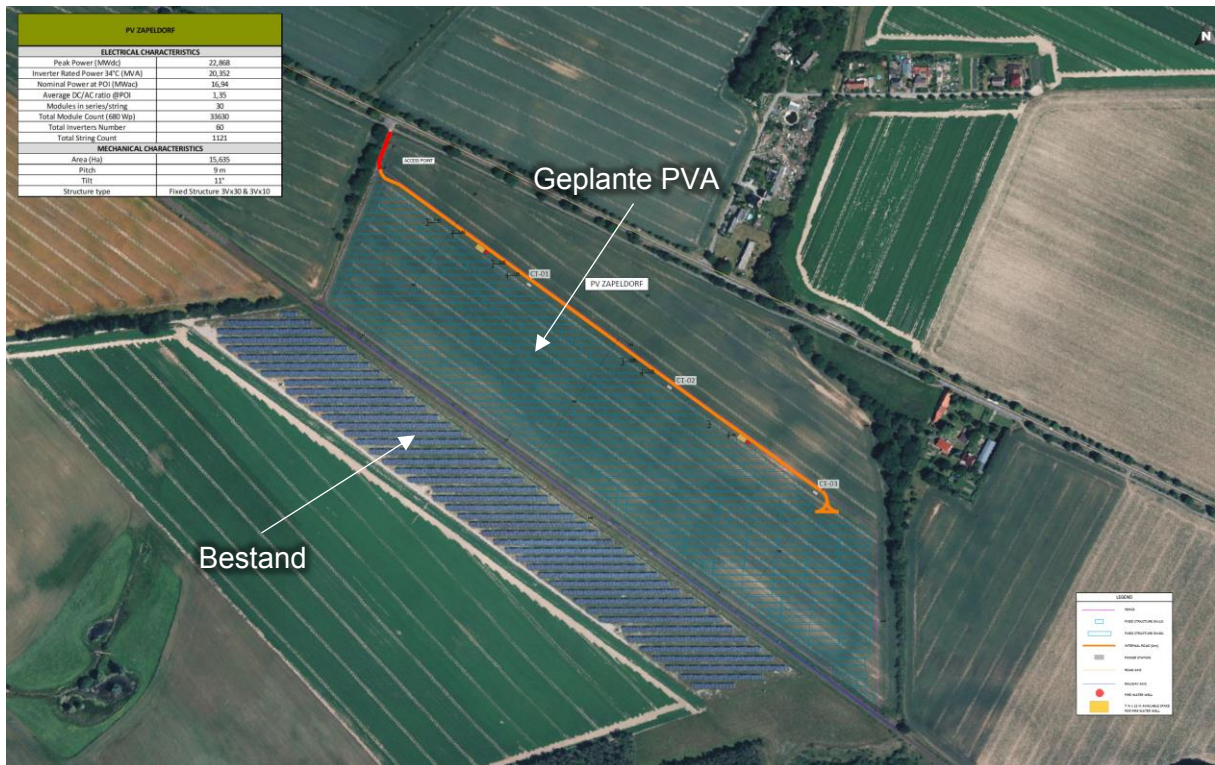


Abbildung 2: Belegungsplan der PVA - Quelle: Auftraggeber

3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Fazit

Innerhalb eines Radius von 100 Metern um die PVA befinden sich keine Gebäude. Daher können erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen in schutzwürdigen Räumen als ausgeschlossen betrachtet werden.

Auf der Bundesstraße B 321 können Fahrzeugführer in Fahrtrichtung Nordwesten Reflexionen im zentralen Sichtfeld erfahren. Um erhebliche Beeinträchtigungen zu verhindern, wird ein Sichtschutz entlang der nördlichen Hälfte der nordöstlichen Anlagengrenze empfohlen. Im Bereich der südlichen Hälfte schirmt ein Gehöft stärkere Reflexionen auf die B 321 ab. Für das Gehöft gelten abweichende Vorgaben - hier sind die LAI-Grenzwerte anzuwenden. Aufgrund der Distanz des Gehöfts zur Photovoltaikanlage werden dort die LAI-Grenzwerte eingehalten.

Auf der Bahnstrecke sind Reflexionen im Sichtfeld von Lokführern in Fahrtrichtung Südosten zu erwarten. Es wurden jedoch keine Blendwirkungen innerhalb der definierten Erheblichkeitsgrenze für Lokführer (ein $\pm 20^\circ$ Sichtfeld, bezogen auf die Fahrtrichtung) festgestellt. Reflexionen, die innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze für Lokführer zu erwarten sind (ein $\pm 30^\circ$ Sichtfeld, bezogen auf die Fahrtrichtung), werden fast durchgehend von einer tiefstehenden Sonne überlagert. Es werden demnach keine erheblichen Beeinträchtigungen für Lokführer erwartet (ausgehend von der PVA); die Situation kann als vertretbar betrachtet werden.

Fazit:

Die PVA kann aus blendungsschutztechnischer Sicht verträglich mit ihrer Umgebung realisiert werden, sofern empfohlene Sichtschutzmaßnahmen umgesetzt werden.

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 [1].

Daher reflektieren Solarmodule bei geringen Einfallswinkeln θ (siehe Abbildung 3) 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 4).

Da bereits Reflexionen von weniger als 1 % des Sonnenlichts zu einer Absolutblendung führen können [2], müssen demnach Einfallswinkel berücksichtigt werden.

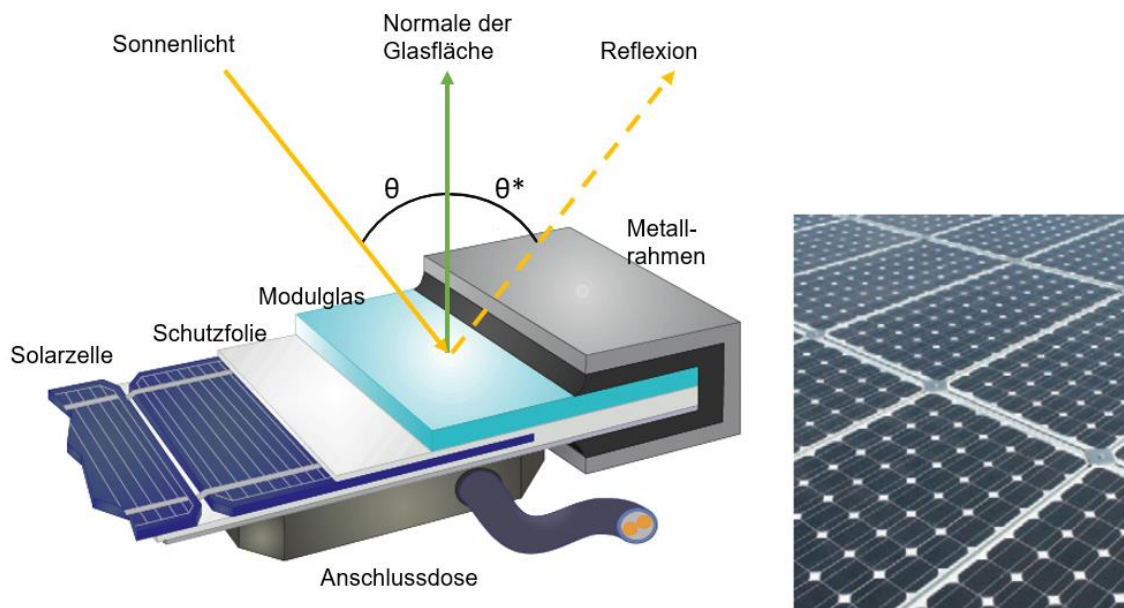


Abbildung 3: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“
– Quelle: [3] (modifiziert)

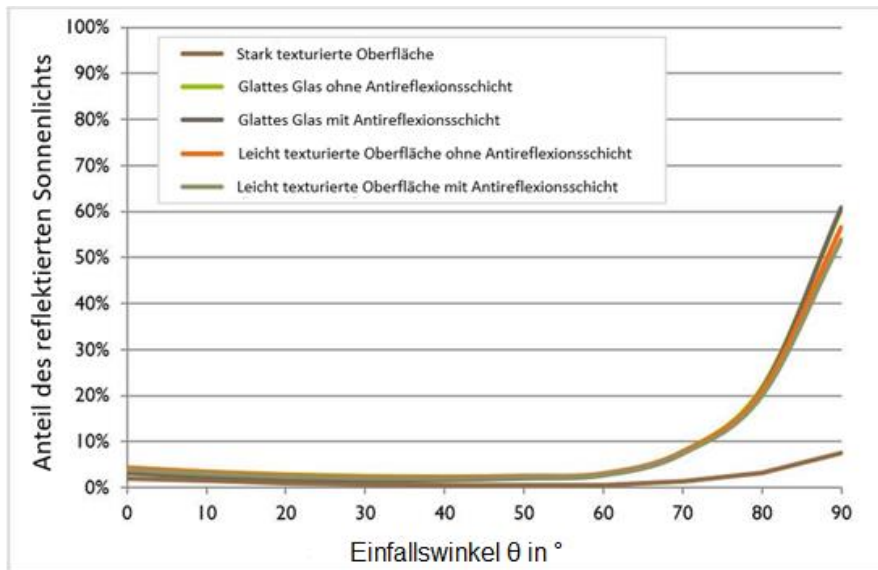


Abbildung 4: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypeen – Quelle: [4], modifiziert

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 5: 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 [2]. 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].

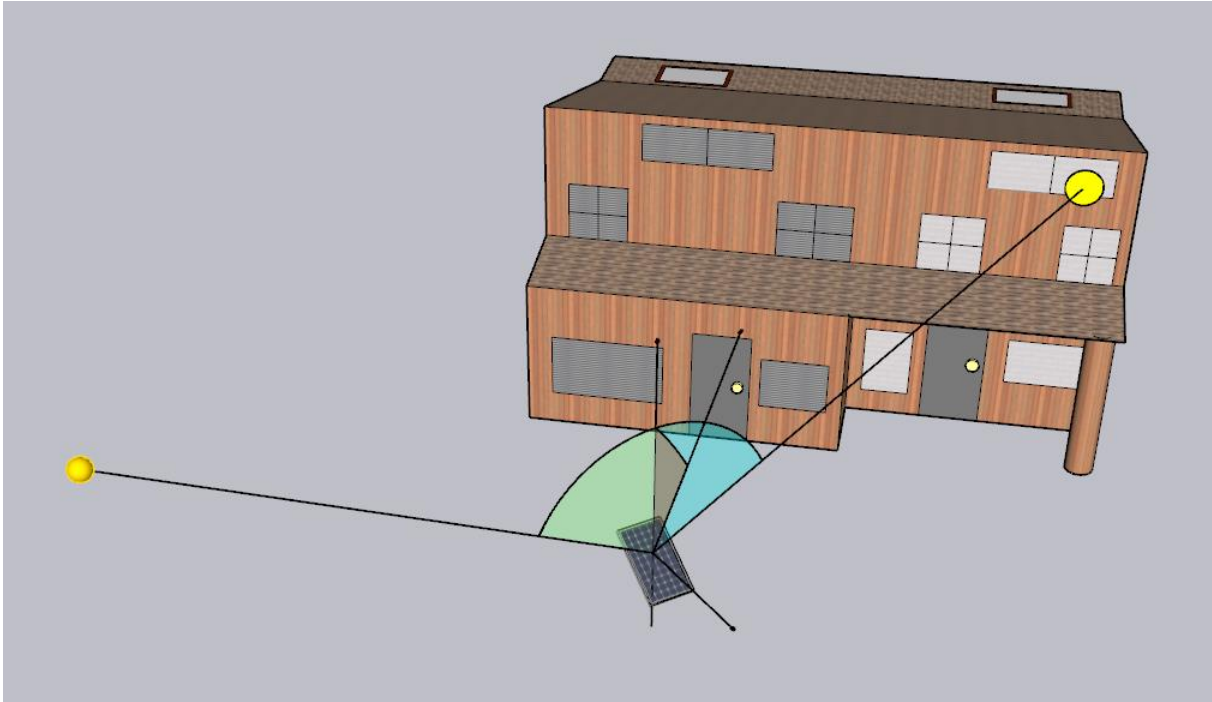


Abbildung 6: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion – Quelle: Eigene Abbildung

4.3 Verwendete Software

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

5 Blendwirkungen auf Gebäude

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) [2].

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 [2].

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.

5.2 Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA

Ab einem Abstand von 100 m zwischen einem Gebäude und der PVA können erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen am Gebäude in der Regel ausgeschlossen werden. Lediglich sehr hoch gelegene Immissionsorte (z. B. Mehrfamilienhäuser mit vielen Etagen) können noch über 100 m hinaus erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen erfahren. Im vorliegenden Fall befinden sich jedoch keine entsprechenden Immissionsorte im Umfeld der PVA.

Abbildung 7 veranschaulicht den Bereich, der sich in einem Abstand von 100 m oder näher zur PVA befindet. Dabei ist zu erkennen, dass sich kein Gebäude innerhalb der 100-Meter-Abstandszone befindet. Dies lässt den Schluss zu, dass erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen in oder an schutzwürdigen Räumen nicht zu erwarten sind. Eine weiterführende, detaillierte Simulation erübrigt sich daher in diesem Kontext.



Abbildung 7: Übersicht der 100-Meter-Abstandszone – Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

6 Blendwirkungen auf den Straßenverkehr

6.1 Auswertungsmethodik

Vorgaben zur Bewertung der Blendwirkungen von Photovoltaikanlagen auf den Straßen- und Schienenverkehr 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 den Straßen- und Schienenverkehr ist es gängige Praxis, ein oder mehrere Sichtfelder (welche sich dann durch ihre Relevanz bzgl. Blendwirkungen unterscheiden) zu definieren und mittels Simulation zu prüfen, ob Reflexionen in diesen Sichtfeldern auftreten. Es wird angenommen, dass die Blickrichtung eines Fahrzeugführers mit der Fahrtrichtung übereinstimmt [6].

Es wird zwischen folgenden Sichtfeldern bzw. Sichtfeldgrenzen unterschieden (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11 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. *Ausnahme: Auf Bahnstrecken wird die Erheblichkeitsgrenze im Rahmen der Begutachtung auf $\pm 20^\circ$ reduziert. Es wird angenommen, dass ein blendfreies $\pm 20^\circ$ Sichtfeld ausreicht, um erhebliche Beeinträchtigungen bei der Wahrnehmung von Bahnsignalen und Hindernissen auf der Strecke ausschließen zu können. Die Annahme stützt sich auf Angaben aus [7] und [8].*
- **Beeinträchtigungsgrenze:** In Anlehnung an [9] 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: Auf Bahnstrecken wird die Beeinträchtigungsgrenze im Rahmen der Begutachtung auf $\pm 30^\circ$ reduziert. Es wird angenommen, dass ein blendfreies $\pm 30^\circ$ Sichtfeld ausreicht, um generell Beeinträchtigungen bei der Wahrnehmung von Bahnsignalen und Hindernissen auf der Strecke ausschließen zu können.*

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 (demnach wird somit der Worst-Case betrachtet). Die Augenhöhe von LKW-Fahrern wird in der Simulation auf 2,65 m über dem Boden definiert, und die von Lokführern auf 2,40 m.

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 wird die Lokale Vegetation als Sichtschutz nicht berücksichtigt.

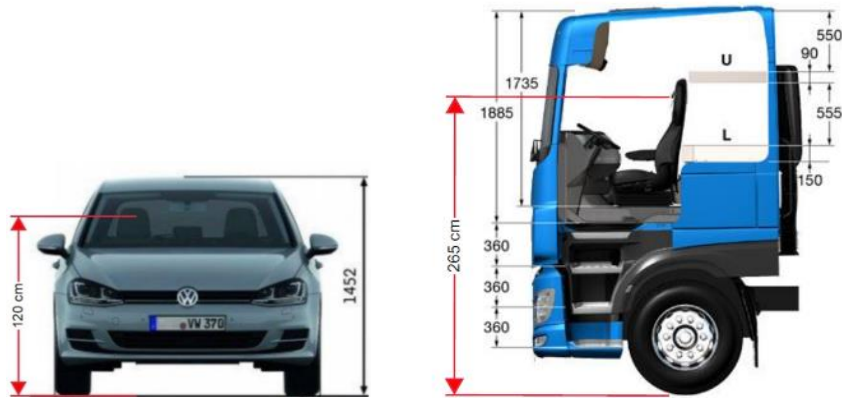


Abbildung 8: Augenhöhe der Straßenverkehrsteilnehmer
 – Quelle: Volkswagen AG (modifiziert), BTS GmbH & Co. KG (modifiziert)

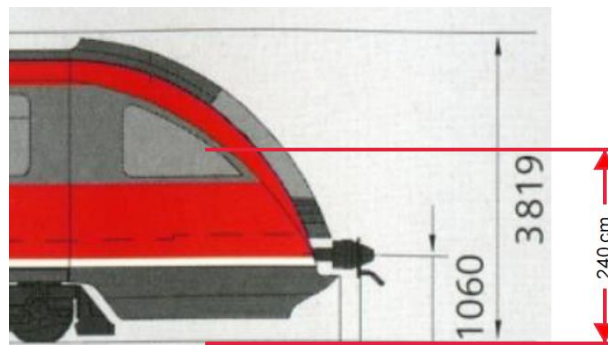


Abbildung 9: Augenhöhe von Lokführern – Quelle: www.nahverkehr-franken.de (modifiziert)

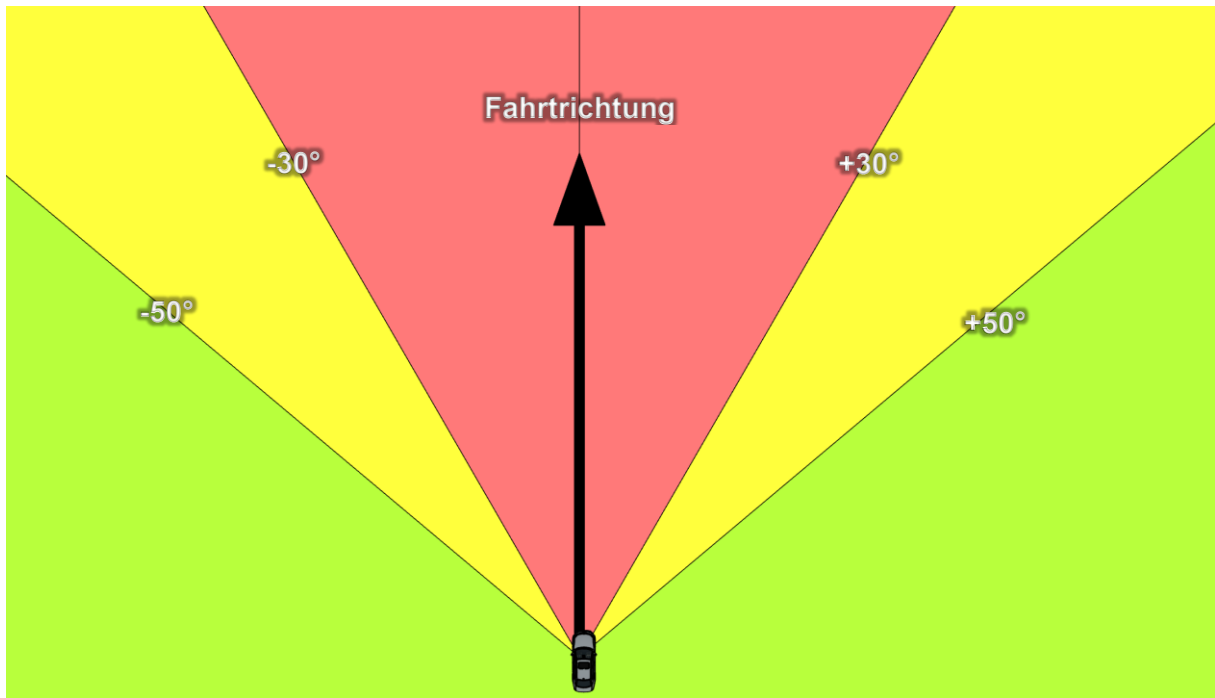


Abbildung 10: Straßenverkehr: Definierte Sichtfelder einer fahrenden Person:
 Erheblichkeitsgrenze: Sichtfeld von $\pm 30^\circ$
 Beeinträchtigungsgrenze: Sichtfeld von $\pm 50^\circ$
 – Quelle: Eigene Abbildung

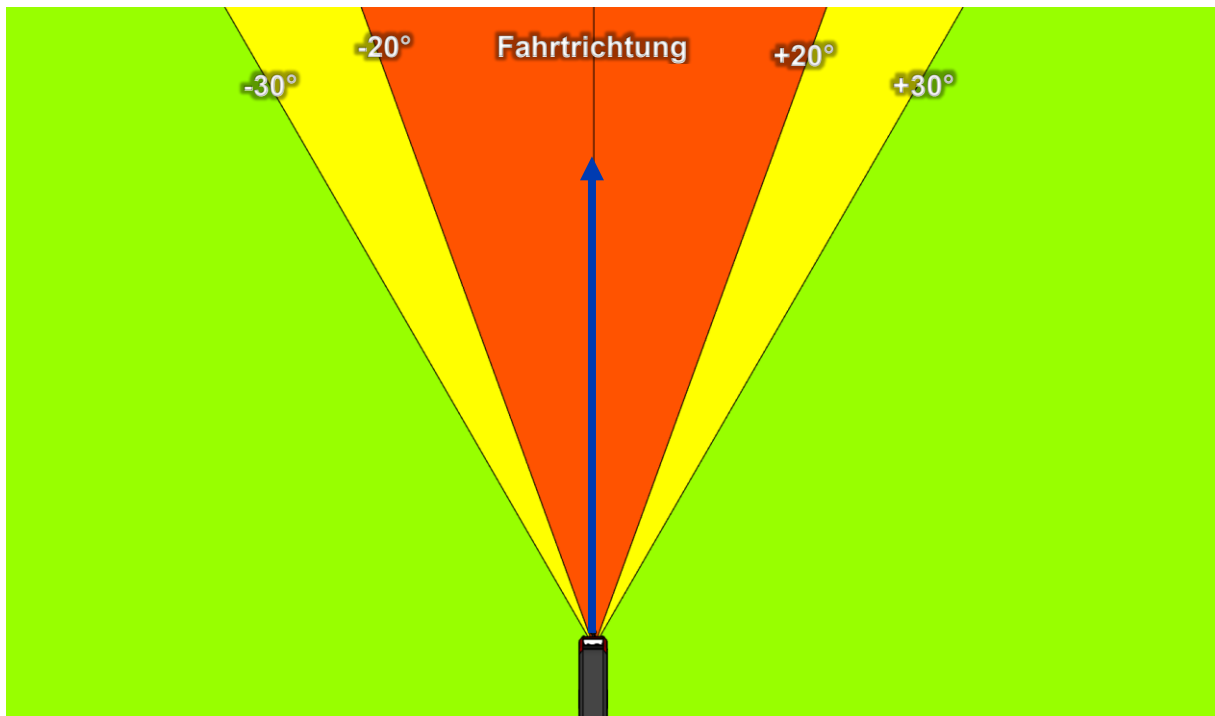


Abbildung 11: Schienenverkehr: Definierte Sichtfelder einer fahrenden Person (Lokführer):
 Erheblichkeitsgrenze: Sichtfeld von $\pm 20^\circ$
 Beeinträchtigungsgrenze: Sichtfeld von $\pm 30^\circ$
 – Quelle: Eigene Abbildung

6.2 Relevante Verkehrswege

In der unmittelbaren Umgebung der PVA wurden folgende Verkehrswege als relevant eingestuft:

- Bundesstraße B 321
- Bahnstrecke

Die übrigen Straßen in der unmittelbaren Umgebung stellen primär Wirtschaftswege dar. Aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens wird ihnen keine Relevanz beigemessen. Nur die als relevant eingestuften Verkehrswege wurden mittels Simulation auf mögliche Blendwirkungen untersucht.



Abbildung 12: Positionen der als relevant eingestuften Verkehrswege - Quelle Karte: OpenStreetMap

6.3 Observationspunkte

Für die Analyse der Blendwirkungen auf die relevanten Verkehrswege wurden sogenannte „Observationspunkte“ (kurz: OP) definiert. In der Simulation fungieren diese OP als Detektionspunkte für einfallende Reflexionen.

Für den Straßenverkehr auf der B 321 in beiden Fahrtrichtungen dienen die Observationspunkte OP 1 bis 10 als Referenz. Diese OP wurden in einer Höhe von 2,65 m über dem Straßenniveau positioniert, was ungefähr der Augenhöhe eines LKW-Fahrers entspricht.

Für den Bahnverkehr in beiden Fahrtrichtungen fungieren Observationspunkte OP 11 bis 18 als Bezugspunkte. Sie wurden in einer Höhe von 2,40 m über dem Schienenniveau festgelegt – das entspricht in etwa der Augenhöhe eines Lokführers.

Abbildung 13 zeigt die Positionen der Observationspunkte.

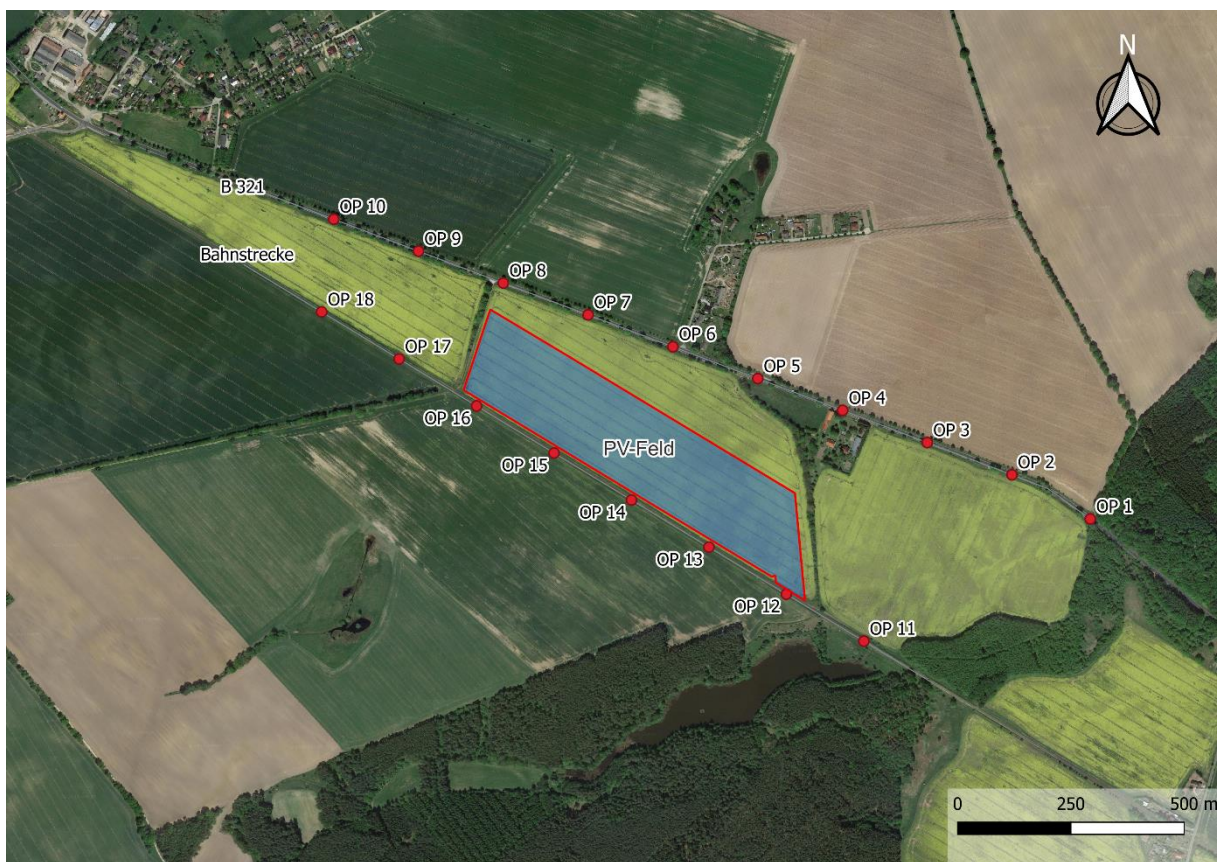


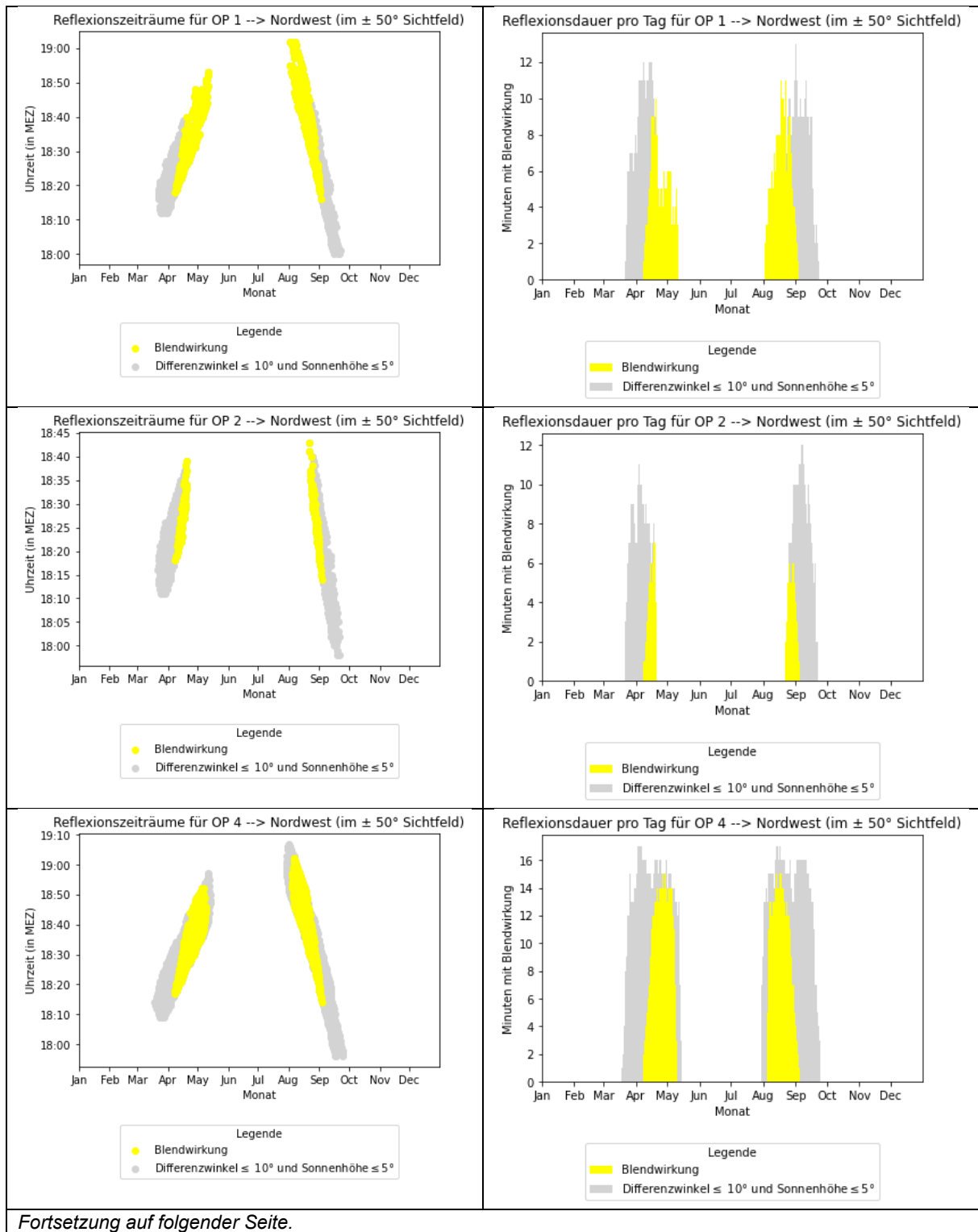
Abbildung 13: Positionen der OP - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

6.4 Ergebnisse

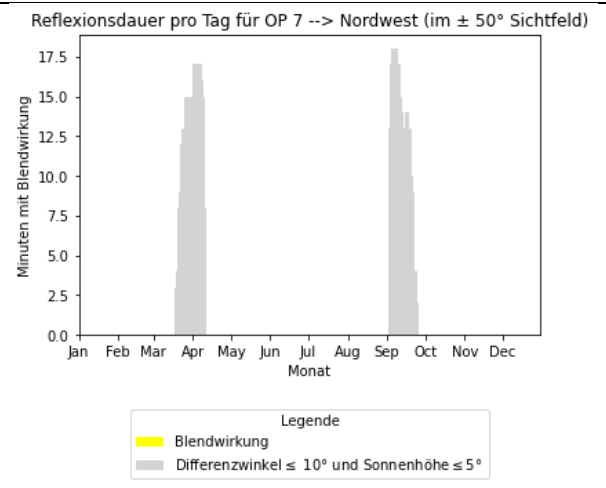
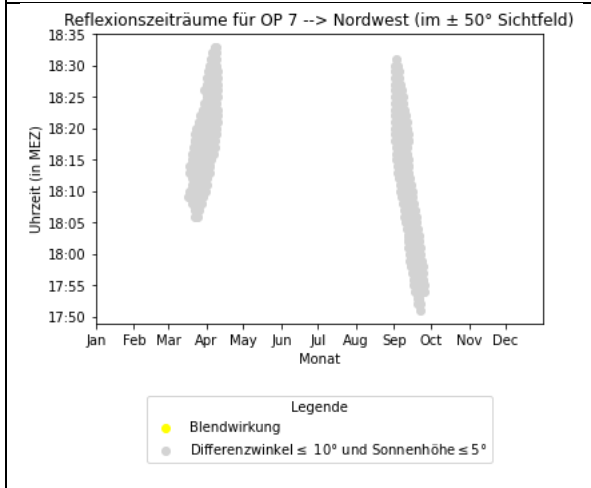
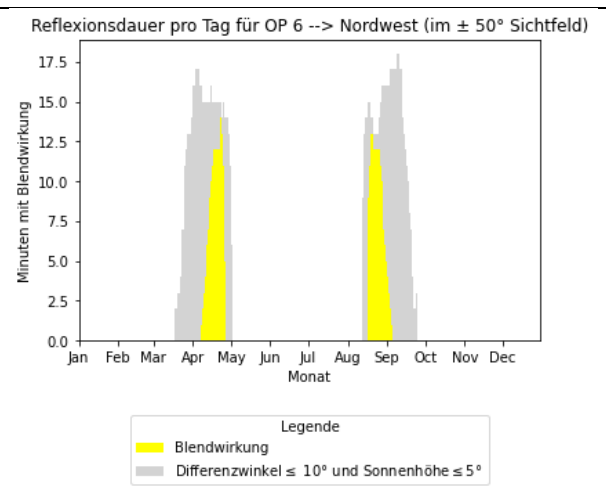
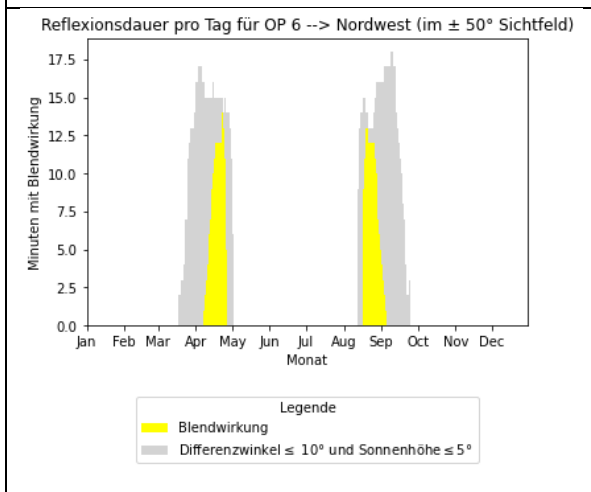
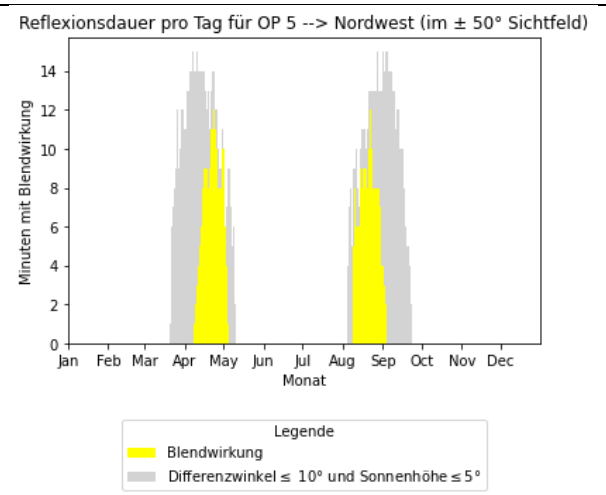
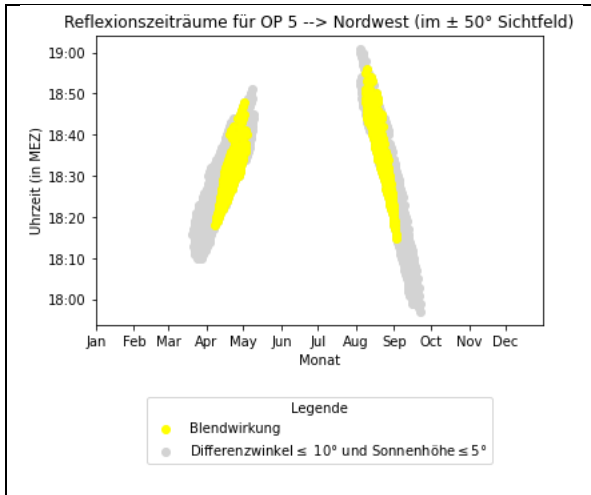
Tabelle 5: Übersicht der Simulationsergebnisse für die Observationspunkte der Verkehrswege (Vegetation wurde nicht berücksichtigt)

Observationspunkt (OP)	Fahrrichtung	Min. Winkel zwischen Fahrrichtung und Blendquelle (ca.)	Werden die Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze (vgl. Abschnitt 6.1) von der Sonne überlagert?	Anmerkung
1	Südosten	> 90°	-	Vegetationsbereiche blockieren teilweise die Sicht auf die PVA.
	Nordwesten	19°	Nein	
2	Südosten	> 90°	-	
	Nordwesten	10°	Nein	
3	Südosten	Keine Reflexionen	-	Dichtere Vegetationsbereiche sowie ein Hof blockieren die Sicht auf die PVA.
	Nordwesten	Keine Reflexionen	-	
4	Südosten	> 90°	-	Sichtschutz empfohlen.
	Nordwesten	5°	Nein	
5	Südosten	> 90°	-	Sichtschutz empfohlen.
	Nordwesten	5°	Nein	
6	Südosten	> 90°	-	Sichtschutz empfohlen.
	Nordwesten	5°	Nein	
7	Südosten	> 90°	-	
	Nordwesten	14°	Ja	
8	Südosten	Keine Reflexionen	-	
	Nordwesten	Keine Reflexionen	-	
9	Südosten	Keine Reflexionen	-	
	Nordwesten	Keine Reflexionen	-	
10	Südosten	Keine Reflexionen	-	
	Nordwesten	Keine Reflexionen	-	
11	Südosten	Keine Reflexionen	-	
	Nordwesten	Keine Reflexionen	-	
12	Südosten	36°	-	
	Nordwesten	> 90°	-	
13	Südosten	24°	Ja	
	Nordwesten	> 90°	-	
14	Südosten	20°	Fast vollständig	
	Nordwesten	> 90°	-	
15	Südosten	20°	Fast vollständig	
	Nordwesten	> 90°	-	
16	Südosten	20°	Fast vollständig	
	Nordwesten	> 90°	-	
17	Südosten	36°	-	
	Nordwesten	> 90	-	
18	Südosten	Keine Reflexionen	-	
	Nordwesten	Keine Reflexionen	-	

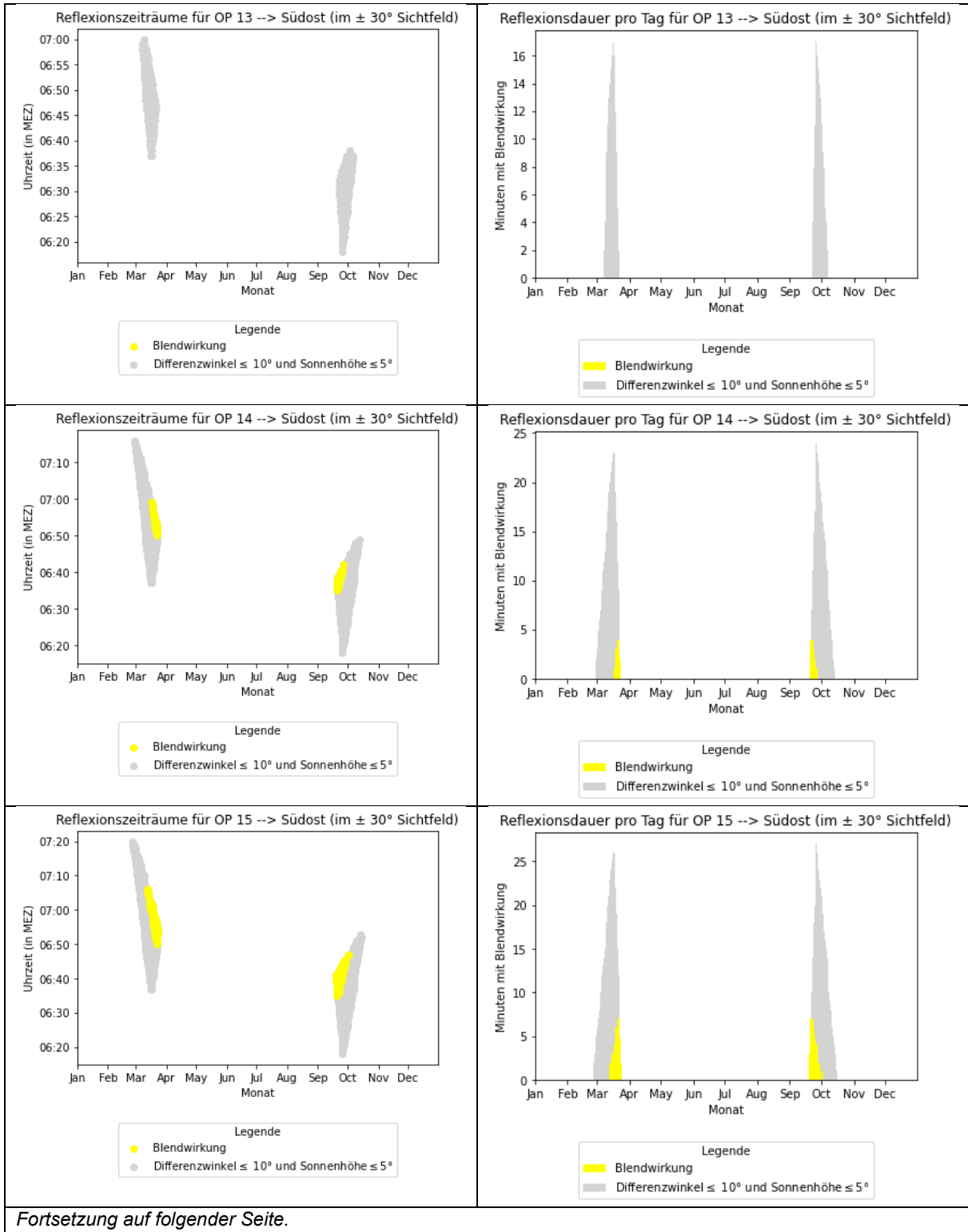
Ergebnisdiagramme 1: Reflexionen auf die Verkehrswege, welche innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze (vgl. Abschnitt 6.1) wahrgenommen werden können (Vegetation wurde nicht berücksichtigt)

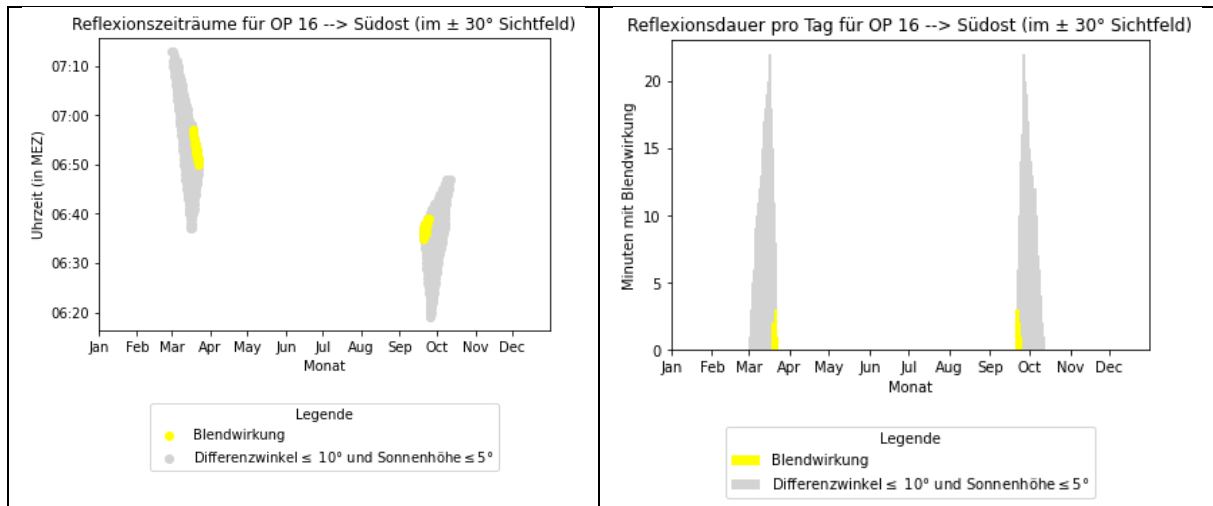


Fortsetzung auf folgender Seite.



Fortsetzung auf folgender Seite.





7 Diskussion der Ergebnisse und Maßnahmen

7.1 Gebäude

Innerhalb eines Radius von 100 Metern um die Photovoltaikanlage befinden sich keine Gebäude. Daher können erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen in schutzwürdigen Bereichen als ausgeschlossen betrachtet werden. Dies betrifft insbesondere das Gehöft östlich der PVA. Aufgrund seiner Distanz zur Anlage werden dort die Grenzwerte eingehalten.

7.2 Straßen

7.2.1 B 321

Auf der Bundesstraße B 321 können Fahrzeugführer in Fahrtrichtung Nordwesten Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Der Straßenabschnitt östlich von OP 1 wird durch ein Waldstück geschützt, dessen Erhalt angenommen wird. Ein Großteil der Reflexionen wird zwischen OP 1 und OP 4 von Vegetation und ggf. einem Hof (dort sind aufgrund der Distanz und der vorgelagerten Vegetation keine wesentlichen Reflexionen mehr zu erwarten) abgeschirmt. Zudem sind die Reflexionen zu OP 1 bis 4 aufgrund der Entfernung (mindestens 500 m) in ihrer Intensität so reduziert, dass keine starken Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Jedoch können ab OP 4 (in Fahrtrichtung Nordwesten) bis kurz vor OP 7 beeinträchtigende Reflexionen im zentralen Sichtfeld von Fahrzeugführern auftreten, wenn diese seitlich auf die Modultische schauen und die Sonne tief im Westen steht. Daher wird ein Sichtschutz entlang der nördlichen Hälfte der nordöstlichen Anlagengrenze empfohlen (siehe Abbildung 15). Dieser Sichtschutz sollte in etwa so hoch wie die Moduloberkante (höchster Punkt der Modultische) sein.

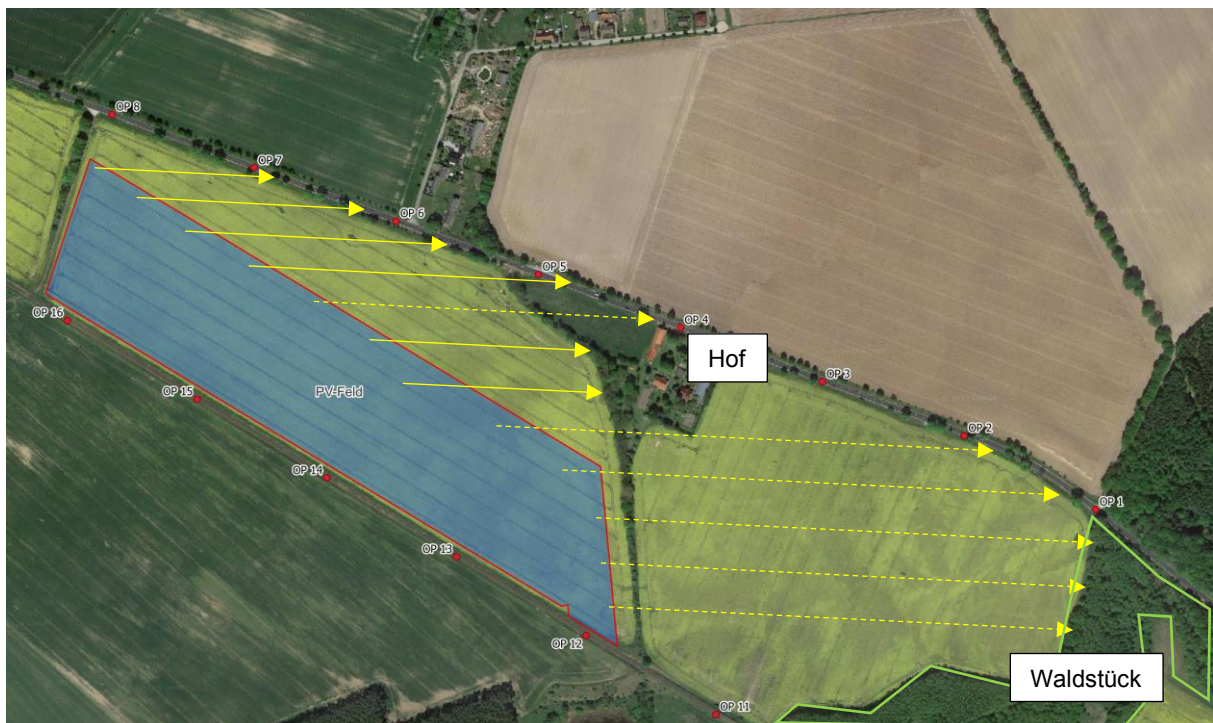


Abbildung 14: Skizze der Reflexionen auf die B 321: Gestrichelte Pfeile deuten teilweise von Vegetation blockierte Reflexionen an; auch wenn Reflexionen in Richtung Hof auftreten werden, sind dort keine erheblichen Belästigungen zu erwarten (siehe Kapitel 7.1) - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro



Abbildung 15: Empfohlener Sichtschutz zum Schutz der B 321 - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

Der empfohlene Sichtschutz kann beispielsweise durch einen erhöhten Anlagenzaun mit Sichtschutzelementen realisiert werden. Die Höhenangaben basieren auf einer ersten Auswertung und sollten lediglich als Orientierungshilfe dienen. Ziel des Sichtschutzes muss es sein, hochsitzenden Verkehrsteilnehmern, wie LKW-Fahrern, die Sicht auf die Modulfläche zu verwehren. Die untersten 0,5 Meter des Zauns können stets freigelassen werden, um die Windlast zu verringern.



Abbildung 16: Beispiel eines Anlagenzaunes mit Sichtschutzelementen - Quelle: Accura Fachhandel

7.2.2 Bahnstrecke

Auf der Bahnstrecke können Lokführer in Fahrtrichtung Südosten Blendwirkungen erfahren. Dabei bleibt das Sichtfeld innerhalb der Erheblichkeitsgrenze (ein Sichtfeld von $\pm 20^\circ$, bezogen auf die Fahrtrichtung) blendfrei. Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze (ein Sichtfeld von $\pm 30^\circ$, bezogen auf die Fahrtrichtung) werden nahezu durchgängig von der Sonne überlagert, die zu den entsprechenden Zeiten tief steht und aus fast der gleichen Richtung scheint wie die Reflexionen. Die Situation wird daher als vertretbar eingestuft. Erhebliche Beeinträchtigungen für Lokführer werden nicht erwartet.

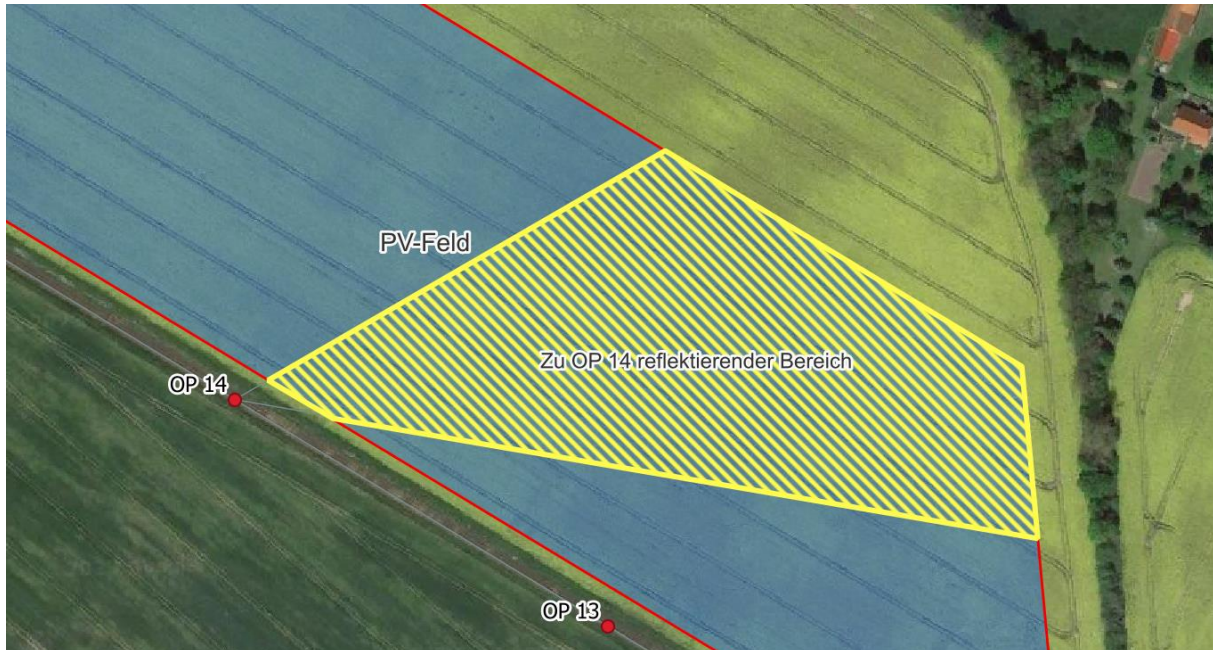


Abbildung 17: Beispiel: Bereich der PVA, aus dem Reflexionen in Richtung OP 14 emittiert werden können:
Zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle besteht ein minimaler Winkel von 20° .
- Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

8 Literaturverzeichnis

- [1] K. Mertens, *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, 5. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2020.
- [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] 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