



[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 HERZHORN

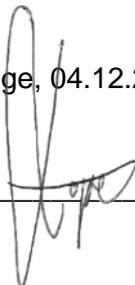
VERSION 2.1

Bearbeitet:

Sachverständiger für Photovoltaik  
Mathias Röper, M. Eng.

Achter de Schün 1  
D-25436 Moorrege  
+49 4122 509100  
[mathias.roeper@sonnwinn.de](mailto:mathias.roeper@sonnwinn.de)  
[www.sonnwinn.de](http://www.sonnwinn.de)

Moorrege, 04.12.2023



---

Review:

Sachverständiger für Photovoltaik  
Dipl.-Ing. (FH) Marco Wilke

Riesenweg 9  
21244 Buchholz in der Nordheide  
+49 (0) 4181 2326110  
[marco.wilke@sonnwinn.de](mailto:marco.wilke@sonnwinn.de)  
[www.sonnwinn.de](http://www.sonnwinn.de)

Buchholz i. d. Nordheide, 04.12.2023



---

## Revisionstabelle

Version	Änderung	Datum	Name
2.1	Redaktionelle Änderungen	04.12.2023	Mathias Röper
2.0	Zusätzliches Anlagengelände betrachtet; geplante Bundesautobahn A 20 betrachtet	30.11.2023	Mathias Röper
1.1	Anpassung der Postleitzahl für Herzhorn	11.04.2023	Mathias Röper
1.0	Erste Fassung	05.04.2023	Mathias Röper

*Das Gutachten ist nur in seiner aktuellen Fassung gültig.*

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
1.1	Fragestellung (Auftragsumfang) .....	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 .....	10
5.1	Auswertungsmethodik .....	10
5.2	Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA .....	11
6	Blendwirkungen auf Verkehrswege .....	12
6.1	Auswertungsmethodik .....	12
6.2	Relevante Verkehrswege .....	14
6.3	Observationspunkte .....	15
6.4	Ergebnisse .....	16
6.5	Azimut = 180°, Modulneigung = 15° .....	16
6.6	Azimut = 180°, Modulneigung = 20° .....	20
6.7	Azimut = 168°, Modulneigung = 15° .....	24
6.8	Azimut = 168°, Modulneigung = 20° .....	26
7	Diskussion der Ergebnisse und empfohlene Maßnahmen .....	28
7.1	Gebäude .....	28
7.2	Verkehrswege .....	28
7.3	Empfehlung.....	30
8	Literaturverzeichnis .....	31
	Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT .....	32

# 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	Trianel Energieprojekte GmbH & Co. KG
Projektname	PVA Herzhorn
Adresse	25379 Herzhorn
Stand der Projektierung	<input type="checkbox"/> Bestand   <input type="checkbox"/> Im Bau   <input checked="" type="checkbox"/> Planung

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

## 1.1 Fragestellung (Auftragsumfang)

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, Büros)
- Straßenverkehr
- Bahnverkehr

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 (Informationen und ggf. Abbildungen)	Auftraggeber
Umliegende Vegetation (Informationen)	Google Earth Pro, OpenStreetMap
Umliegende Bebauung (Informationen)	
Satellitenbilder (Abbildungen)	Google Earth Pro
Kartenausschnitte (Abbildungen)	OpenStreetMap
Höhenmodell (DGM1) (Informationen)	Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein
Informationen/Planungsunterlagen bzgl. der Bundesautobahn A 20	Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH (Planungsstand: November 2023)

## 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 (Straßen, Bahnstrecken)	Eigene Auswertungsmethodik (siehe Kapitel 6)

## 2 Anlagenbeschreibung

Die betrachtete Photovoltaikanlage (PVA) setzt sich aus zwei Projekten zusammen, die aufgrund ihrer unmittelbaren Nähe gemeinsam analysiert wurden. Im vorliegenden Bericht werden die Modulfelder dieser Vorhaben zur Vereinfachung als PV-Feld 1 und PV-Feld 2 bezeichnet. Es wurden vier verschiedene Modulausrichtungen untersucht, die sich aus Kombinationen der Azimute von 180° (Süd) und 168° (Südost) mit den Modulneigungen von 15° und 20° ergeben.

Tabelle 4: Relevante Anlagenparameter

Parameter	Angabe/Wert
Geokoordinaten (Breite, Länge)	53.784165, 9.500029
Art der Anlage	Freiflächenanlage
Modultyp	Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung
Aufständigung	Fest aufgeständert
Größe der PVA	PV-Feld 1: 26,94 ha PV-Feld 2: 7,55 ha
Nennleistung (DC)	-
Modulausrichtung (Azimut)	180° oder 168°
Modulneigung	15° oder 20°
Höhe Modulunterkante	0,8 m
Höhe Moduloberkante	2,7 m oder 3,3 m (je nach Modulneigung)



Abbildung 1: Grundriss der PV-Flächen

### 3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die geplante Photovoltaikanlage wird in schutzwürdigen Räumen, wie Wohnräumen, keine erheblichen Belästigungen durch Blendwirkungen verursachen. Dies gilt sowohl für eine Modulausrichtung nach Süden als auch nach Südosten (Azimut =  $168^\circ$ ), vorausgesetzt, die Modulneigung liegt zwischen  $15^\circ$  und  $20^\circ$  (geprüfter Bereich).

Bei einer Ausrichtung der Module in Feld 2 nach Südosten (Azimut =  $168^\circ$ ) können erhebliche Beeinträchtigungen auf der A 20 durch Blendwirkungen nicht ausgeschlossen werden. Mit einer Süd-Ausrichtung (Azimut =  $180^\circ$ ) und einer Modulneigung zwischen  $15^\circ$  und  $20^\circ$  sind keine wesentlichen Beeinträchtigungen (durch Feld 2) auf der geplanten Bundesautobahn A 20 zu erwarten. Es wird demnach empfohlen, PV-Feld 2 nach Süden auszurichten.

Feld 1 wird bei einer Ausrichtung nach Süden oder Südosten (Azimut =  $168^\circ$ ) den Straßenverkehr auf der A 20 nicht erheblich blenden. Bei einer Südost-Ausrichtung sind allerdings moderat störende Blendwirkungen im äußeren Sichtfeld möglich. Dabei wird ein minimaler Winkel von  $40^\circ$  zwischen Fahrtrichtung und Reflexion eingehalten. Eine gemeinsame Süd-Ausrichtung von Feld 1 und Feld 2 führt dazu, dass keine zusätzlichen Beeinträchtigungen auf der A 20 erwartet werden.

Für den Bahnverkehr gilt: Werden die Modultische parallel zum Schienenverlauf (Südost-Ausrichtung) ausgerichtet, sind keine Blendwirkungen für Lokführer zu erwarten. Bei einer Süd-Ausrichtung können Lokführer, die in Richtung Osten fahren, seitlich auf die Modultische blicken, was zu bestimmten Zeiten Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld hervorrufen kann. Entsprechende Reflexionen treten jedoch nur in wenigen Zeiträumen im Jahr und für maximal (ca.) 15 Minuten pro Tag auf. Zudem werden die Reflexionen an den Modulen überwiegend von der direkten Sonnenstrahlung überlagert.

## 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  $\theta$  (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.

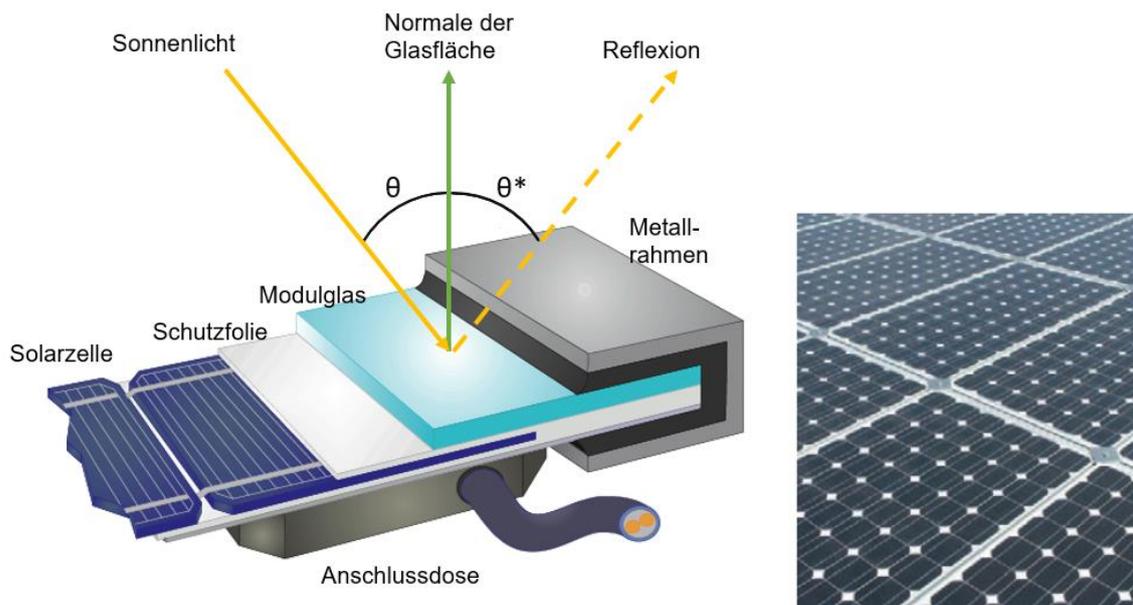


Abbildung 2: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“  
– Quelle: [3] (modifiziert)

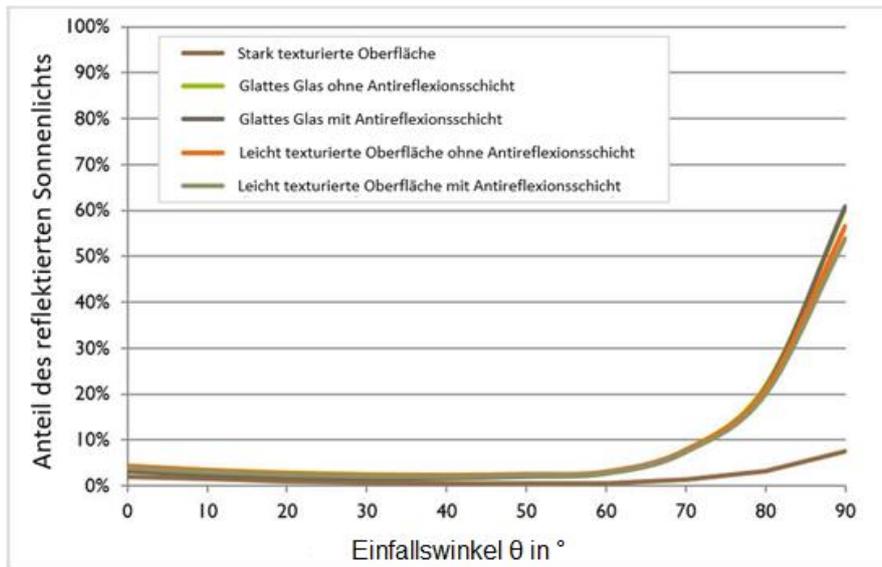


Abbildung 3: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypeen – Quelle: [4], modifiziert

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 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].

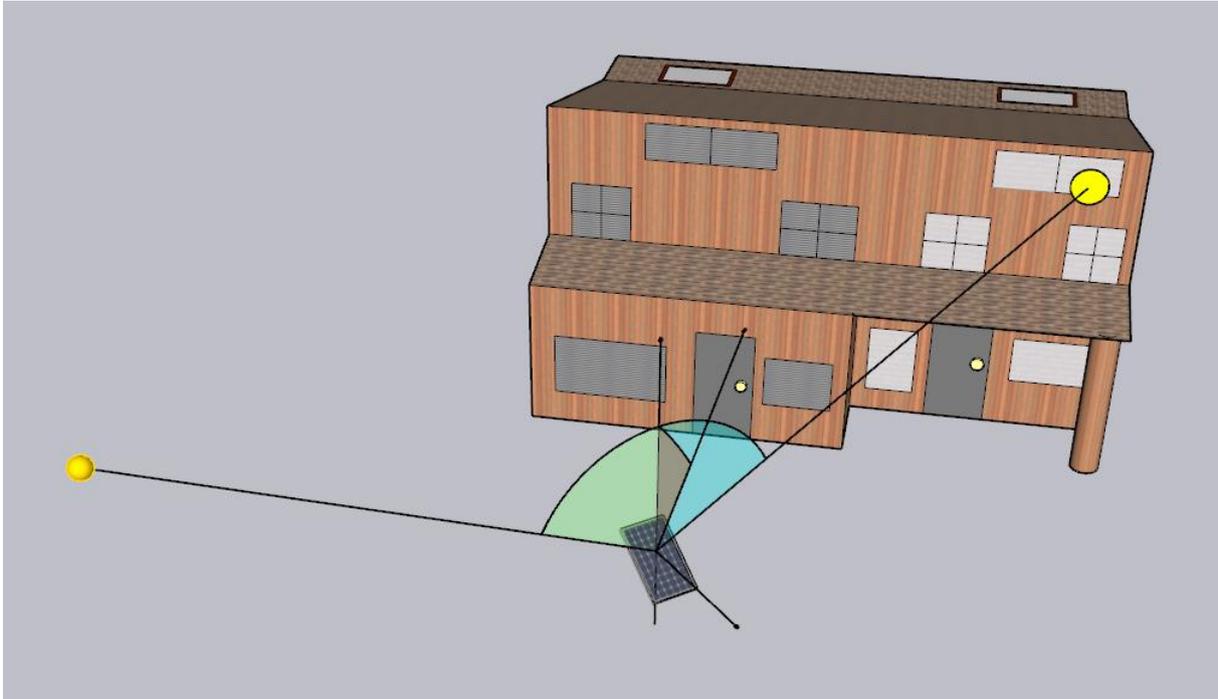


Abbildung 5: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion – Quelle: Eigene Abbildung

## 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, wobei 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

### 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.

## 5.2 Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA

Ab einem Abstand zwischen Immissionsort (z. B. Wohngebäude) und einer nach Süden ausgerichteten PVA (dies umfasst auch eine leichte Südost-Ausrichtung) von 100 m können erhebliche Belästigungen (i. d. R.) pauschal ausgeschlossen werden [1].

Abbildung 6 veranschaulicht den Bereich, der sich 100 Meter oder näher zur Photovoltaikanlage befindet. In dieser 100-Meter-Abstandszone existieren zwar Gebäude, diese liegen jedoch ausschließlich nördlich der Anlage. Da eine nach Süden oder leicht nach Südosten ausgerichtete Photovoltaikanlage nicht nach Norden reflektieren kann, werden Immissionsorte in dieser Richtung lediglich die nicht reflektierenden Modulrückseiten einsehen können.

Daraus folgt, dass erhebliche Belästigungen durch Blendwirkungen der Photovoltaikanlage auf die umliegende Nachbarschaft pauschal ausgeschlossen werden können. In diesem spezifischen Kontext ist daher eine detaillierte Simulation der Blendwirkungen nicht erforderlich.



Abbildung 6: Übersicht der 100-Meter-Zone

## 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 9 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.

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, Waldflächen oder Gebäude berücksichtigt.

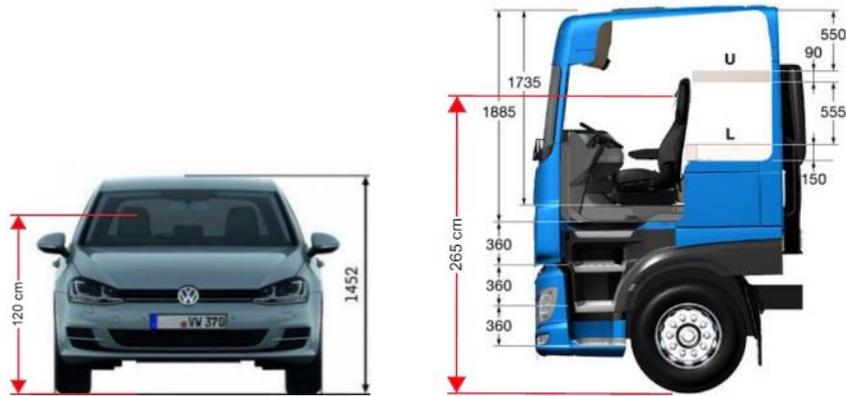


Abbildung 7: Augenhöhe der Straßenverkehrsteilnehmer  
 – Quelle: Volkswagen AG (modifiziert), BTS GmbH & Co. KG (modifiziert)

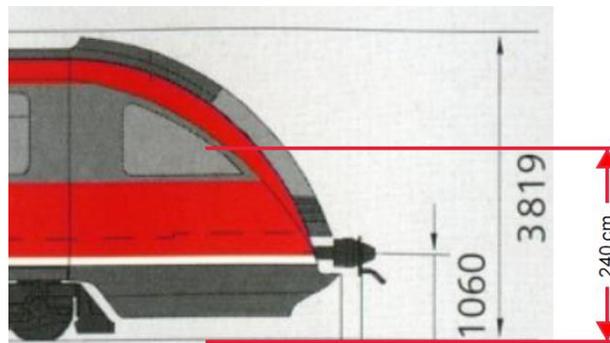


Abbildung 8: Augenhöhe von Lokführern – Quelle: [www.nahverkehr-franken.de](http://www.nahverkehr-franken.de) (modifiziert)

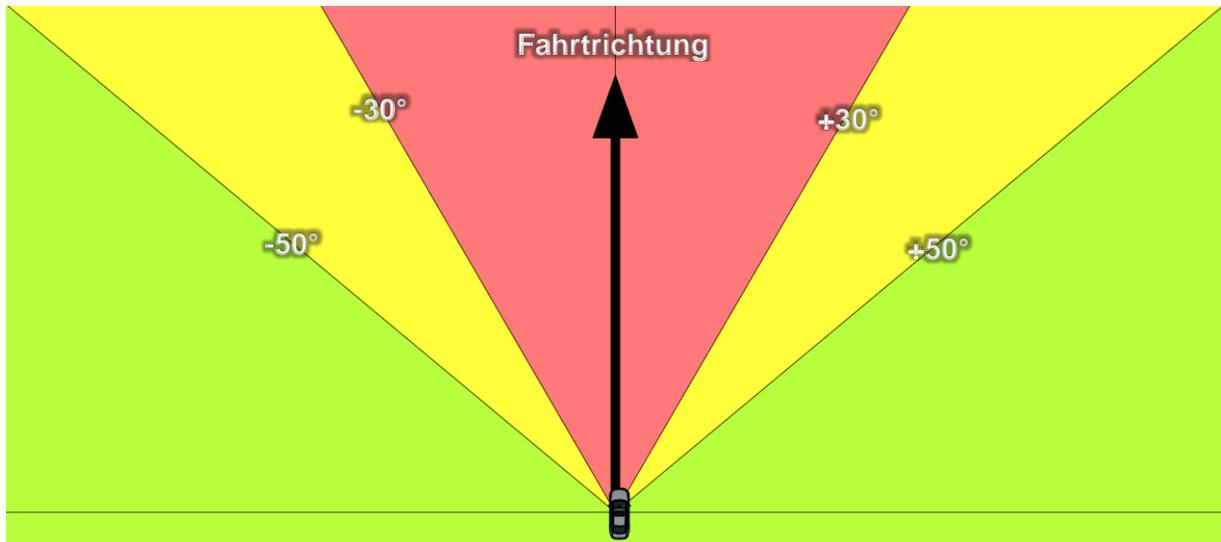


Abbildung 9: Definierte Sichtfelder eines Fahrzeugführers:  
 Erheblichkeitsgrenze: Sichtfeld von  $\pm 30^\circ$   
 Beeinträchtigungsgrenze: Sichtfeld von  $\pm 50^\circ$   
 – Quelle: Eigene Abbildung

## 6.2 Relevante Verkehrswege

In der Umgebung der Photovoltaikanlage wurden folgende Verkehrswege als relevant klassifiziert:

- Bundesautobahn A 20 (geplant)
- Bahnstrecke (Elmshorn - Herzhorn)

Im Rahmen der Simulation wurden nur die Verkehrswege auf Blendwirkungen hin untersucht, die als relevant eingestuft wurden. Wirtschaftswege werden aufgrund ihres niedrigen Verkehrsaufkommens als nicht relevant betrachtet. Die Gemeindestraßen im Wohngebiet bieten keine direkte Sicht auf die Photovoltaikanlage, wodurch erhebliche Beeinträchtigungen durch Blendwirkungen dort ausgeschlossen werden können. Die Gemeindestraßen nördlich der PVA werden keine Reflexionen erfahren, da von dort nicht die Modulvorderseiten gesehen werden können.

Die Bundesautobahn A 20 befindet sich derzeit noch in der Planungsphase. Für die Analyse wurde sie jedoch auf Basis der aktuellen Planungsunterlagen berücksichtigt. Die geplante A 20 soll etwa 65 Meter östlich von PV-Feld 2 verlaufen und einen Nordost-Südwest-Verlauf aufweisen. Die Fahrbahn ist auf einem Damm geplant. Die entsprechenden Höhenwerte wurden in der Simulation berücksichtigt.

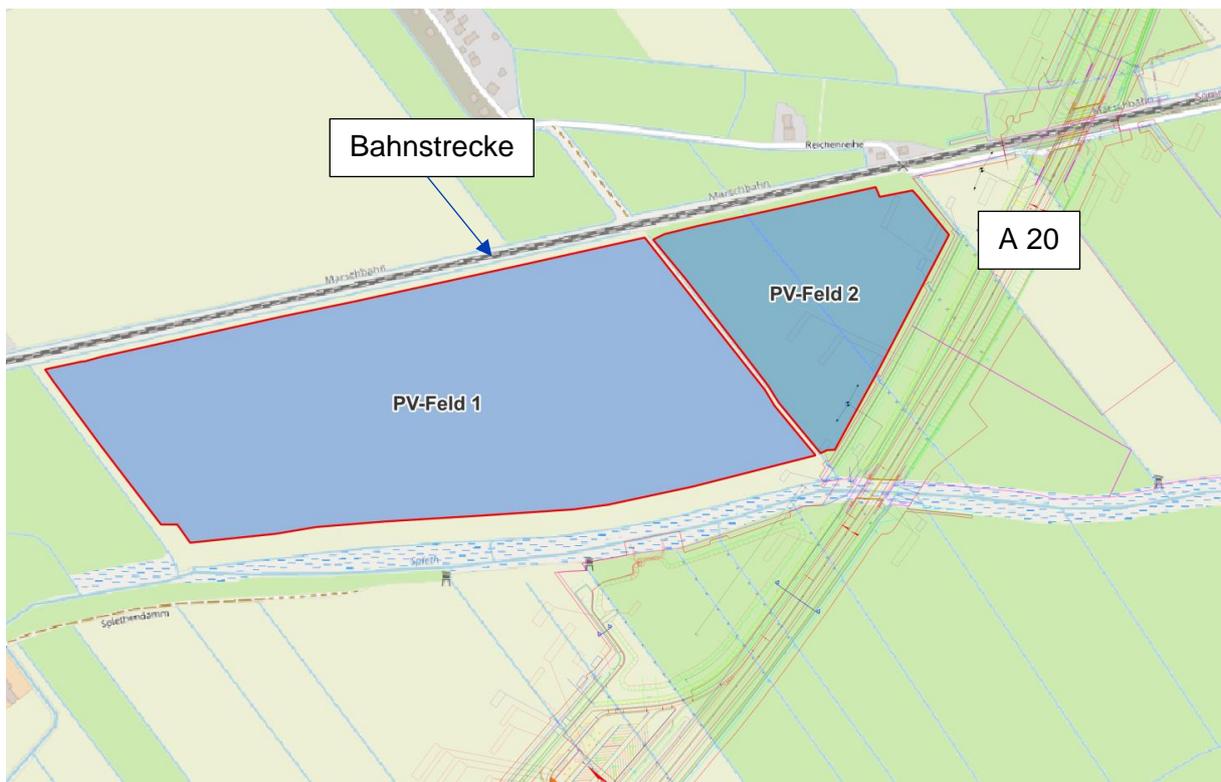


Abbildung 10: Positionen der als relevant eingestuften Verkehrswege

### 6.3 Observationspunkte

Für die Auswertung der Blendwirkungen auf die relevanten Verkehrswege wurden sogenannte „Observationspunkte“ (OP) definiert. Diese OP fungieren in der Simulation als Detektorpunkte für auftreffende Reflexionen. Insgesamt wurden 20 OP (OP S1 bis S12 sowie B1 bis B8) zur Analyse der Blendwirkungen auf die Verkehrswege festgelegt:

- OP S1 bis S6 repräsentieren den Verkehr auf der A 20 in Richtung Nordosten.
- OP S7 bis S12 stellen den Verkehr auf der A 20 in Richtung Südwesten dar.
- OP B1 bis B8 repräsentieren den Schienenverkehr in beiden Fahrtrichtungen.

Die OP Sx wurden an der äußeren Fahrbahnmarkierung der jeweiligen Fahrbahn definiert und in einer Höhe von 2,65 Metern über dem geplanten Straßenniveau positioniert, was ungefähr der Augenhöhe eines LKW-Fahrers entspricht.

Die OP Bx wurden in einer Höhe von 2,40 Metern über dem Schienenniveau platziert.

Abbildung 11 zeigt die Positionen der Observationspunkte.



Abbildung 11: Positionen der OP Sx und Bx

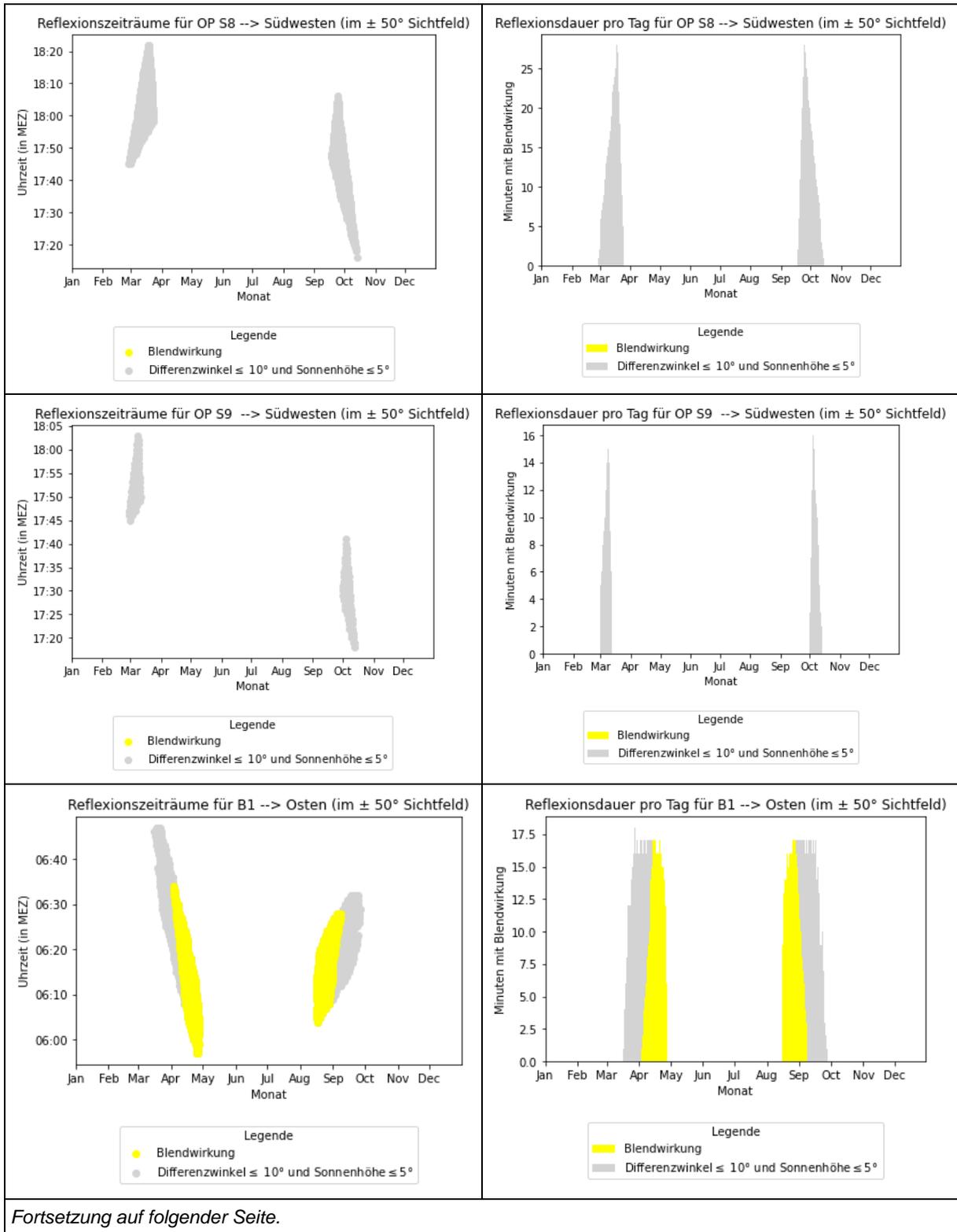
## 6.4 Ergebnisse

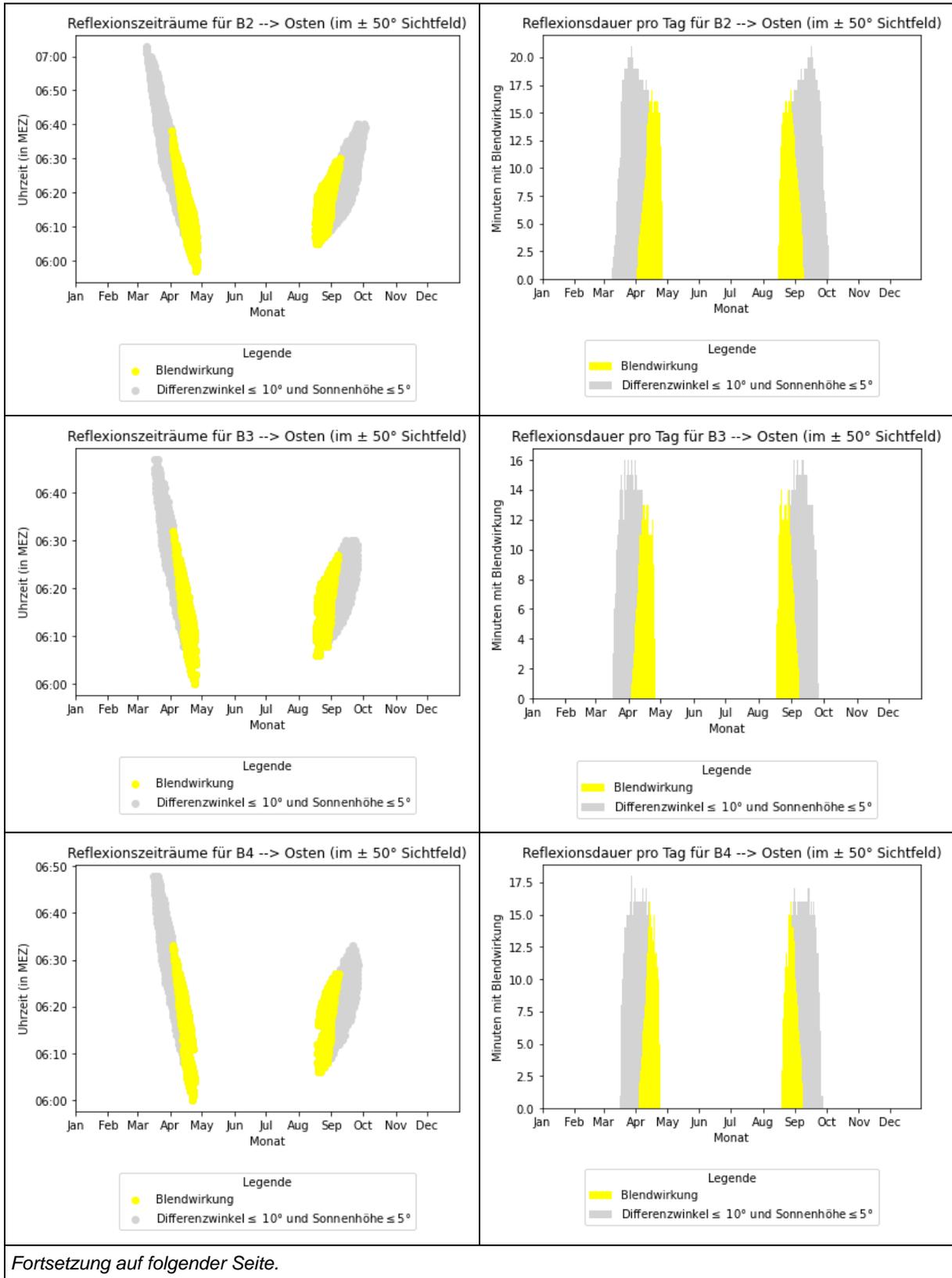
### 6.5 Azimut = 180°, Modulneigung = 15°

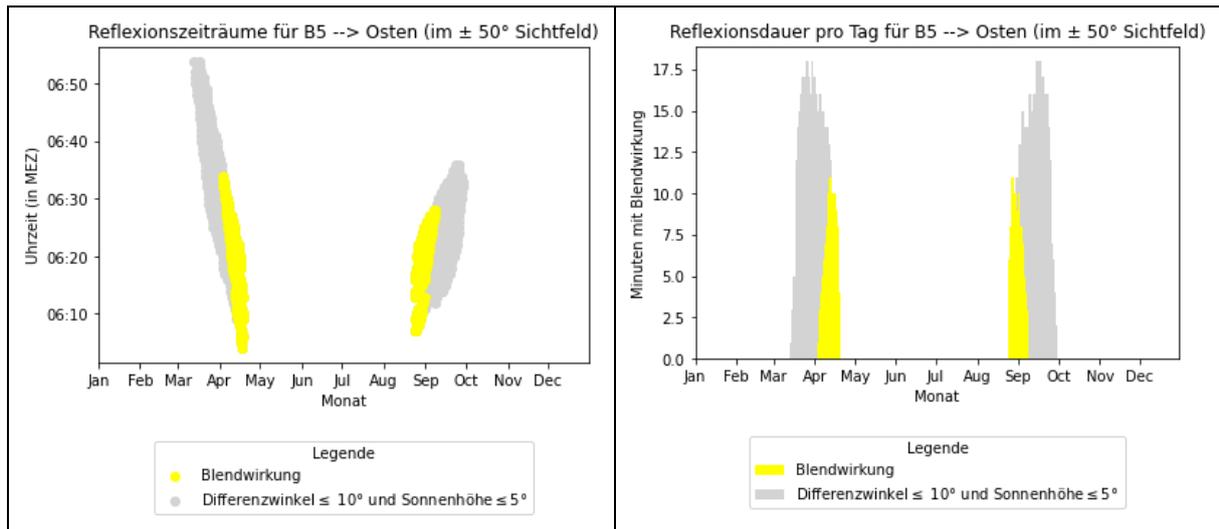
Tabelle 5: Übersicht der Simulationsergebnisse für die OP Sx und Bx - Azimut = 180°, Modulneigung = 15°

Observationspunkt (OP)	Fahrtrichtung	Min. Winkel zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle	Werden die Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze vollständig von der Sonne überlagert?	Anmerkung
S1	Nordosten	keine Reflexionen	-	-
S2		> 90°	-	-
S3		> 90°	-	-
S4		> 90°	-	-
S5		> 90°	-	-
S6		keine Reflexionen	-	-
S7	Südwesten	keine Reflexionen	-	-
S8		38°	ja	-
S9		45°	ja	-
S10		51°	-	-
S11		64°	-	-
S12		keine Reflexionen	-	-
B1	Osten	3°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B2	Osten	3°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B3	Osten	2°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B4	Osten	1°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B5	Osten	1°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B6	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B7	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B8	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
<b>Legende</b>				
Erhebliche Beeinträchtigung möglich (relevante Reflexionen sind innerhalb der Erheblichkeitsgrenze zu erwarten)				
Beeinträchtigung möglich (relevante Reflexionen sind innerhalb der Beeinträchtigungs-, aber nicht innerhalb der Erheblichkeitsgrenze zu erwarten)				
Keine Beeinträchtigungen möglich (es treten keine relevanten Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze auf)				

Ergebnisdiagramme 1: Ergebnisse für die OP Sx und Bx (sofern Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze auftreten) - Azimut = 180°, Modulneigung = 15°





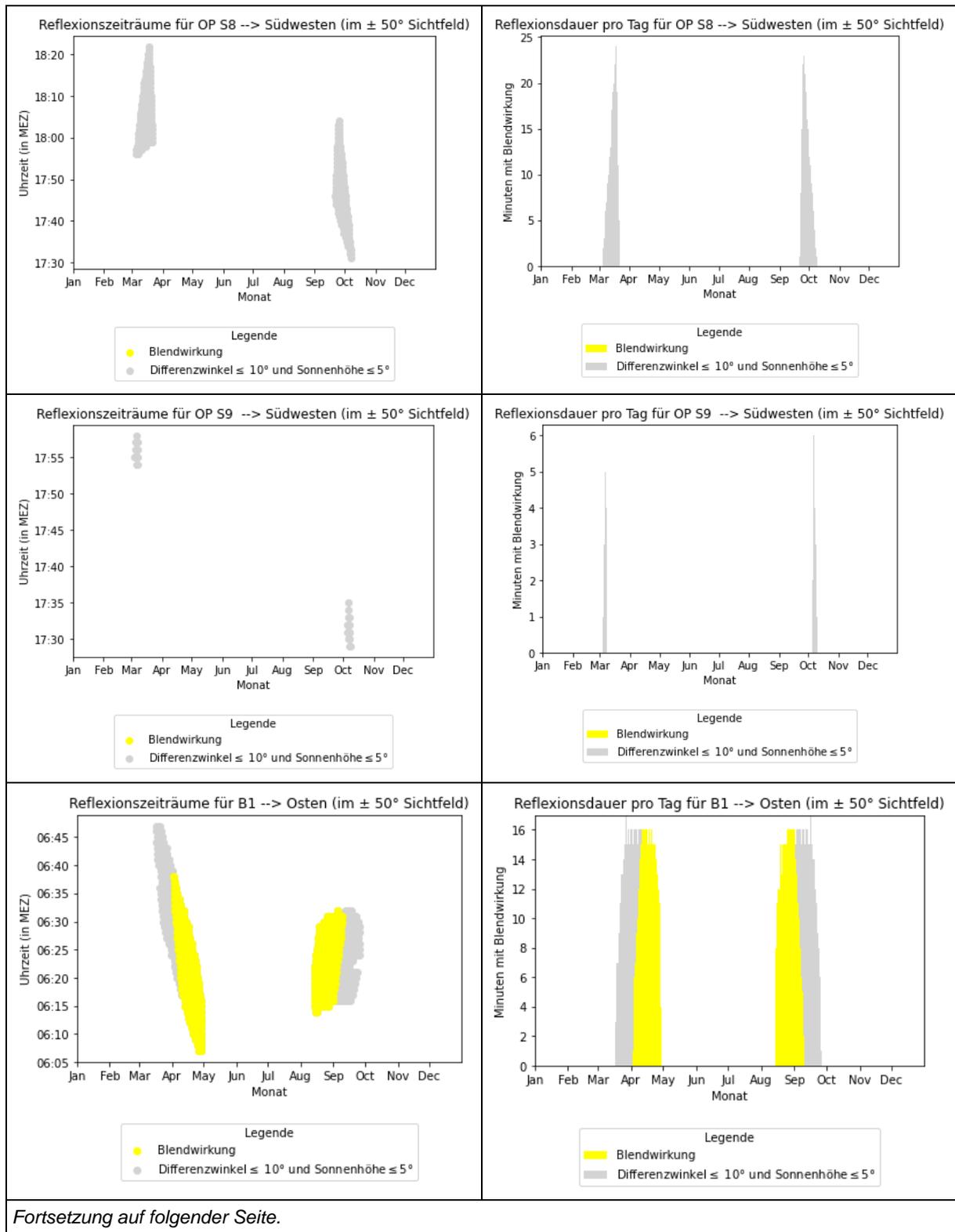


## 6.6 Azimut = 180°, Modulneigung = 20°

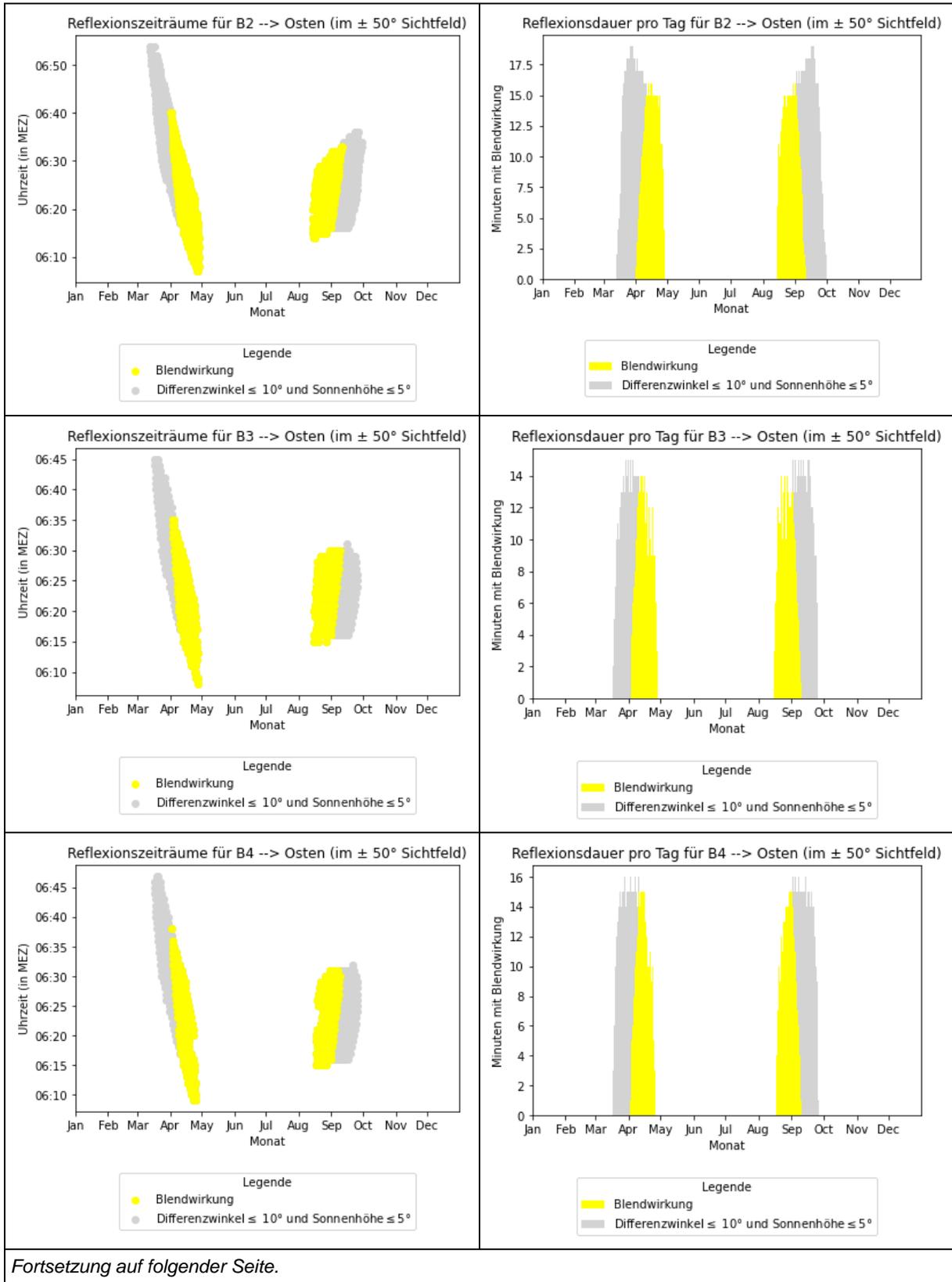
Tabelle 6: Übersicht der Simulationsergebnisse für die OP Sx und Bx - Azimut = 180°, Modulneigung = 20°

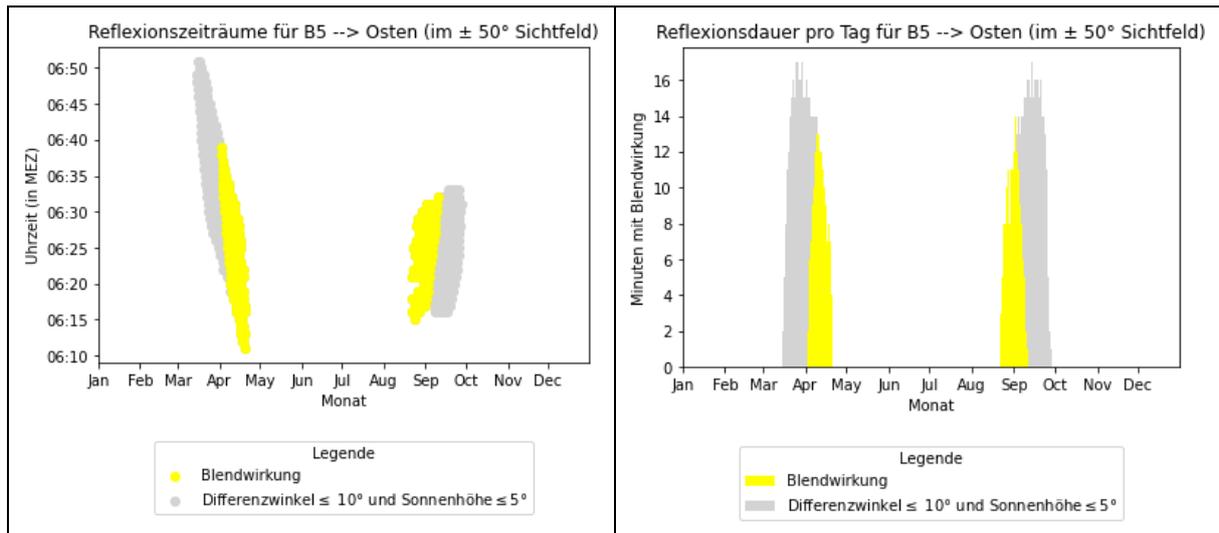
Observationspunkt (OP)	Fahrtrichtung	Min. Winkel zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle	Werden die Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze vollständig von der Sonne überlagert?	Anmerkung
S1	Nordosten	keine Reflexionen	-	-
S2		> 90°	-	-
S3		> 90°	-	-
S4		> 90°	-	-
S5		> 90°	-	-
S6		keine Reflexionen	-	-
S7	Südwesten	keine Reflexionen	-	-
S8		43°	ja	-
S9		48°	ja	-
S10		51°	-	-
S11		64°	-	-
S12		keine Reflexionen	-	-
B1	Osten	3°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B2	Osten	2°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B3	Osten	2°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B4	Osten	2°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B5	Osten	1°	nein	-
	Westen	> 90°	-	-
B6	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B7	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B8	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
<b>Legende</b>				
Erhebliche Beeinträchtigung möglich (relevante Reflexionen sind innerhalb der Erheblichkeitsgrenze zu erwarten)				
Beeinträchtigung möglich (relevante Reflexionen sind innerhalb der Beeinträchtigungs-, aber nicht innerhalb der Erheblichkeitsgrenze zu erwarten)				
Keine Beeinträchtigungen möglich (es treten keine relevanten Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze auf)				

Ergebnisdiagramme 2: Ergebnisse für die OP Sx und Bx (sofern Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze auftreten) - Azimut = 180°, Modulneigung = 20°



Fortsetzung auf folgender Seite.



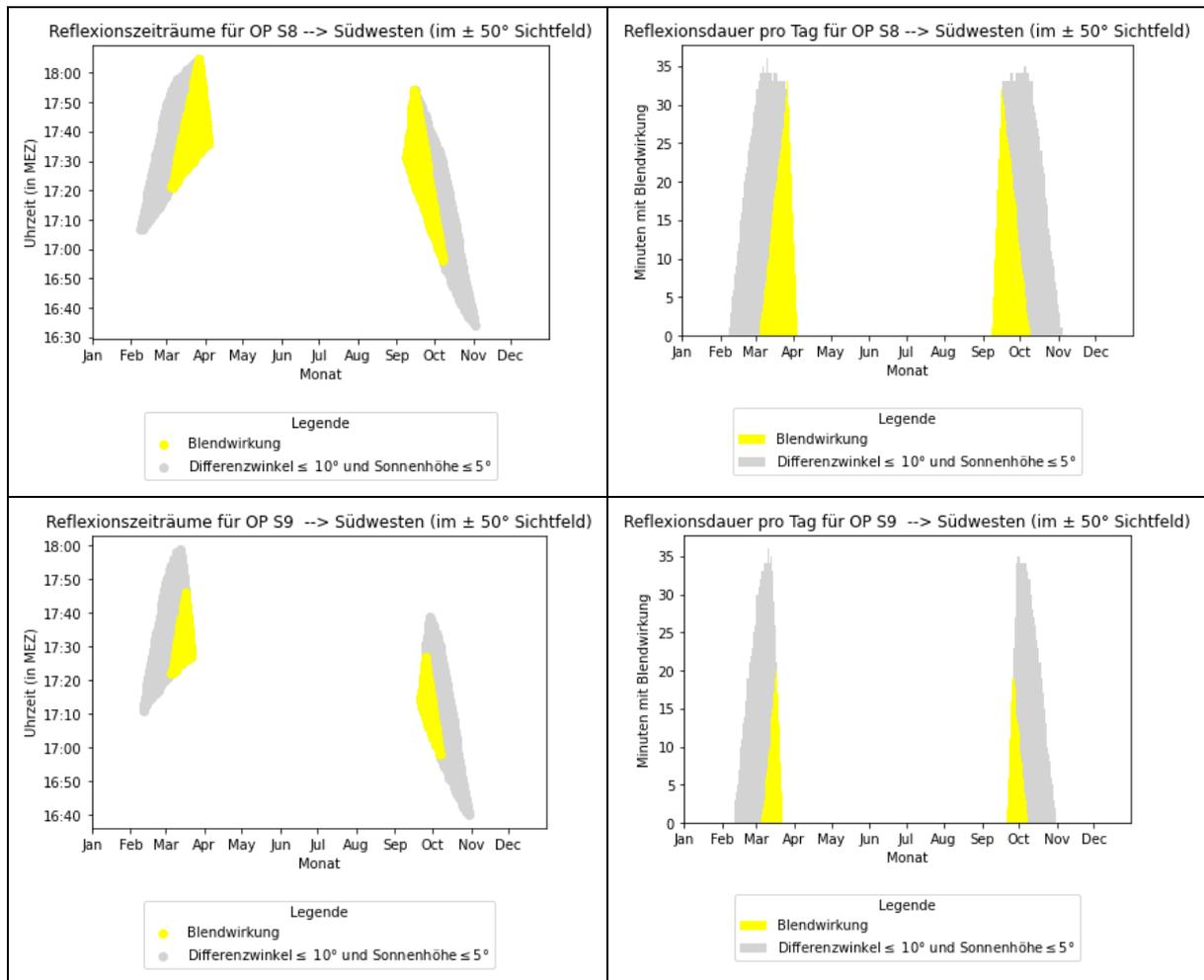


## 6.7 Azimut = 168°, Modulneigung = 15°

Tabelle 7: Übersicht der Simulationsergebnisse für die OP Sx und Bx - Azimut = 168°, Modulneigung = 15°

Observationspunkt (OP)	Fahrtrichtung	Min. Winkel zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle	Werden die Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze vollständig von der Sonne überlagert?	Anmerkung
S1	Nordosten	keine Reflexionen	-	-
S2		> 90°	-	-
S3		> 90°	-	-
S4		> 90°	-	-
S5		> 90°	-	-
S6		keine Reflexionen	-	-
S7	Südwesten	keine Reflexionen	-	-
S8		26°	nein	Bei den Reflexionen von Feld 1 wird ein min. Winkel von 45° eingehalten.
S9		34°	nein	Bei den Reflexionen von Feld 1 wird ein min. Winkel von 42° eingehalten.
S10		50°	-	-
S11		64°	-	-
S12		keine Reflexionen	-	-
B1	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B2	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B3	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B4	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B5	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B6	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B7	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B8	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
<b>Legende</b>				
Erhebliche Beeinträchtigung möglich (relevante Reflexionen sind innerhalb der Erheblichkeitsgrenze zu erwarten)				
Beeinträchtigung möglich (relevante Reflexionen sind innerhalb der Beeinträchtigungs-, aber nicht innerhalb der Erheblichkeitsgrenze zu erwarten)				
Keine Beeinträchtigungen möglich (es treten keine relevanten Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze auf)				

Ergebnisdiagramme 3: Ergebnisse für die OP Sx und Bx (sofern Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze auftreten) - Azimut = 168°, Modulneigung = 15°

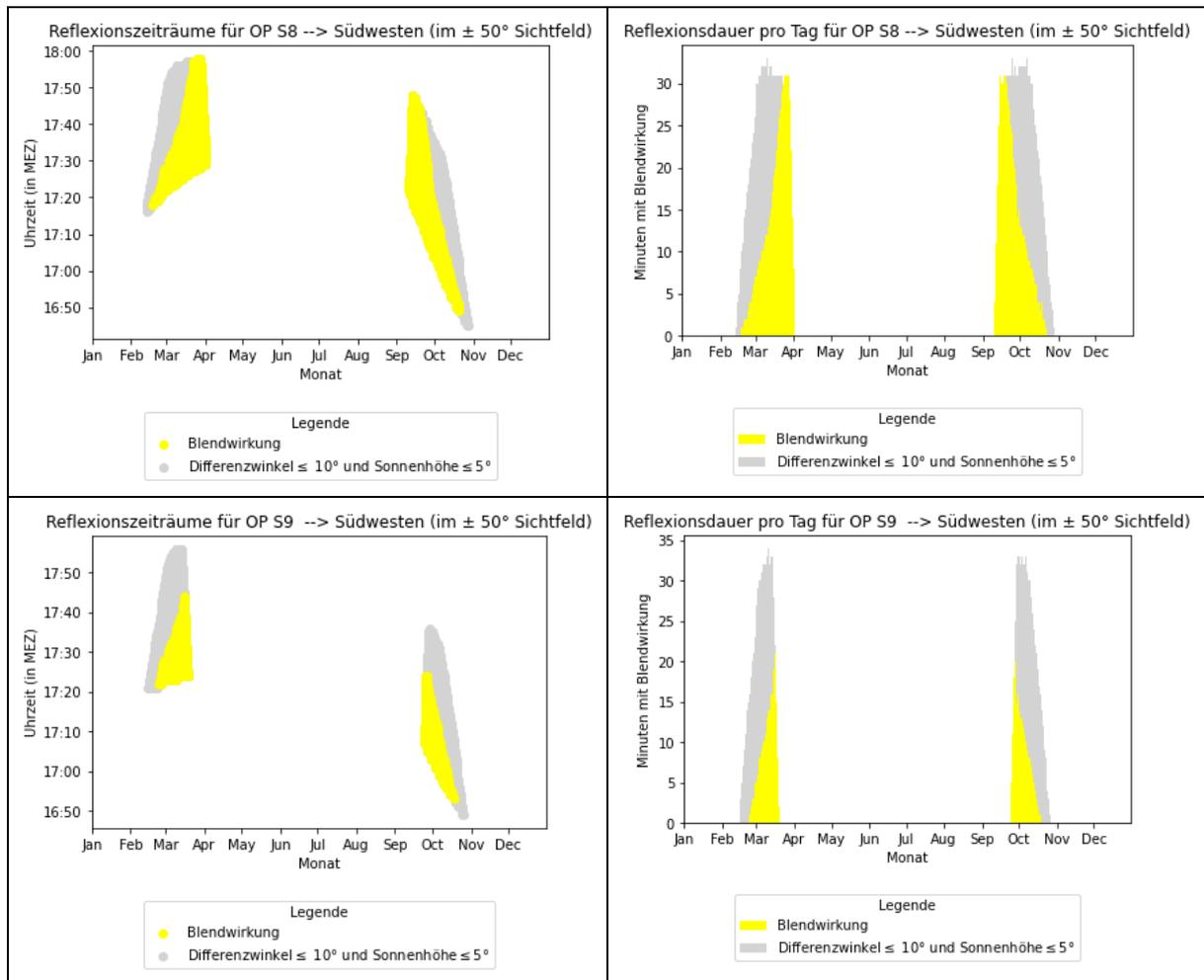


## 6.8 Azimut = 168°, Modulneigung = 20°

Tabelle 8: Übersicht der Simulationsergebnisse für die OP Sx und Bx - Azimut = 168°, Modulneigung = 20°

Observationspunkt (OP)	Fahrtrichtung	Min. Winkel zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle	Werden die Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze vollständig von der Sonne überlagert?	Anmerkung
S1	Nordosten	keine Reflexionen	-	-
S2		> 90°	-	-
S3		> 90°	-	-
S4		> 90°	-	-
S5		> 90°	-	-
S6		keine Reflexionen	-	-
S7	Südwesten	keine Reflexionen	-	-
S8		30°	nein	Bei den Reflexionen von Feld 1 wird ein min. Winkel von 45° eingehalten.
S9		37°	nein	Bei den Reflexionen von Feld 1 wird ein min. Winkel von 42° eingehalten.
S10		50°	-	-
S11		64°	-	-
S12		keine Reflexionen	-	-
B1	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B2	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B3	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B4	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B5	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B6	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B7	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
B8	Osten	keine Reflexionen	-	-
	Westen	keine Reflexionen	-	-
<b>Legende</b>				
Erhebliche Beeinträchtigung möglich (relevante Reflexionen sind innerhalb der Erheblichkeitsgrenze zu erwarten)				
Beeinträchtigung möglich (relevante Reflexionen sind innerhalb der Beeinträchtigungs-, aber nicht innerhalb der Erheblichkeitsgrenze zu erwarten)				
Keine Beeinträchtigungen möglich (es treten keine relevanten Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze auf)				

Ergebnisdiagramme 4: Ergebnisse für die OP Sx und Bx (sofern Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze auftreten) - Azimut = 168°, Modulneigung = 20°



## 7 Diskussion der Ergebnisse und empfohlene Maßnahmen

### 7.1 Gebäude

In der relevanten Umgebung der Photovoltaikanlage befinden sich keine schutzwürdigen Räume, wie beispielsweise Wohngebäude. Daher können erhebliche Belästigungen in oder an schutzwürdigen Räumen ausgeschlossen werden.

### 7.2 Verkehrswege

#### 7.2.1 Bundesautobahn A 20

Bei einer Modulausrichtung nach Süden mit einem Azimut von  $180^\circ$  und einem Modulwinkelbereich von  $15^\circ$  bis  $20^\circ$  sind auf der geplanten Bundesautobahn A 20 keine zusätzlichen Beeinträchtigungen zu erwarten. Ein  $\pm 50^\circ$  Sichtfeld (Beeinträchtigungsgrenze), bezogen auf die Fahrtrichtung, bleibt in der Regel blendfrei. Es können zwar teilweise Reflexionen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze wahrgenommen werden, diese werden jedoch von der direkten Sonnenstrahlung überlagert.

Mit einer Modulausrichtung nach Südosten (Azimut =  $168^\circ$ ) verschieben sich Reflexionen geometrisch betrachtet weiter in das Sichtfeld der Fahrzeugführer auf der A 20. Hauptsächlich betroffen sind Fahrzeugführer in Fahrtrichtung Südwesten bei den Observationspunkten S8 und S9 (östlich der Anlage). Hier können, wenn auch nur für wenige Minuten im Jahr, bei einer Südost-Ausrichtung beeinträchtigende Blendwirkungen auftreten. Die Blendwirkungen werden hauptsächlich von Feld 2 emittiert, welches unmittelbar neben der A 20 liegt.

Selbst bei einer Südost-Ausrichtung können die Reflexionen von Feld 1 noch als zumutbar betrachtet werden, da ein minimaler Winkel von über  $40^\circ$  zwischen Fahrtrichtung und Reflexion stets eingehalten wird. Die Modulneigung spielt hierbei eine sekundäre Rolle, allerdings ist die Situation bei einem steileren Winkel von  $20^\circ$  geringfügig vorteilhafter einzustufen, da ein etwas größeres Sichtfeld blendfrei bleibt.

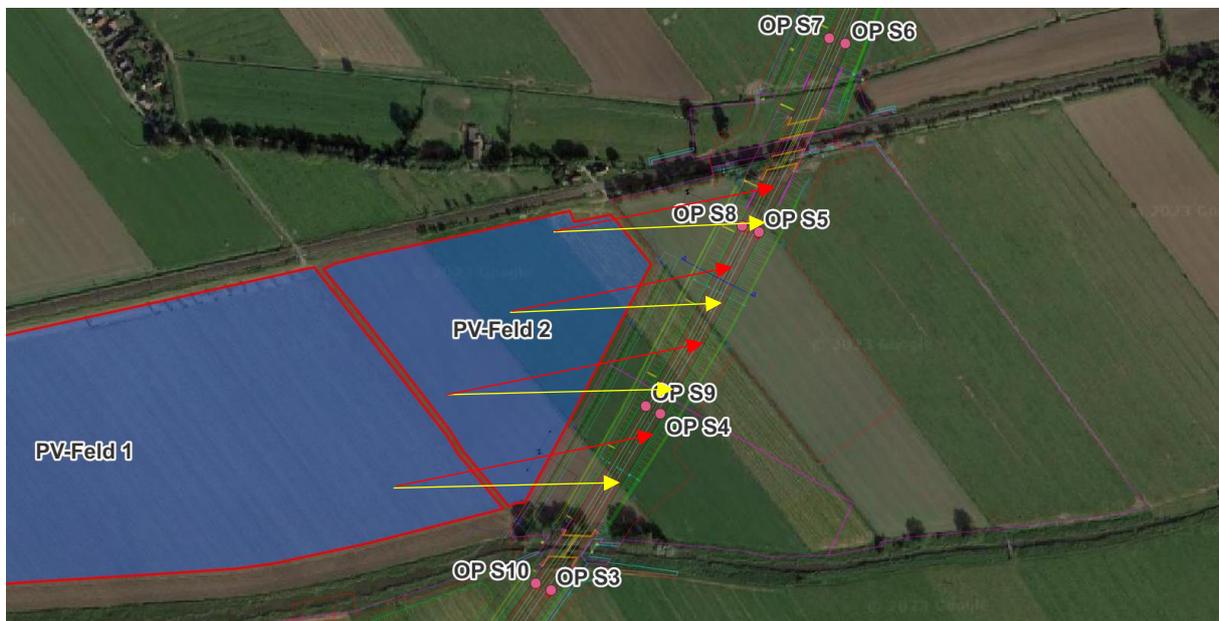


Abbildung 12: Skizze der wesentlichen Reflexionsrichtungen bei einer  $180^\circ$ -Südausrichtung (gelb) und einer  $168^\circ$ -Südost-Ausrichtung (rot): Dargestellt werden die Reflexionsrichtungen, die am weitesten in das Sichtfeld von Fahrzeugführern in Fahrtrichtung Südwesten reichen. In der Realität treten Reflexionen, sofern sie vorkommen, über weite Bereiche entlang der Modulreihen auf, es wird also nicht punktuell, sondern großflächig reflektiert.

## 7.2.2 Bahnstrecke

Bei einer Ausrichtung der Modultische parallel zum Schienenverlauf mit einem Azimut von  $168^\circ$  nach Südosten können auf der Bahnstrecke keine Blendwirkungen auftreten.

Wenn die Modultische nach Süden ausgerichtet werden, entsteht für Lokführer in Fahrtrichtung Osten eine direkte Sicht auf die (Vorderseite der) Modultische, die nun versetzt zur Bahnstrecke enden. Unter diesen Umständen sind für wenige Minuten im Jahr Blendwirkungen direkt im zentralen Sichtfeld zu erwarten. Diese werden jedoch überwiegend von der direkten Sonnenstrahlung überlagert (die Blendwirkung der Sonne überlagert dann die Reflexionen).

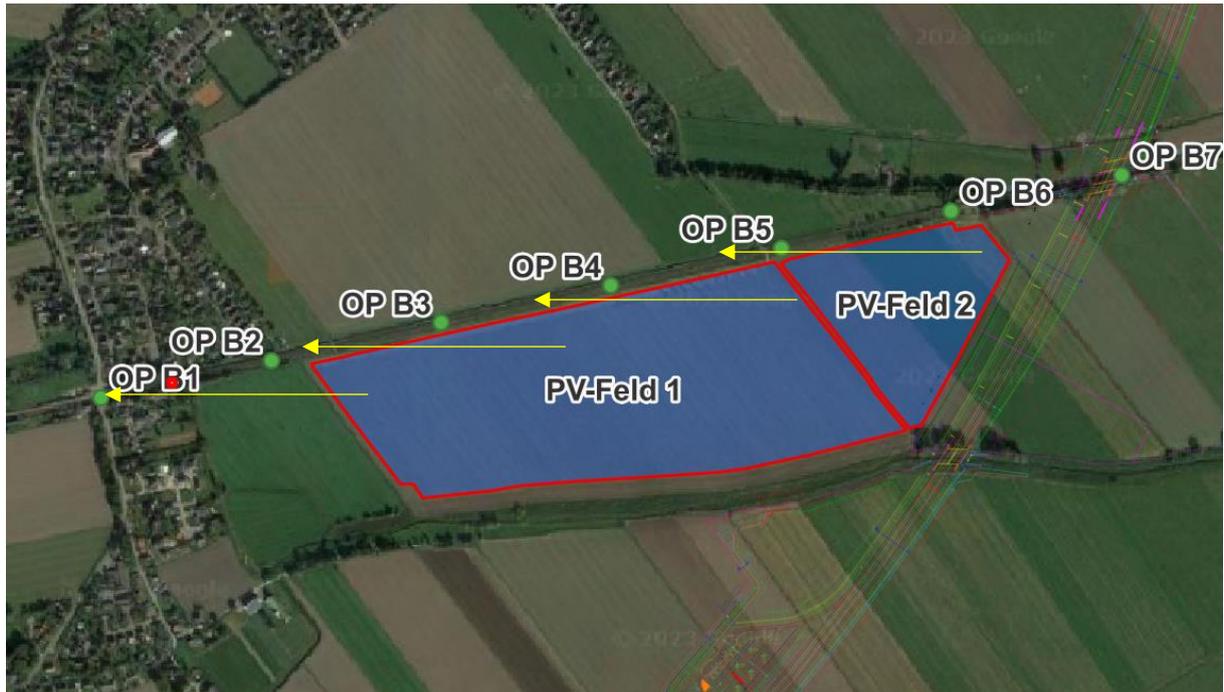


Abbildung 13: Skizze der Reflexionsrichtungen auf die Bahnstrecke bei einer Süd-Ausrichtung der Module (vereinfacht dargestellt)

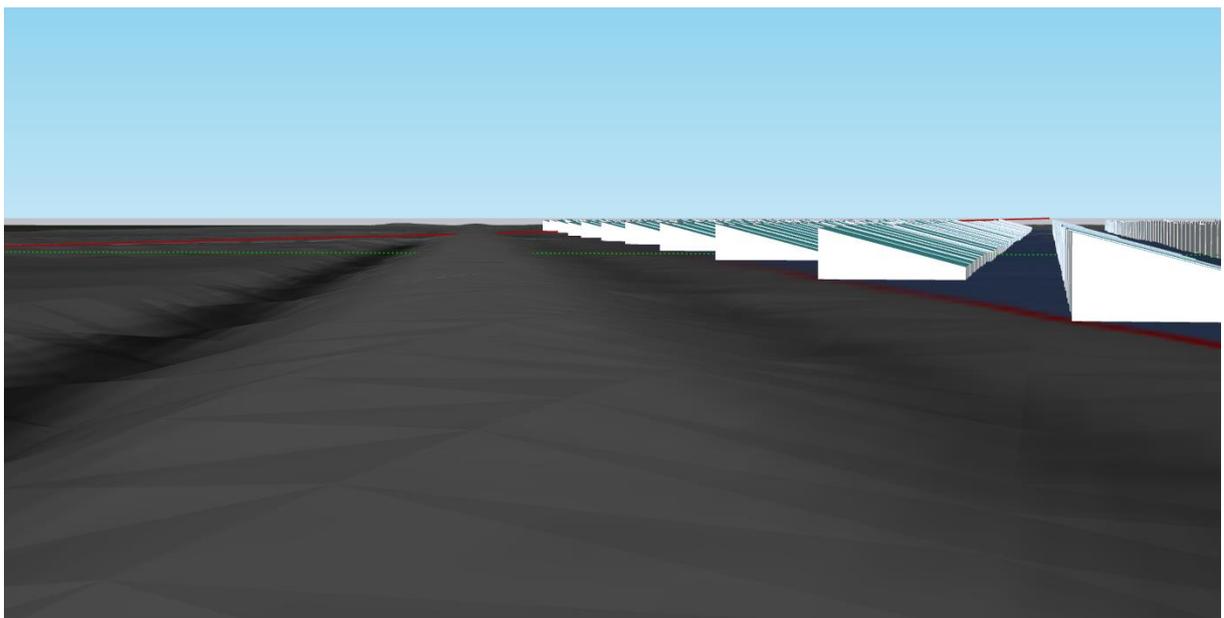


Abbildung 14: Modellierter Sicht eines Lokführers in Fahrtrichtung Osten: Die dargestellten Modultische sind nach  $180^\circ$  Süden ausgerichtet

### 7.3 Empfehlung

Um keine zusätzlichen Beeinträchtigungen für Fahrzeugführer auf der Bundesautobahn A 20 zu verursachen, sollten die PV-Felder nach Süden ausgerichtet werden und einen Modulneigungswinkel zwischen 15° und 20° aufweisen (geprüfter Bereich). Da Feld 1 deutlich weiter von der A 20 entfernt liegt als Feld 2, könnte Feld 1 auch nach Südosten ausgerichtet werden, ohne erhebliche Beeinträchtigungen auf der Autobahn zu verursachen.

Es wird empfohlen, PV-Feld 2 nach Süden auszurichten. Sollten Beeinträchtigungen auf der Bundesautobahn A 20 generell ausgeschlossen werden, wird ebenfalls empfohlen, PV-Feld 1 in südlicher Richtung auszurichten.

In Bezug auf den Schienenverkehr sollte eine Absprache mit der Bahn erfolgen, um zu klären, inwiefern Blendwirkungen auf den Schienenverkehr vermieden werden müssen. Blendwirkungen können nur bei Südausrichtungen entstehen. Falls notwendig, könnten Blendwirkungen auf den Schienenverkehr durch einen Sichtschutz minimiert/unterbunden werden. Tendenziell sind jedoch nur für wenige Zeiträume im Jahr Blendwirkungen auf den Schienen zu erwarten.

Eine solche (Blendschutz-)Maßnahme wäre für die A 20 nicht umsetzbar, da diese auf einem Damm verläuft, der teilweise über 8 Meter über dem Geländeniveau der PV-Felder liegt.

## 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](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](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](https://forgesolar.com/static/docs/SGHAT3-GlareGauge_user_manual_v1.pdf)