

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 REGENSBURG

VERSION 1.0

Bearbeitet:

Sachverständiger für Photovoltaik
Mathias Röper, M. Eng.

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

Moorrege, 05.03.2025

Revisionstabelle

Version	Änderung	Datum	Name
1.0	Erste Fassung	05.03.2025	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	9
4	Grundlagen	10
4.1	Blendwirkung von Modulen	10
4.2	Berechnung von Reflexionen	12
4.3	Verwendete Software, Annahmen und Limitationen	12
5	Blendwirkungen auf Gebäude	13
5.1	Auswertungsmethodik	13
5.2	Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA	14
5.3	Observationspunkte	16
5.4	Ergebnisse	18
6	Blendwirkungen auf Verkehrswege	21
6.1	Auswertungsmethodik	21
6.2	Relevante Verkehrswege	23
6.3	Observationspunkte	24
6.4	Ergebnisse	26
7	Diskussion der Ergebnisse	39
7.1	Gebäude	39
7.2	Verkehrswege	40
8	Literaturverzeichnis	43
	Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT	44

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	BERR Projekt GmbH
Projektname	Solarpark Siemensstraße
Adresse PVA	93055 Regensburg
Stand der Projektierung	<input type="checkbox"/> Bestand <input type="checkbox"/> Im Bau <input checked="" type="checkbox"/> Planung

1.1 Fragestellung

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

- Schutzwürdige Räume (z. B. Wohnräume)
- Relevante Verkehrswege

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	Auftraggeber
Umliegende Vegetation	Google Earth Pro, OpenStreetMap
Umliegende Bebauung	
Höhendaten (DGM1)	Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de

1.4 Übersicht der angewendeten Methodiken

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

Tabelle 3: Methodiken

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

2 Anlagenbeschreibung

Die geplante PVA besteht aus fünf PV-Flächen.

Tabelle 4: Relevante Anlagenparameter

Parameter	Angabe/Wert
Geokoordinaten (Breite, Länge)	49.00828003, 12.15457811
Art der Anlage	Freiflächenanlage
Modultyp	Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung
Aufständerung	Fläche 1 & 3: Fest aufgeständert Ost-West Fläche 2: Fest aufgeständert Süd Fläche 4 & 5: Trackersystem
PV-Fläche	ca. 18 ha
Nennleistung (DC)	ca. 18 MWp
Modulausrichtung (Azimut)	Fläche 1 & 3: 88°/268° Fläche 2: 178° Fläche 4 & 5: Trackerachse: 178°
Modulneigung	Fläche 1 & 3: 15° Fläche 2: 20° Fläche 4 & 5: $\pm 60^\circ$
Höhe Modulunterkante	Fläche 1 – 3: 0,8 m Fläche 4 & 5: min. 0,5 m
Höhe Moduloberkante	Fläche 1 & 3: 2,7 m Fläche 2: 2,5 m Fläche 4 & 5: max. 4,7 m



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

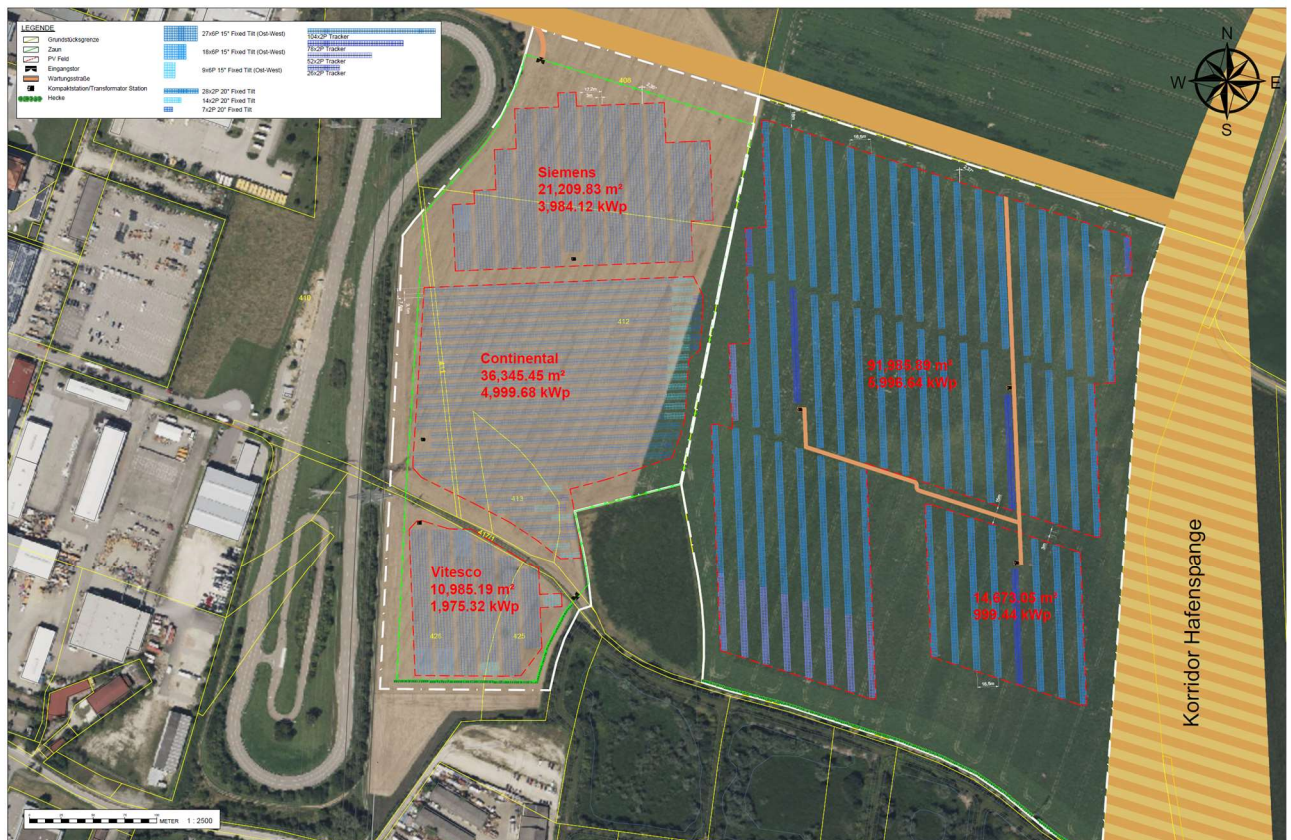


Abbildung 2: Belegungsplan - Quelle: Auftraggeber

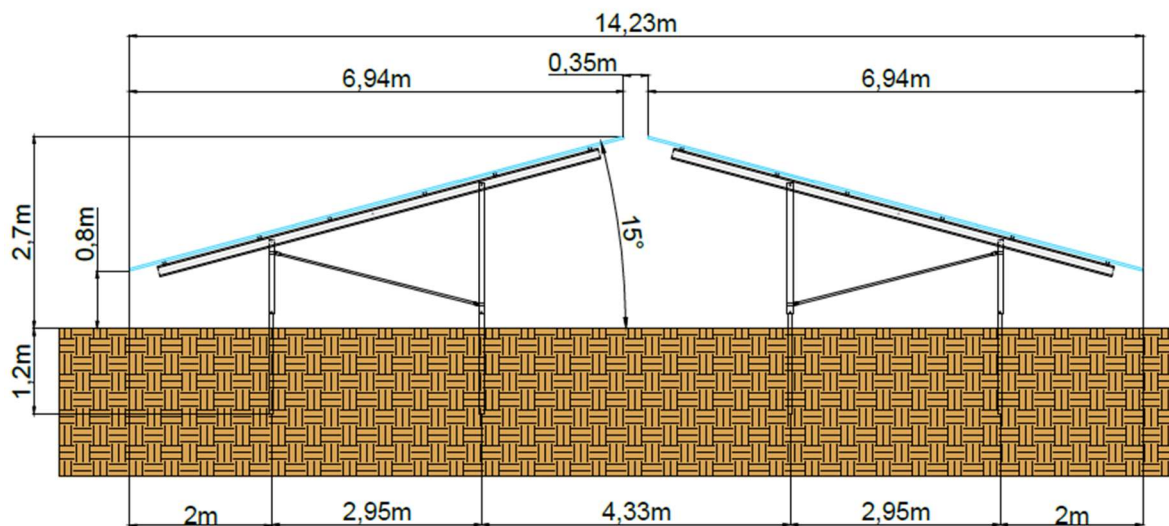


Abbildung 3: Systemschnitt O.-W.-Tische – Quelle: Auftraggeber

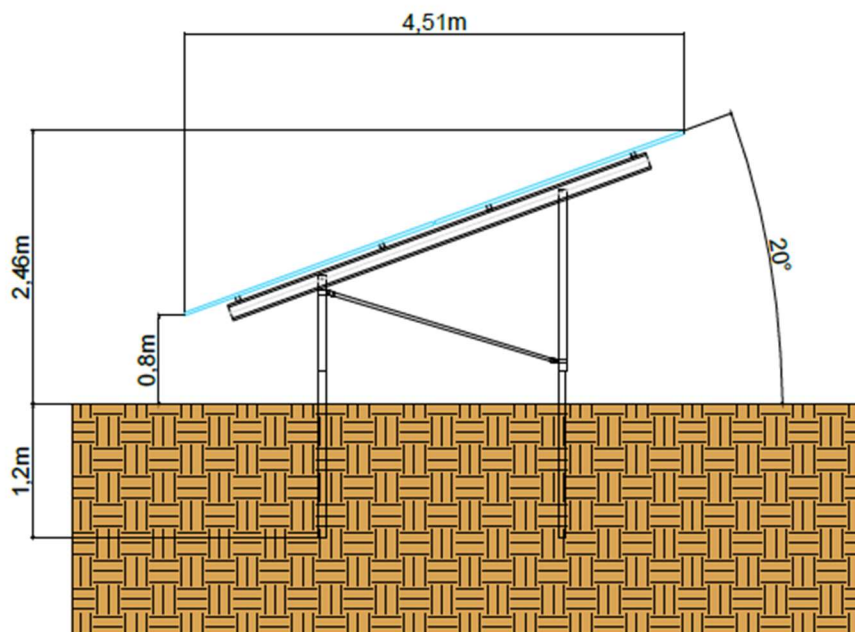


Abbildung 4: Systemschnitt Süd-Tische - Quelle: Auftraggeber

Unterkonstruktion Schnitt: (1:200)

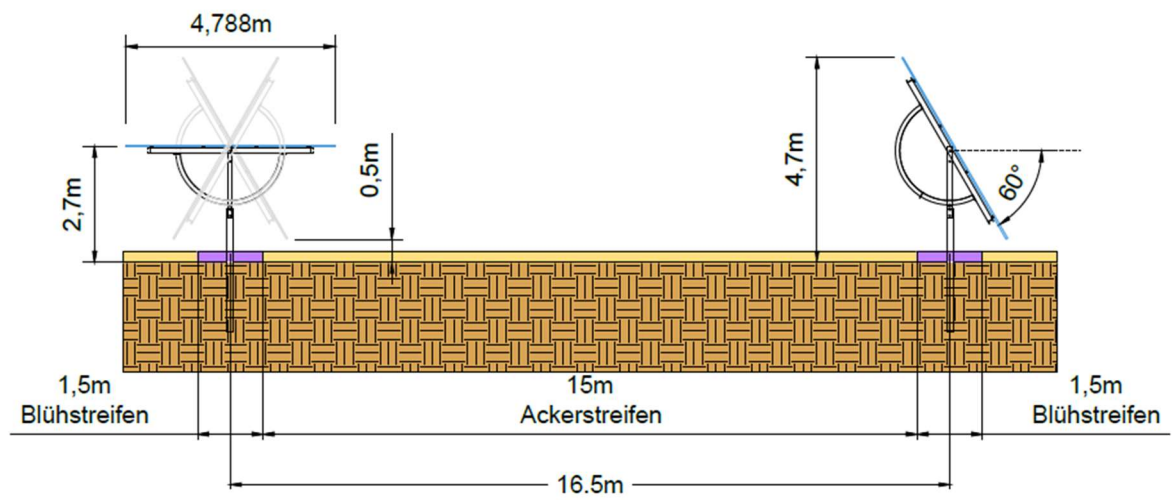


Abbildung 5: Systemschnitt Tracker - Quelle: Auftraggeber

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im relevanten Umfeld (200 m Radius) der Photovoltaikanlage befinden sich mehrere Wohn- und Bürogebäude. Allerdings können nur an einem Observationspunkt die LAI-Grenzwerte überschritten werden. In der Berechnung wurde die örtliche Vegetation nicht berücksichtigt. Tatsächlich schränken hochgewachsene Bäume die Sicht von OP H4 auf die PV-Flächen 2 bis 5 ein (PV-Fläche 1 reflektiert nicht in diese Richtung). Wird die örtliche Vegetation einbezogen, ergeben sich keine erheblichen Blendwirkungen auf schutzwürdige Räume.

Als relevante Verkehrswege im Umfeld der Photovoltaikanlage wurden die Bundesautobahn A3 mit ihren lokalen Auffahrten, die Staatsstraße ST 2660 mit der anbindenden Osthafenstraße, die Max-Planck-Straße, die Siemensstraße mit den anliegenden Seitenstraßen Maxhüttenstraße und Glasfaserstraße, die Landauer- und Kremser Straße sowie die Bahnanlage am Osthafen identifiziert und geprüft. Darüber hinaus wurde die Teststrecke von Vitesco Technologies westlich der Anlage untersucht.

Fahrzeugführer auf der A3, der Max-Planck-Straße, der Kremser Straße und der Glasfaserstraße können keine Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld ($\pm 30^\circ$ bezogen auf die Fahrtrichtung) erfahren. Es sind daher keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

Fahrzeugführer bzw. Lokführer auf der ST 2660, der Osthafenstraße, der Siemensstraße, der Maxhüttenstraße und der Bahnanlage können rein geometrisch betrachtet Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Tatsächlich unterbrechen jedoch Vegetationsstreifen, Gebäude und Abschnitte der PVA, die nicht für Reflexionen verantwortlich sind, die Sichtlinie auf die emittierenden Abschnitte der PVA. Somit sind auch hier keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

Fahrzeugführer auf der Landauer Straße in Fahrtrichtung Südwesten können abschnittsweise Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren.

Die für die Blendwirkungen verantwortlichen Reflexionen gehen von den PV-Flächen 3 und 4 aus. Tatsächlich wird die Sichtlinie auf PV-Fläche 3 durch Vegetation unterbrochen. Um Reflexionen von PV-Fläche 4 zu verhindern, besteht die Möglichkeit, die Tracking-Anlage so einzustellen, dass der Anstellwinkel während des Backtrackings in den Abendstunden 10° nicht unterschreitet.

Um störende Blendungen auf der Teststrecke zu verhindern, sollten zumindest südöstlich der nördlichen Kurve entsprechende 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 [2].

Daher reflektieren Solarmodule bei geringen Einfallswinkeln θ (siehe Abbildung 6) 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 7).

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

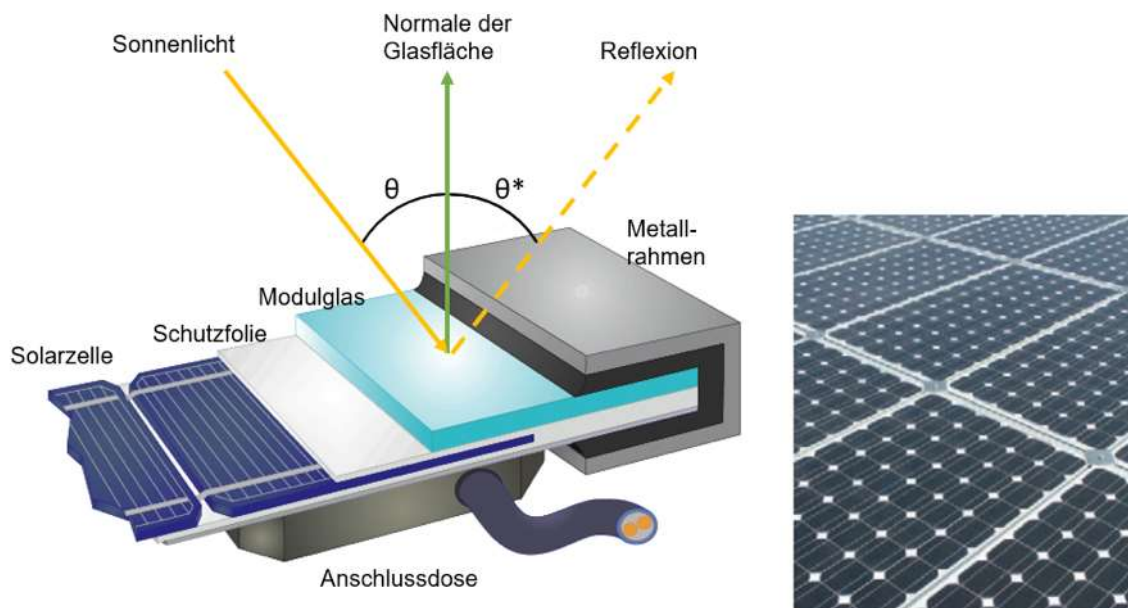


Abbildung 6: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“
- Quelle: [3] (modifiziert)

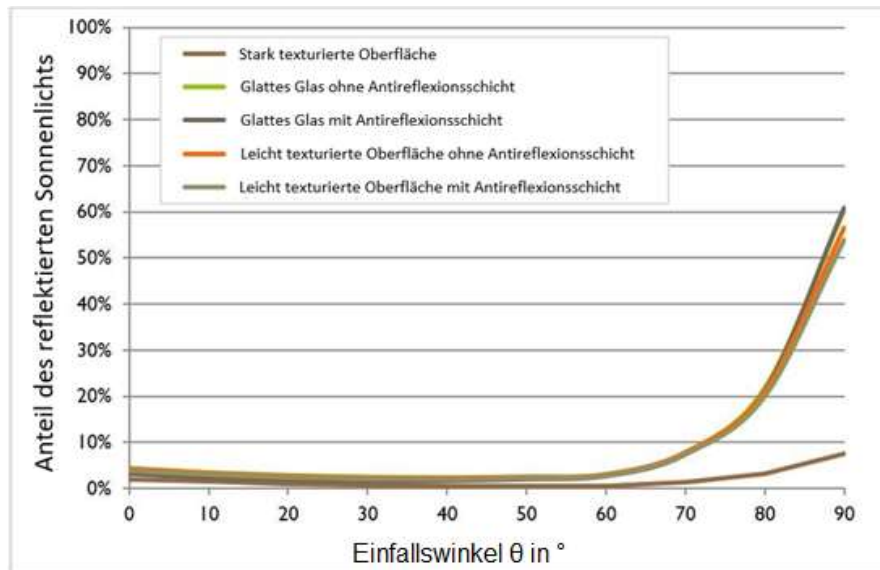


Abbildung 7: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypen - Quelle: [4], modifiziert

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



Abbildung 8: 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].

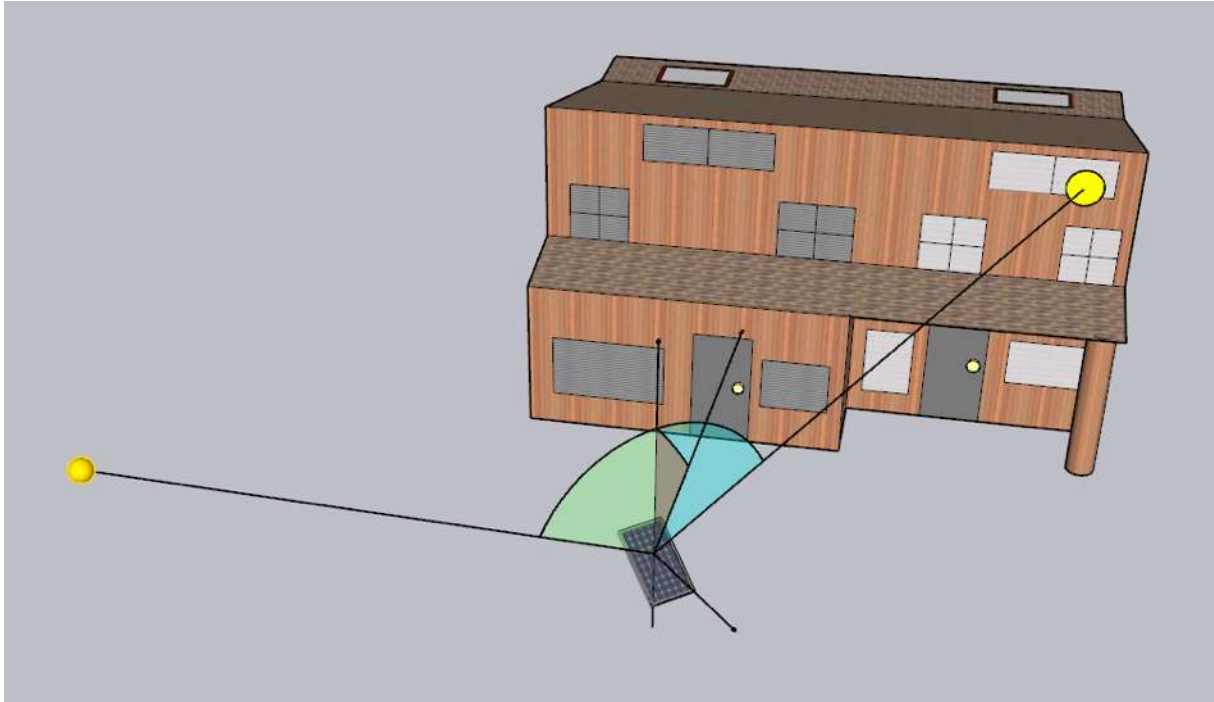


Abbildung 9: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion - Quelle: Eigene Abbildung

4.3 Verwendete Software, Annahmen und Limitationen

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

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

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

5 Blendwirkungen auf Gebäude

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 wird jedoch ein realistisches Modell verwendet, das die oberflächenspezifischen Eigenschaften realer Solarmodule berücksichtigt. Um dennoch eine Bewertung nach dem LAI-Leitfaden zu ermöglichen, werden die Blendwirkungen, die lediglich mit dem vereinfachten Modell ermittelt würden, als „Kernblendung“ und die übrigen als „gestreute Reflexion“ bezeichnet und stets differenzierbar dargestellt (sofern relevante Blendwirkungen auftreten).

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

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

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

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

5.2 Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA

Ab einem Abstand zwischen Immissionsort (z. B. Wohngebäude) und einer nach (ca.) Süden ausgerichteten PVA von 100 m können erhebliche Belästigungen (i. d. R.) pauschal ausgeschlossen werden [1]. Bei Anlagen mit einer ca. Ost-West Ausrichtung haben Erfahrungswerte gezeigt, dass eine Abstandszone von 200-Metern in diesen Fällen realistischer ist.

Abbildung 10 veranschaulicht den Bereich, der 200 Meter oder näher an der Photovoltaikanlage liegt.

Es lässt sich feststellen, dass im 200-Meter-Umkreis schutzwürdige Arbeitsräume vorhanden sind.

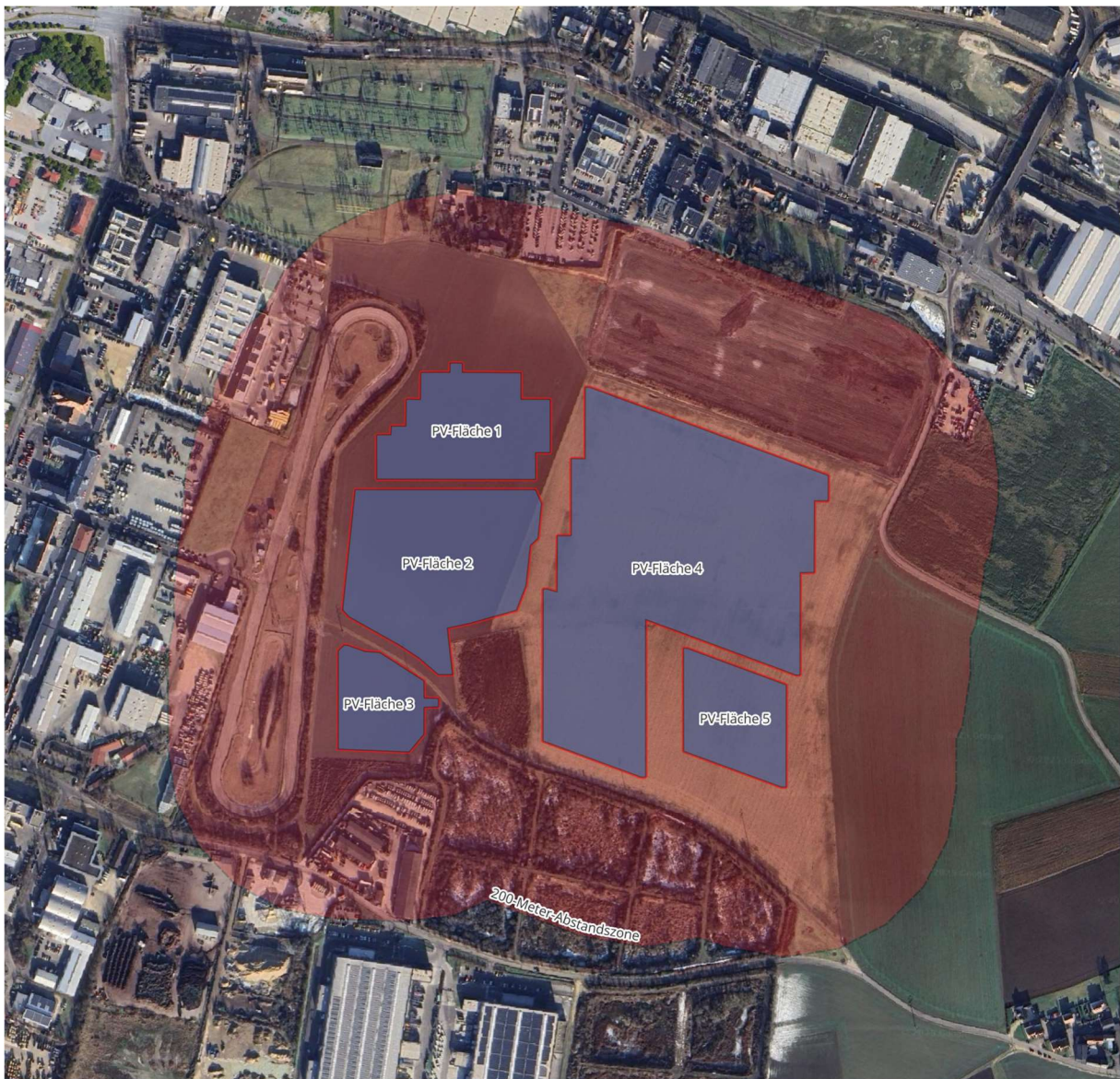


Abbildung 10: Übersicht der 200-Meter-Zone - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

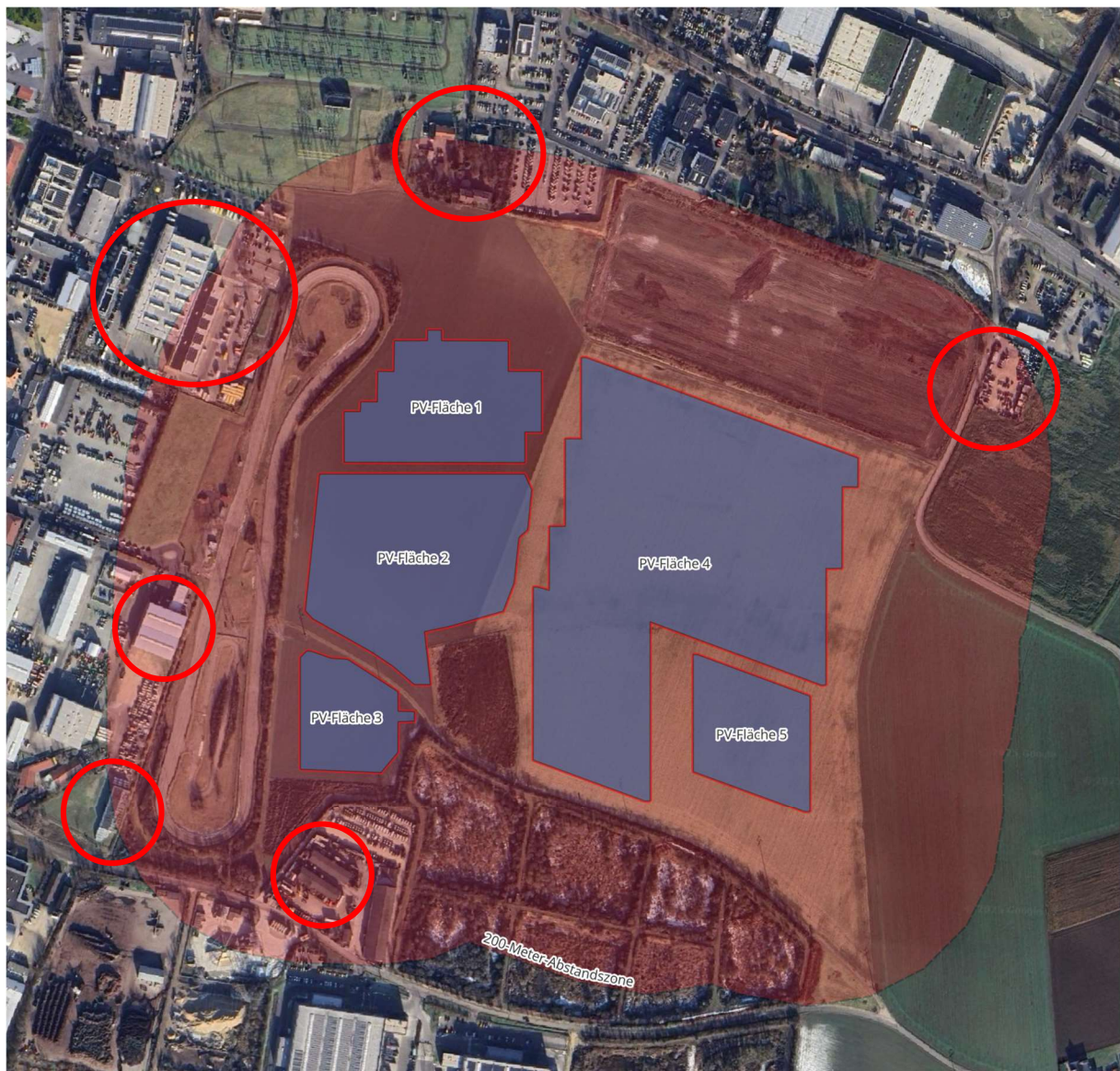


Abbildung 11: Arbeitsräume in der 200-Meter-Zone - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

5.3 Observationspunkte

Zur Bewertung der Blendwirkungen in bzw. an den schutzwürdigen Räumen wurden im Rahmen der Simulation sogenannte „Observationspunkte“ (OP) festgelegt. Diese Punkte fungieren als Detektorpunkte für einfallende Reflexionen. Insgesamt wurden acht OP an den schutzwürdigen Räumen definiert (OP H1 bis H8).

Die OP wurden, wo möglich, so positioniert, dass sie insgesamt das Worst-Case-Szenario repräsentieren, also an Orten, an denen die stärksten Blendwirkungen erwartet werden.

Die OP H1 bis H8 sind auf einer Höhe von 4,6 m angelegt, was ungefähr der Augenhöhe einer stehenden Person im ersten Stock entspricht. Generell sind höher gelegene Immissionsorte stärkeren Blendwirkungen ausgesetzt als niedriger gelegene.



Abbildung 12: Positionen von OP H1 bis H5 - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

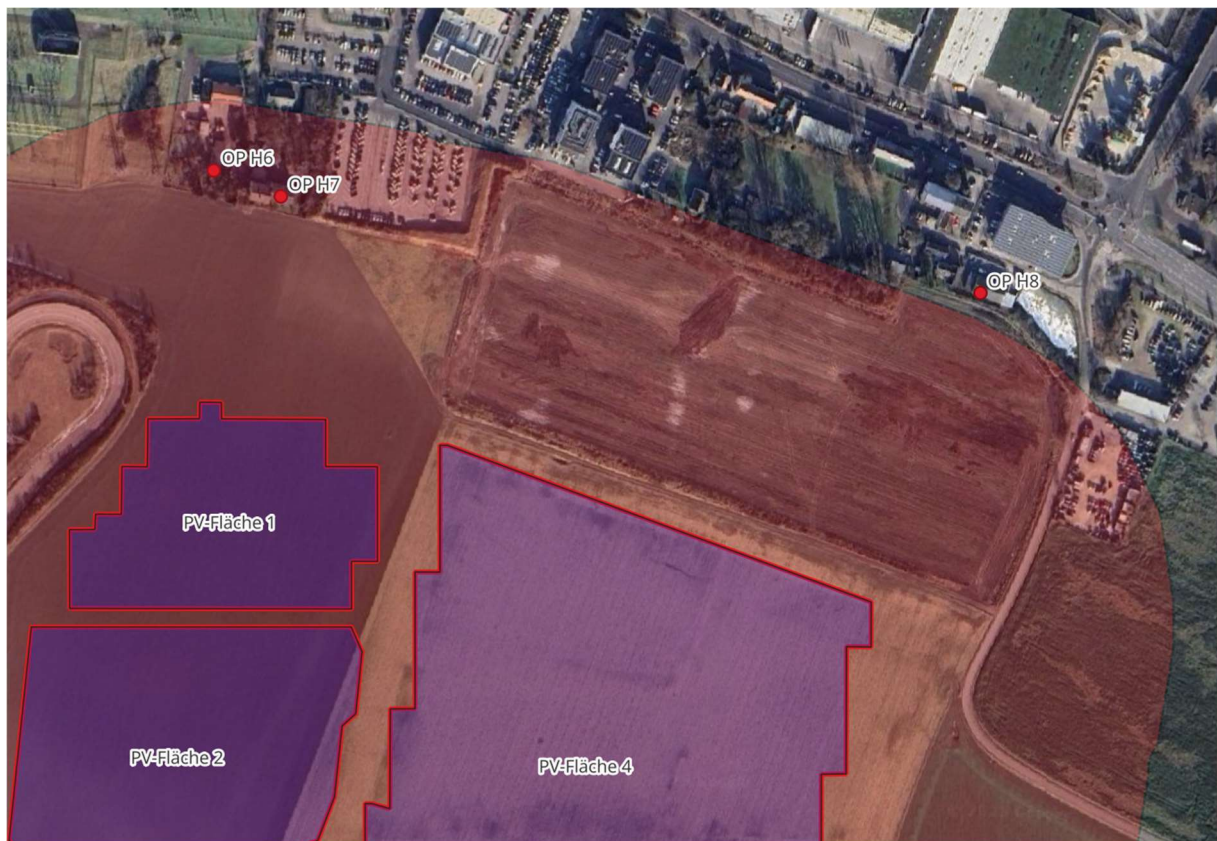


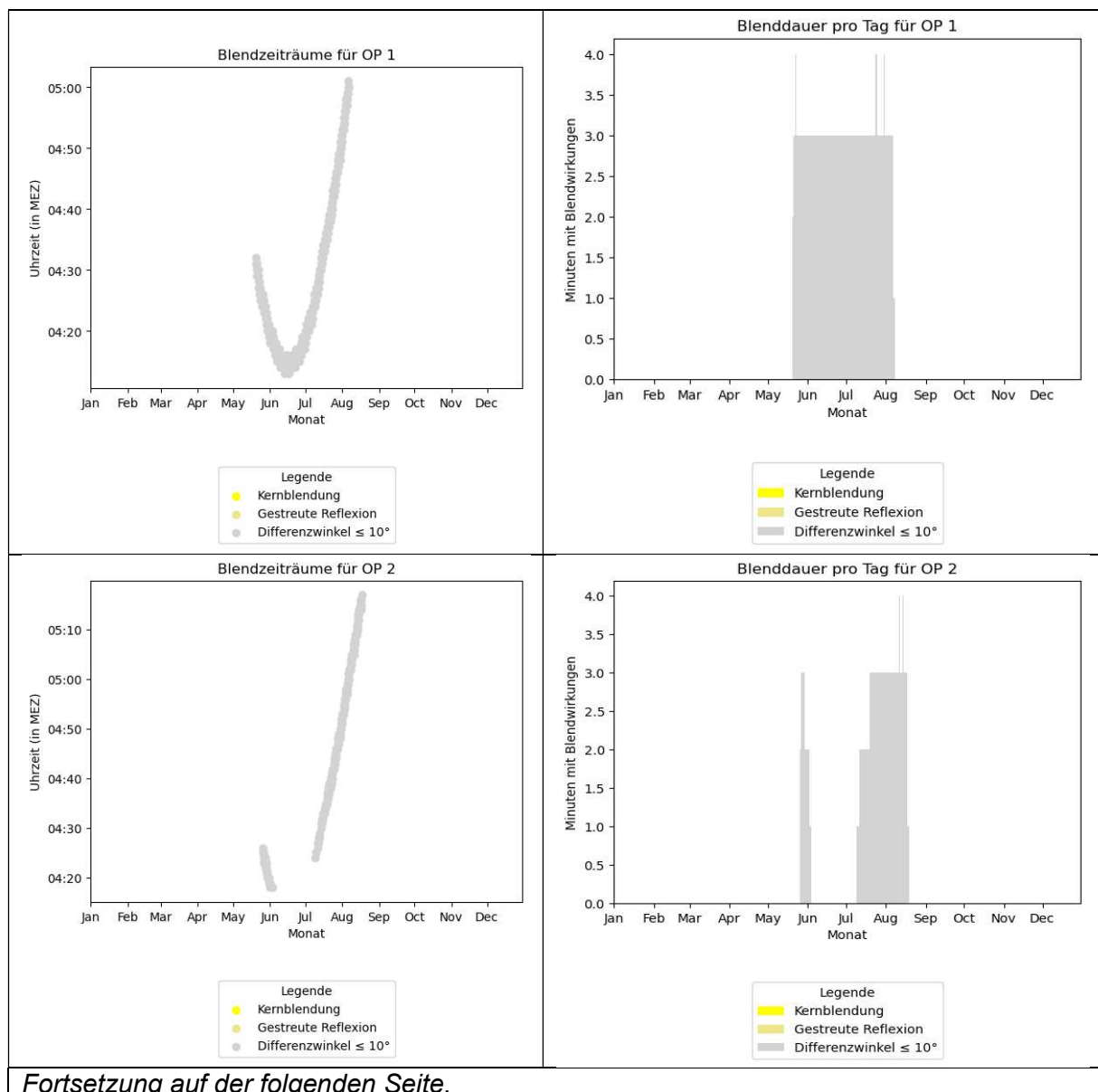
Abbildung 13: Position von OP H6 bis H8 - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

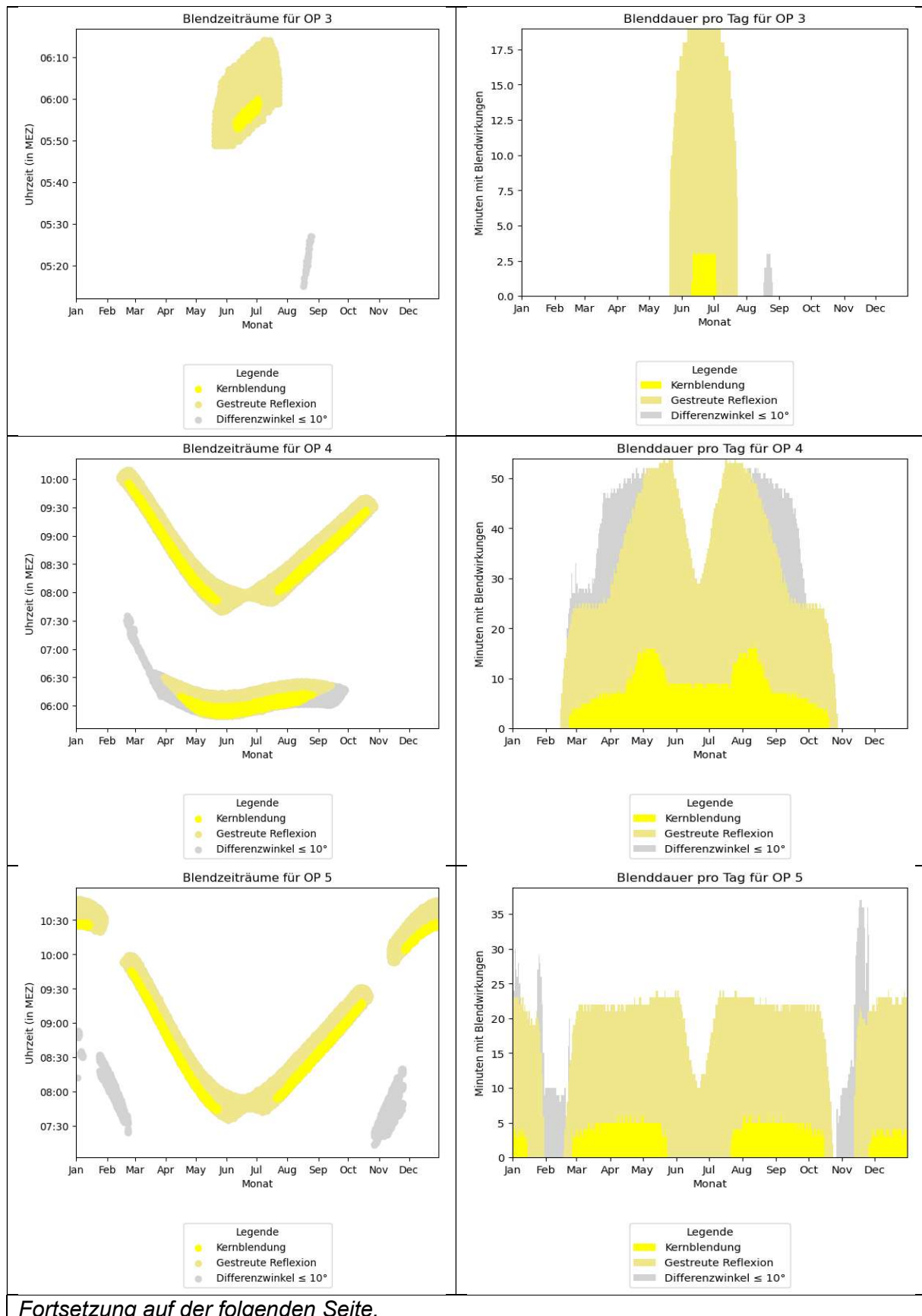
5.4 Ergebnisse

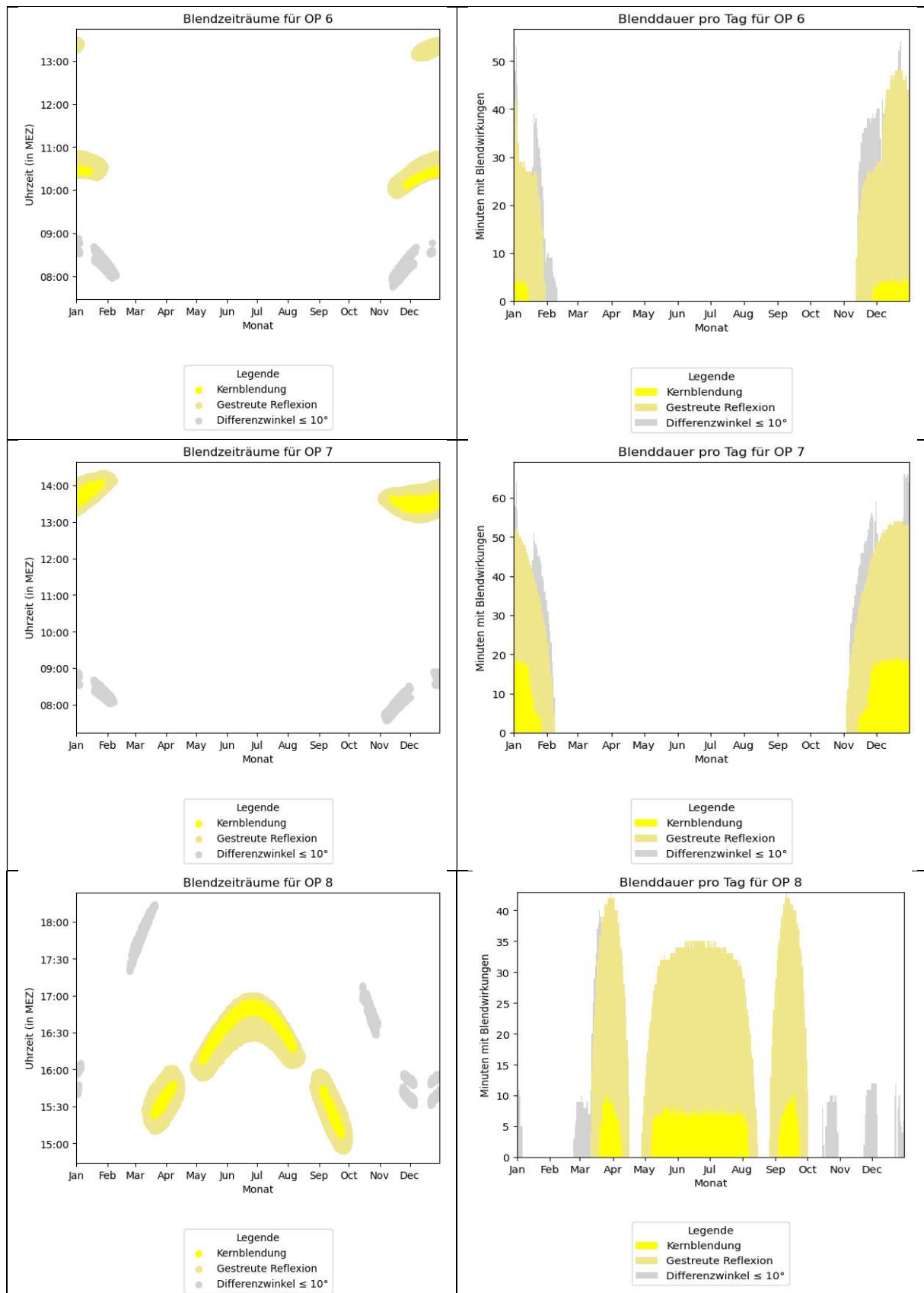
Tabelle 5: Ergebnisse an den OP Hx

Observationspunkt	Max. Blenddauer (Kernblendung) pro Tag in Minuten	Gesamtblenddauer pro Jahr (Kernblendung) in Minuten	Werden die LAI-Grenzwerte eingehalten (vgl. Kapitel 5.1)?
H1	0	0	ja
H2	0	0	ja
H3	3	68	ja
H4	17	2135	nein
H5	6	983	ja
H6	5	189	ja
H7	0	0	ja
H8	10	952	ja

Ergebnisdiagramme 1: Blendwirkungen bei den OP Hx







6 Blendwirkungen auf Verkehrswege

6.1 Auswertungsmethodik

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

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

Es wird zwischen folgenden Sichtfeldern bzw. Sichtfeldgrenzen unterschieden (siehe Abbildung 14 für eine grafische Darstellung):

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

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

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

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

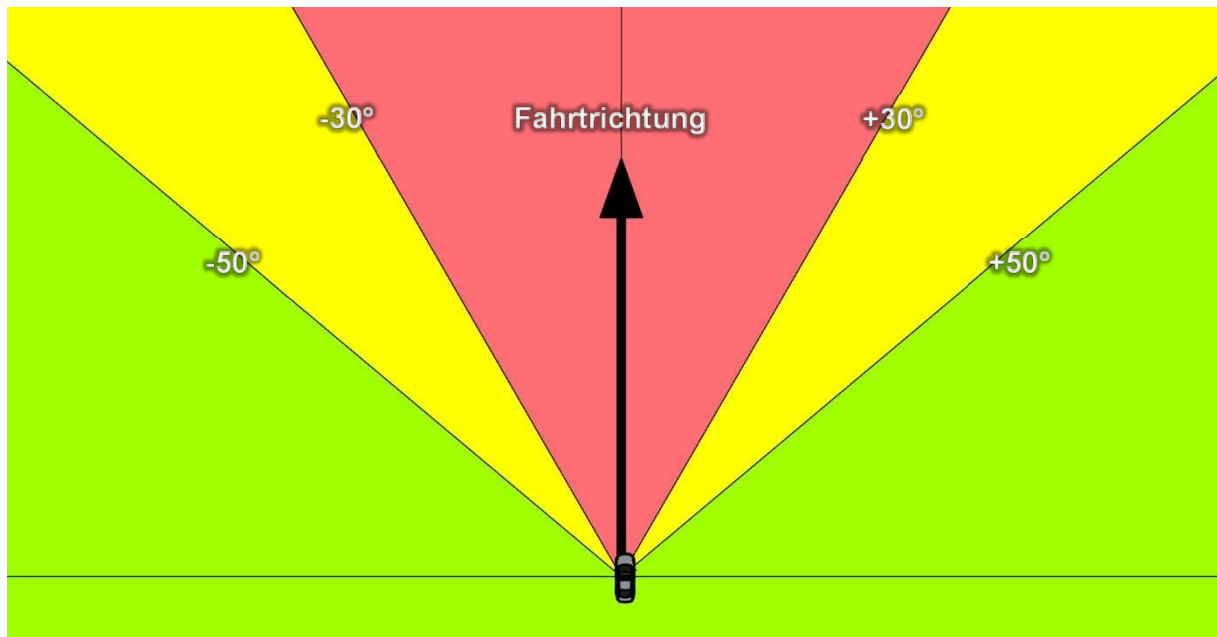


Abbildung 14: Definierte Sichtfelder eines Fahrzeugführers
– Quelle: Eigene Abbildung

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

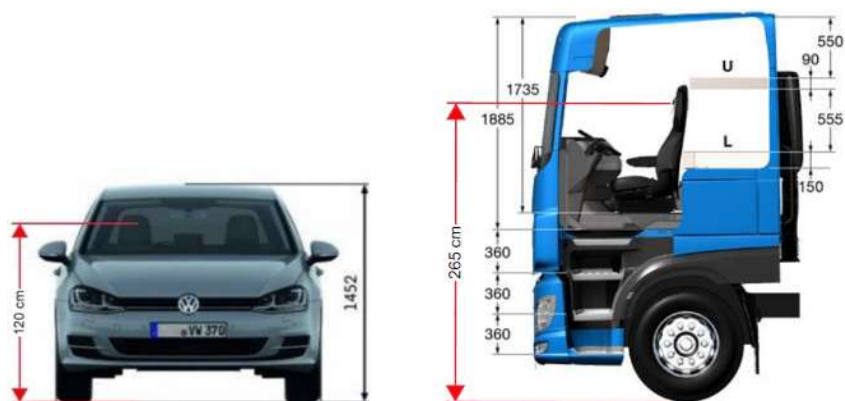


Abbildung 15: Augenhöhe der Straßenverkehrsteilnehmer
– Quelle: Volkswagen AG (modifiziert), BTS GmbH & Co. KG (modifiziert)

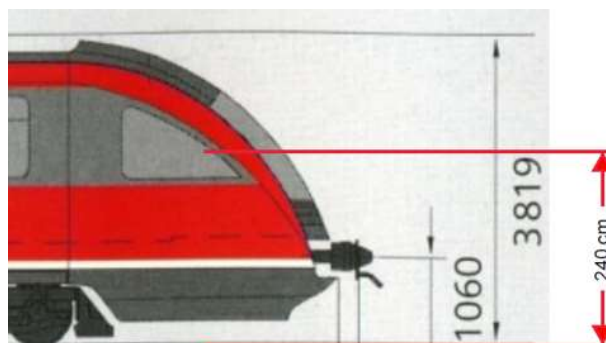


Abbildung 16: Augenhöhe von Lokführern – Quelle: www.nahverkehr-franken.de (modifiziert)

6.2 Relevante Verkehrswege

Im Umfeld der Photovoltaikanlage wurden als relevante Verkehrswege die Bundesautobahn A 3 mit ihren lokalen Auffahrten, die Staatsstraße ST 2660 mit der anbindenden Ostenhafenstraße, die Max-Planck-Straße, die Siemensstraße mit den anliegenden Seitenstraßen Maxhüttenstraße und Glasfaserstraße, die Landauer- und Kremser Straße, sowie die Bahnanlage am Osthafen.

Darüber hinaus wurde die „Vitesco Technologies“ Teststrecke westlich der Anlage geprüft.

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

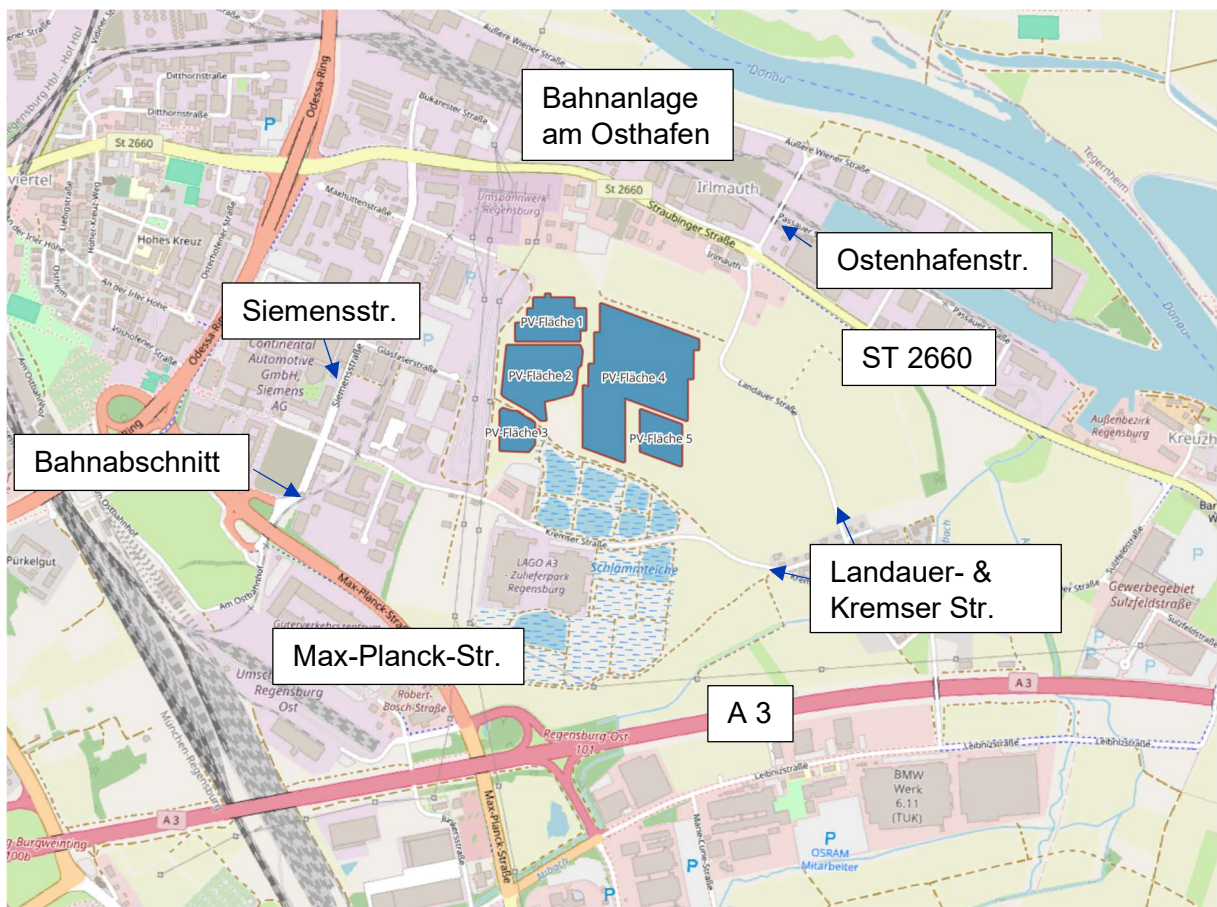


Abbildung 17: Positionen der als relevant eingestuft Verkehrswege - Quelle Karte: OpenStreetMap

6.3 Observationspunkte

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

Insgesamt wurden 63 OP zur Analyse der Blendwirkungen auf die Verkehrswege festgelegt:

- OP S1 bis S5 für den Straßenverkehr auf A3 in Richtung Osten.
- OP S6 bis S14 für den Straßenverkehr auf A3 in Richtung Westen.
- OP S15 bis S17 für die Auffahrt und Abfahrt der A3.
- OP S18 bis S21 für die Max-Planck-Straße beiden Fahrtrichtungen.
- OP S22 bis S31 für die ST 2660 in beiden Fahrtrichtungen.
- OP S32 und S33 für die Osthafenstraße in beiden Fahrtrichtungen.
- OP S34 bis S38 für die Kremser Straße in beiden Fahrtrichtungen.
- OP S39 bis S44 für die Landauer Straße in beiden Fahrtrichtungen.
- OP S45 bis S48 für die Siemensstraße in beiden Fahrtrichtungen.
- OP S49 für die Maxhüttenstraße Siemensstraße in beiden Fahrtrichtungen.
- OP S57 für die Glasfaserstraße in beiden Fahrtrichtungen.
- OP S50 bis S56 für die „Vitesco Technologies“ Teststrecke in beiden Fahrtrichtungen.
- OP B1 bis B5 für die Bahnanlage am Osthafen in beiden Fahrtrichtungen
- OP B6 für einen Bahnabschnitt zuführend zur KMH GmbH & Co. KG

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

Die OP Bx sind in einer Höhe von 2,4 m über dem Schienenniveau angebracht, entsprechend der Augenhöhe eines Lokführers.

Abbildung 18 zeigt die Positionen der Observationspunkte.



Abbildung 18: Positionen der OP auf den Verkehrswegen - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

6.4 Ergebnisse

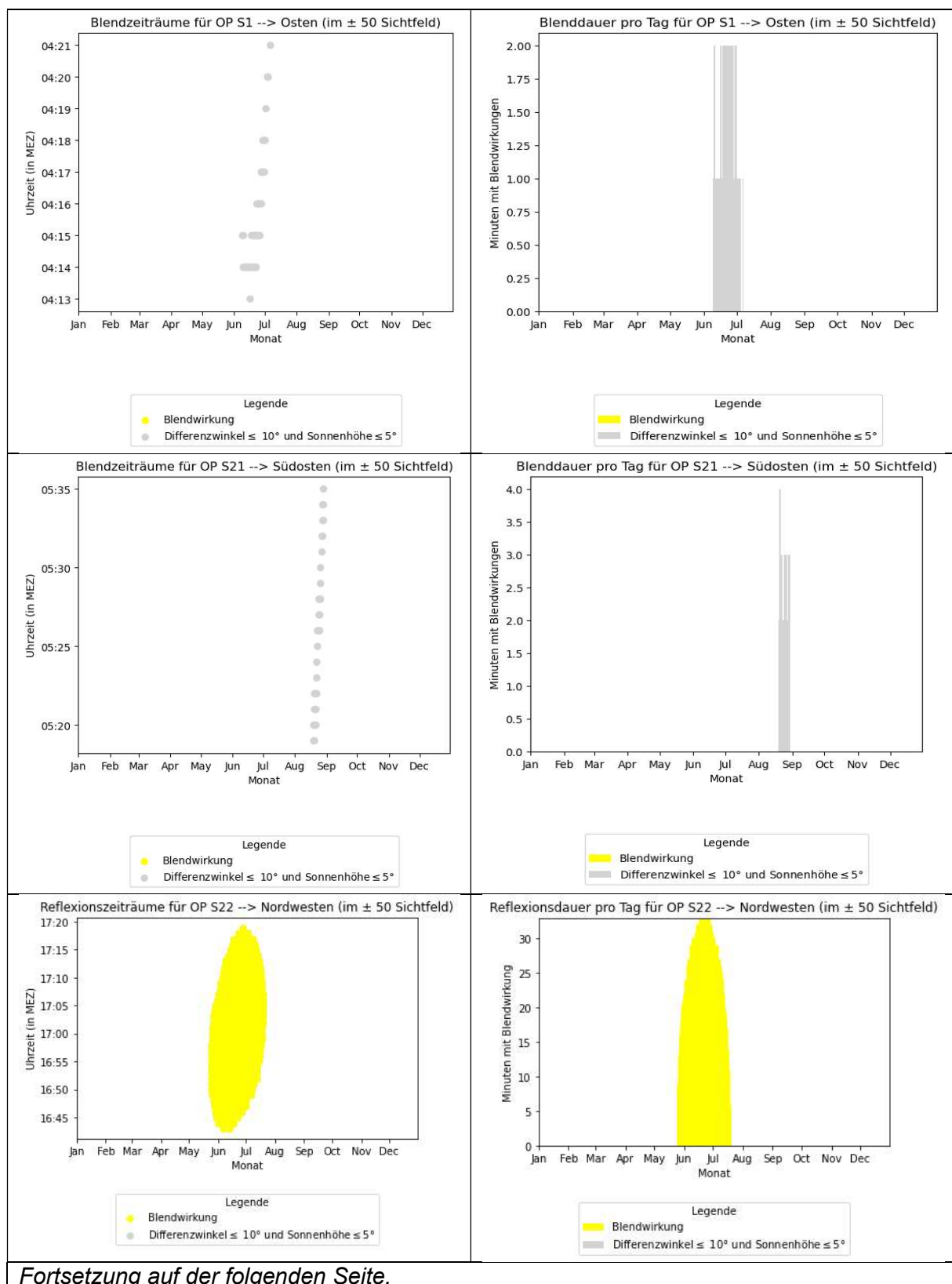
Tabelle 6: Übersicht der Simulationsergebnisse für die Observationspunkte auf den Verkehrswegen

Verkehrsweg	OP	Fahrtrichtung	Min. Winkel zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle (ca.)	Werden die Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze vollständig von der Sonne überlagert?	Anmerkung	
A 3	S1	Osten	24°	ja	-	
	S2		-	-	Keine Reflexionen	
	S3		-	-		
	S4		-	-		
	S5		-	-		
	S6	Westen	-	-		
	S7		-	-		
	S8		-	-		
	S9		-	-		
	S10		-	-		
	S11		-	-		
	S12		-	-		
	S13		-	-		
	S14		>90°	-	-	
Auffahrt/ Abfahrt A 3	S15	Nordosten	-	-	Keine Reflexionen	
	S16	Nordwesten	-	-		
	S17	Osten	-	-		
Max-Planck- Straße	S18	Nordwesten	-	-	Keine Reflexionen	
		Südosten	-	-		
	S19	Nordwesten	-	-		
		Südosten	-	-		
	S20	Nordwesten	>90°	-	-	
		Südosten	56°	-	-	
S21	Nordwesten	>90°	-	-		
	Südosten	44°	Ja	-		
ST 2660	S22	Nordwesten	38°	Nein	-	
		Südosten	>90°	-	-	
	S23	Nordwesten	1°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.	
		Südosten	>90°	-	-	
	S24	Nordwesten	5°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.	
		Südosten	>90°	-	-	
	S25	Nordwesten	18°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.	
		Südosten	>90°	-	-	
	S26	Nordwesten	30°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.	
		Südosten	>90°	-	-	
	S27	Nordwesten	40°	Nein		
		Südosten	>50°	-	-	
	S28	Nordwesten	52°	-	-	
		Südosten	>90°	-	-	
	S29	Nordwesten	74°	-	-	
		Südosten	>90°	-	-	
	S30	Nordwesten	>90°	-	-	
		Südosten	34°	Nein		
S31	Nordwesten	>90°	-	-		
	Südosten	32°	Nein			
Fortsetzung auf der folgenden Seite.						

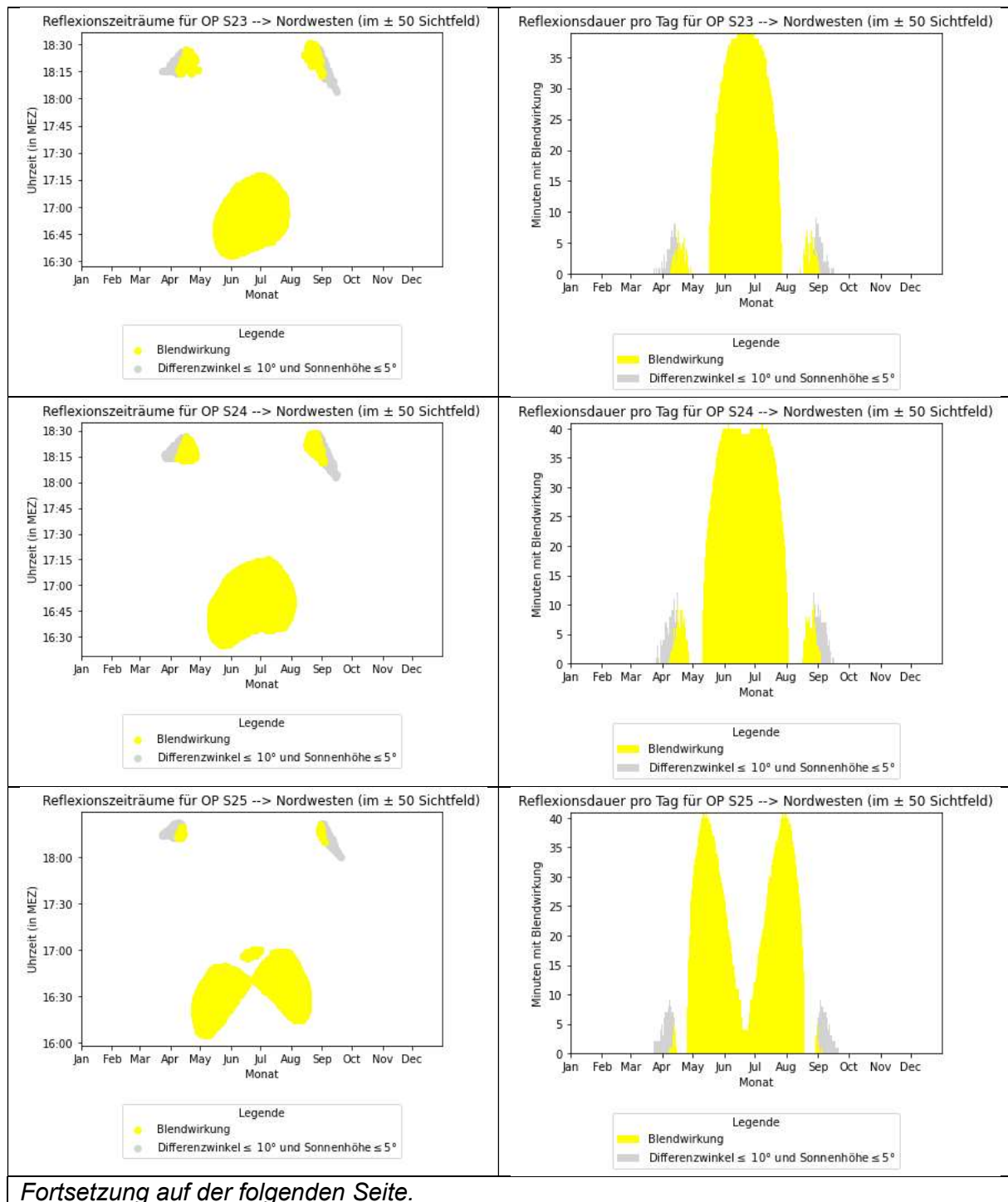
Ost- hafen- straße	S32	Nordosten	>90°	-	-
		Südwesten	12°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.
	S33	Nordosten	>90°	-	-
		Südwesten	13°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.
Kremser Straße	S34	Nordwesten	>90	-	-
		Südosten	37°	Nein	
	S35	Nordwesten	-	-	Keine Reflexionen
		Südosten	-	-	
	S36	Nordwesten	-	-	Keine Reflexionen
		Südosten	-	-	
	S37	Nordwesten	-	-	
		Südosten	-	-	
	S38	Nordwesten	-	-	
		Südosten	-	-	
Landauer Straße	S39	Nordwesten	-	-	
		Südosten	-	-	
	S40	Nordwesten	51°	-	-
		Südosten	>90°	-	-
	S41	Nordwesten	45°	Nein	-
		Südosten	>90°	-	-
	S42	Nordosten	77°	-	-
		Südosten	74°	-	-
	S43	Nordosten	>90°	-	-
		Südwesten	26°	Nein	-
	S44	Nordosten	>90°	-	-
		Südwesten	29°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Vegetation.
Siemens- straße	S45	Nordosten	43°	Nein	-
		Südwesten	>90°	-	-
	S46	Nordosten	48°	Ja	-
		Südwesten	>50°	-	-
	S47	Nordosten	85°	-	-
		Südwesten	71°	-	-
	S48	Osten	<1°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.
		Südwesten	48°	Nein	
Max- hüttenstr.	S49	Nordwesten	>90°	-	-
		Osten	<1°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.
Test- strecke	S50	Westen	>90°	-	-
		Osten	21°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.
	S51	Nordosten	76°	-	-
		Südwesten	38°	Nein	-
	S52	Nordosten	53°	-	-
		Südwesten	38°	Nein	-
	S53	Nordosten	54°	-	-
		Südwesten	80°	-	-
	S54	Westen	-	-	Keine Reflexionen
		Osten	-	-	
	S55	Nordosten	64°	-	-
		Südwesten	27°	Nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.
	S56	Nordosten	65°	-	-
		Südwesten	38°	Nein	-
Fortsetzung auf der folgenden Seite.					

Glasfaser- straße	S57	Nordwesten	>90°	-	-
		Südosten	32°	Nein	-
Bahn- anlage Osthafen	B1	Nordwesten	>90°		-
		Südosten	20°	Ja	
	B2	Nordwesten	-	-	Keine Reflexionen
		Südosten	-	-	
	B3	Nordwesten	72°	-	-
		Südosten	86°	-	-
	B4	Nordwesten	55°	-	-
		Südosten	>90°	-	-
Bahn- abschnitt	B6	Nordwesten	28°	nein	Keine freie Sichtlinie auf die PVA aufgrund von Hindernissen wie Gebäuden und Vegetation.
		Südosten	>90°	-	
		Nordosten	40°	-	
		Südwesten	>90°	-	-
LEGENDE					
Relevante Blendwirkungen innerhalb der Erheblichkeitsgrenze					
Relevante Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze (aber außerhalb der Erheblichkeitsgrenze)					
Relevante Blendwirkungen außerhalb der Beeinträchtigungsgrenze / keine (relevanten) Reflexionen					
Relevante Blendwirkungen werden durch					

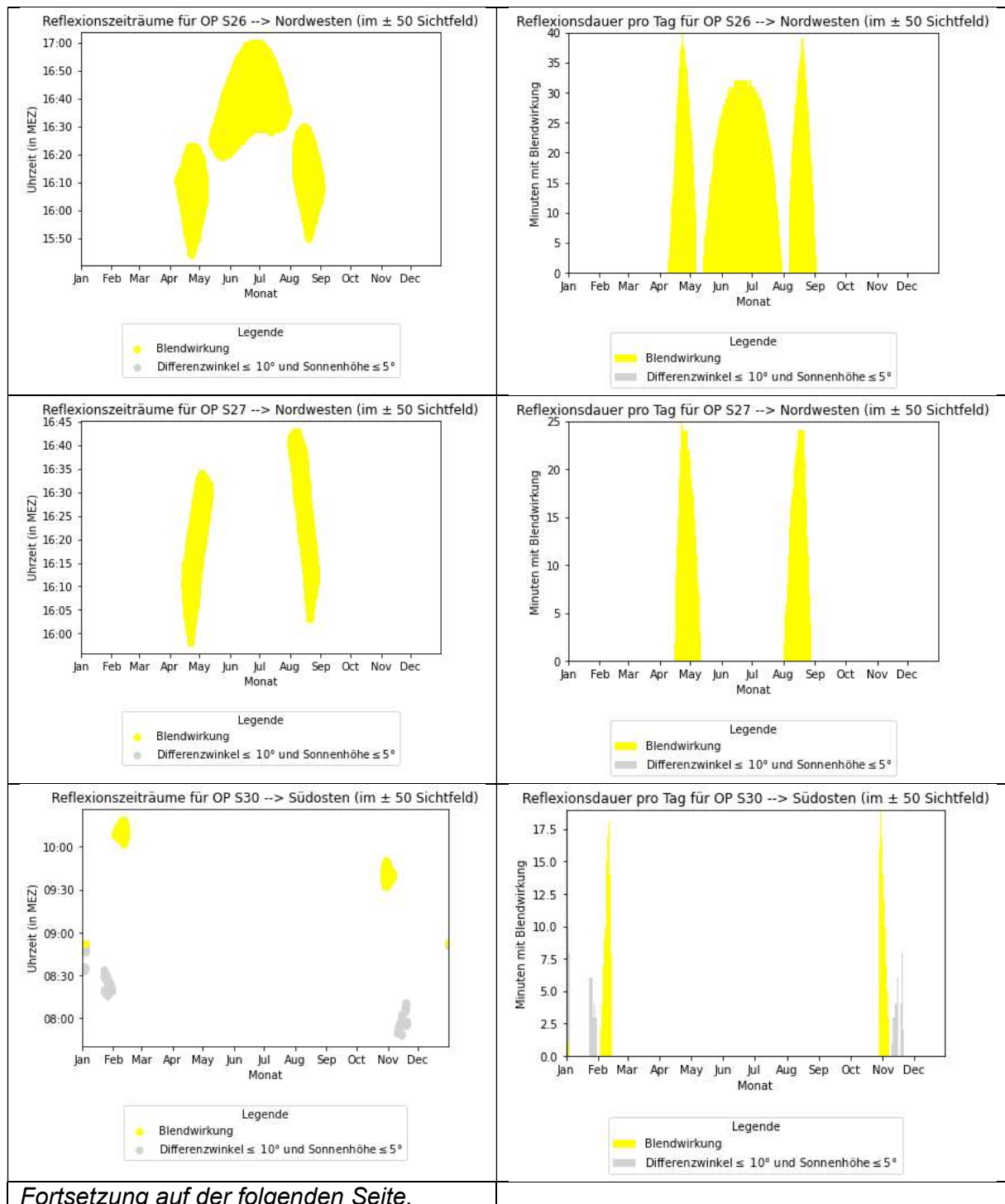
Ergebnisdiagramme 2: Reflexionen zu den OP auf den Verkehrswegen, sofern diese innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze wahrgenommen werden können

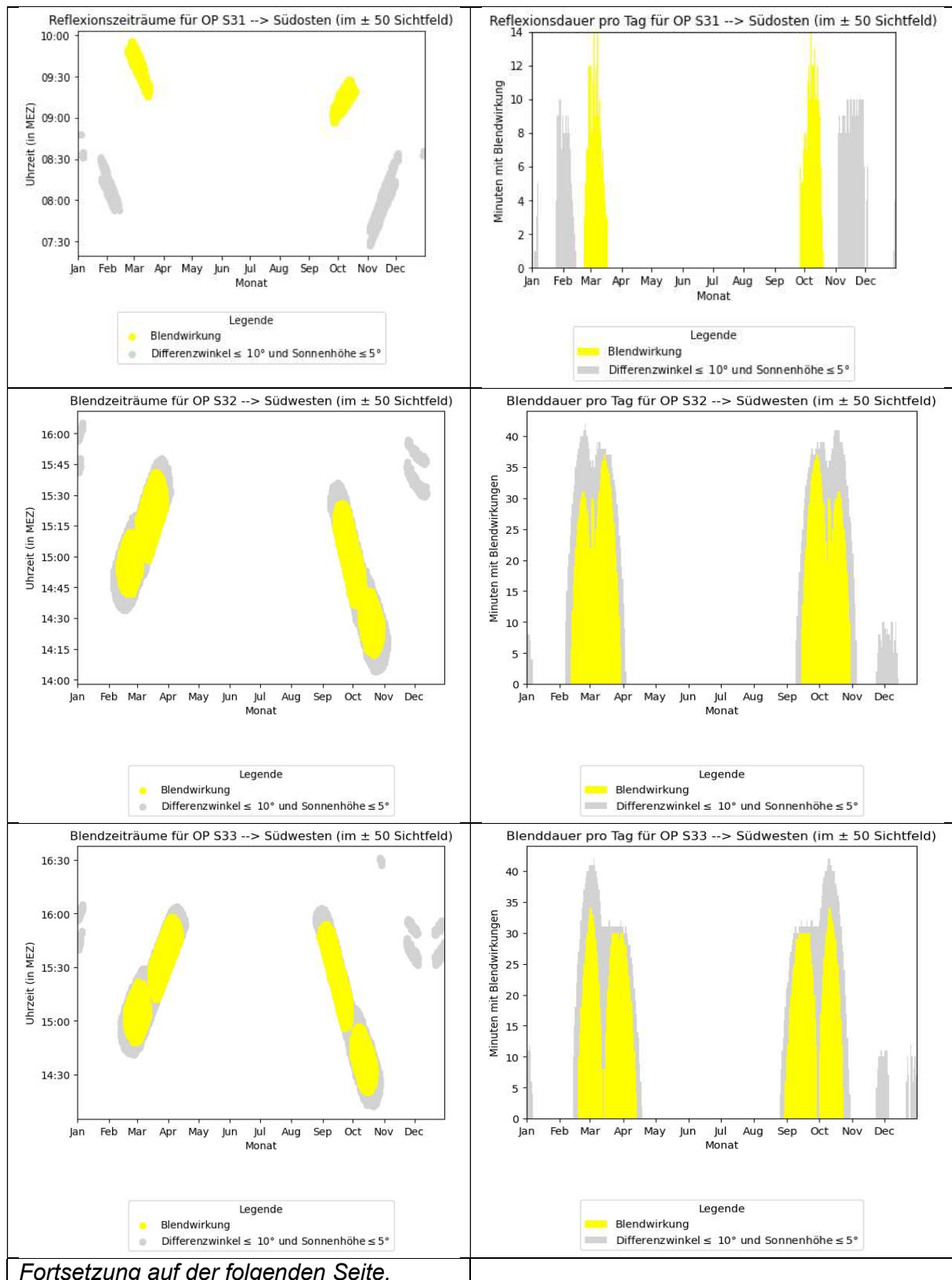


Fortsetzung auf der folgenden Seite.

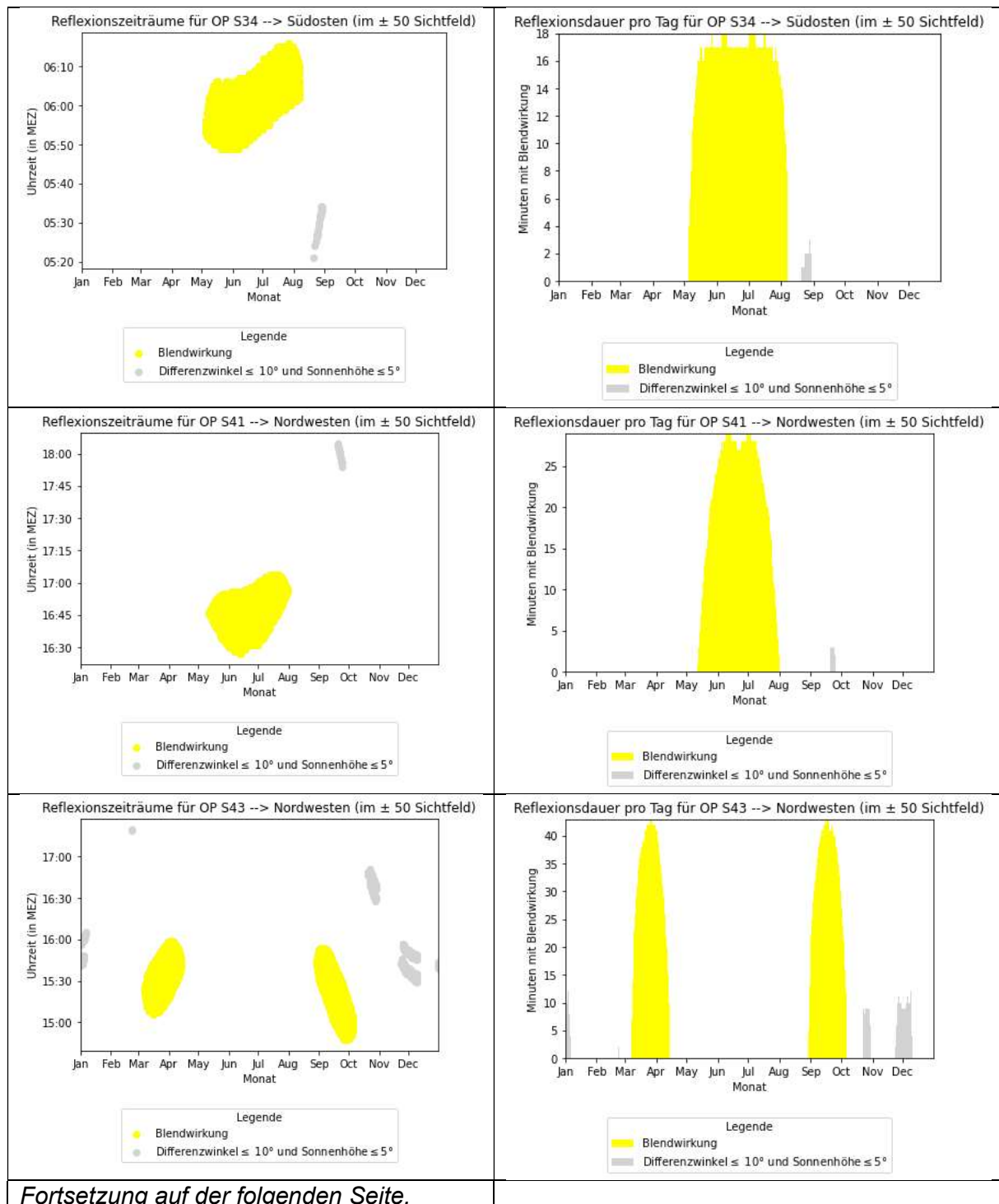


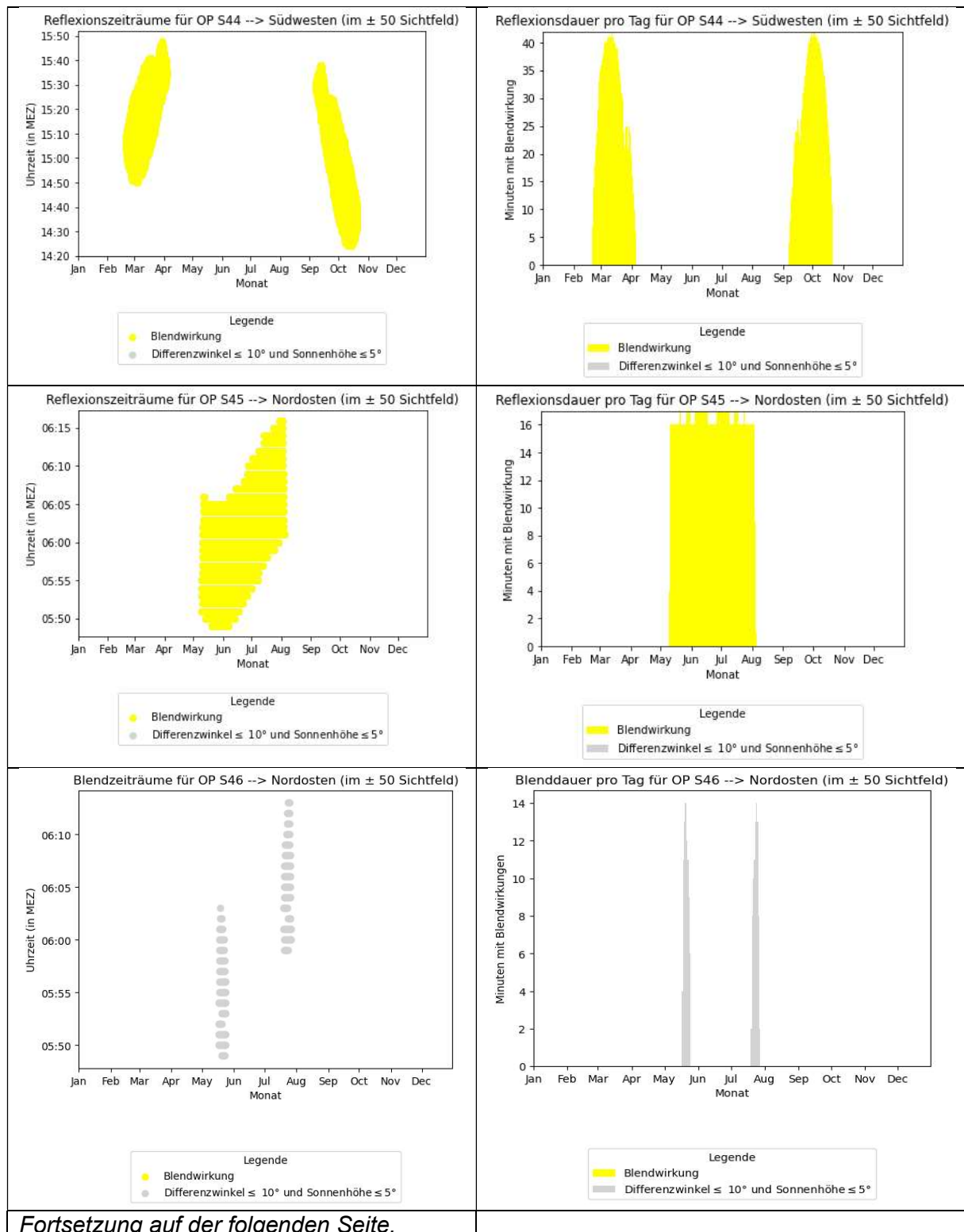
Fortsetzung auf der folgenden Seite.



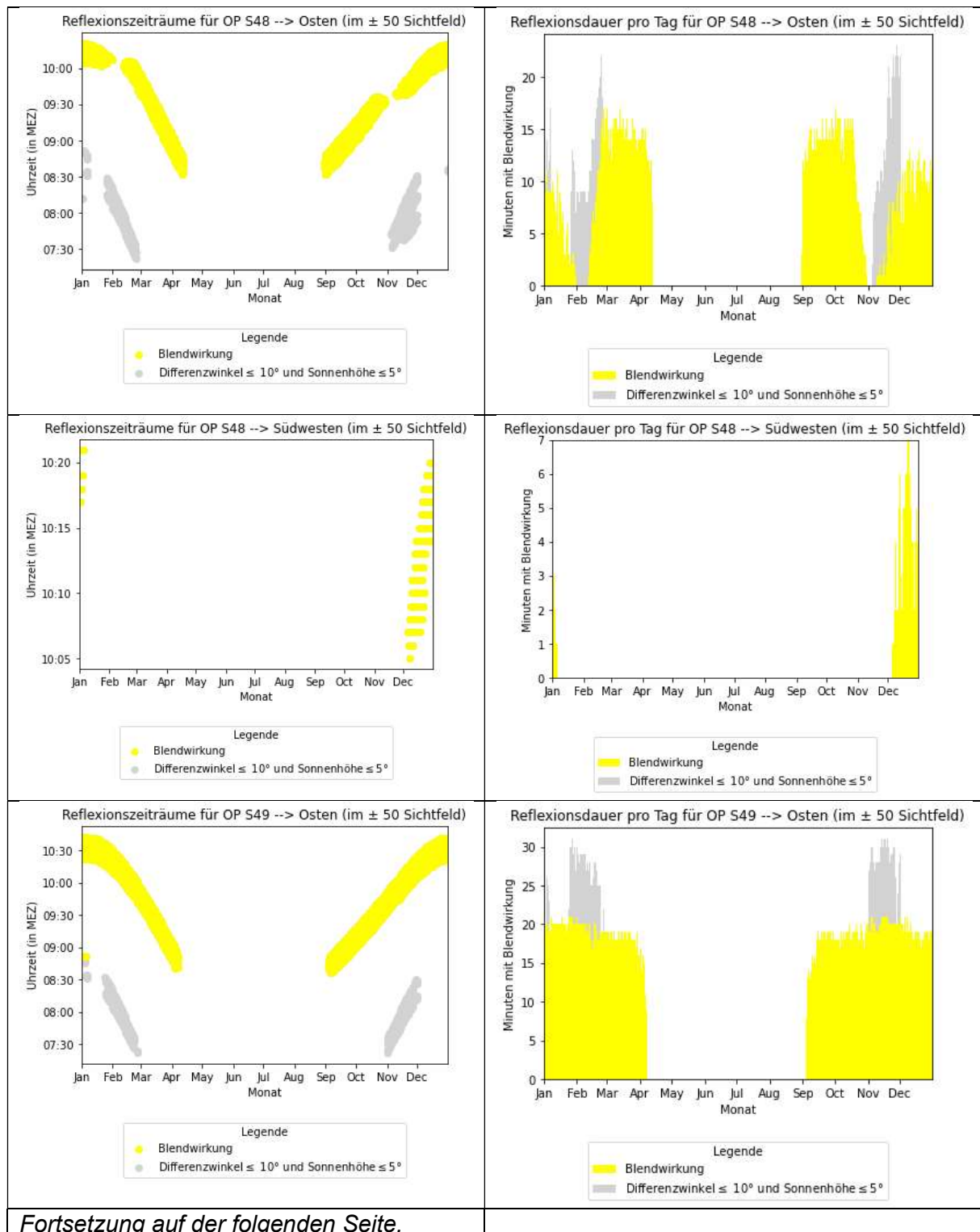


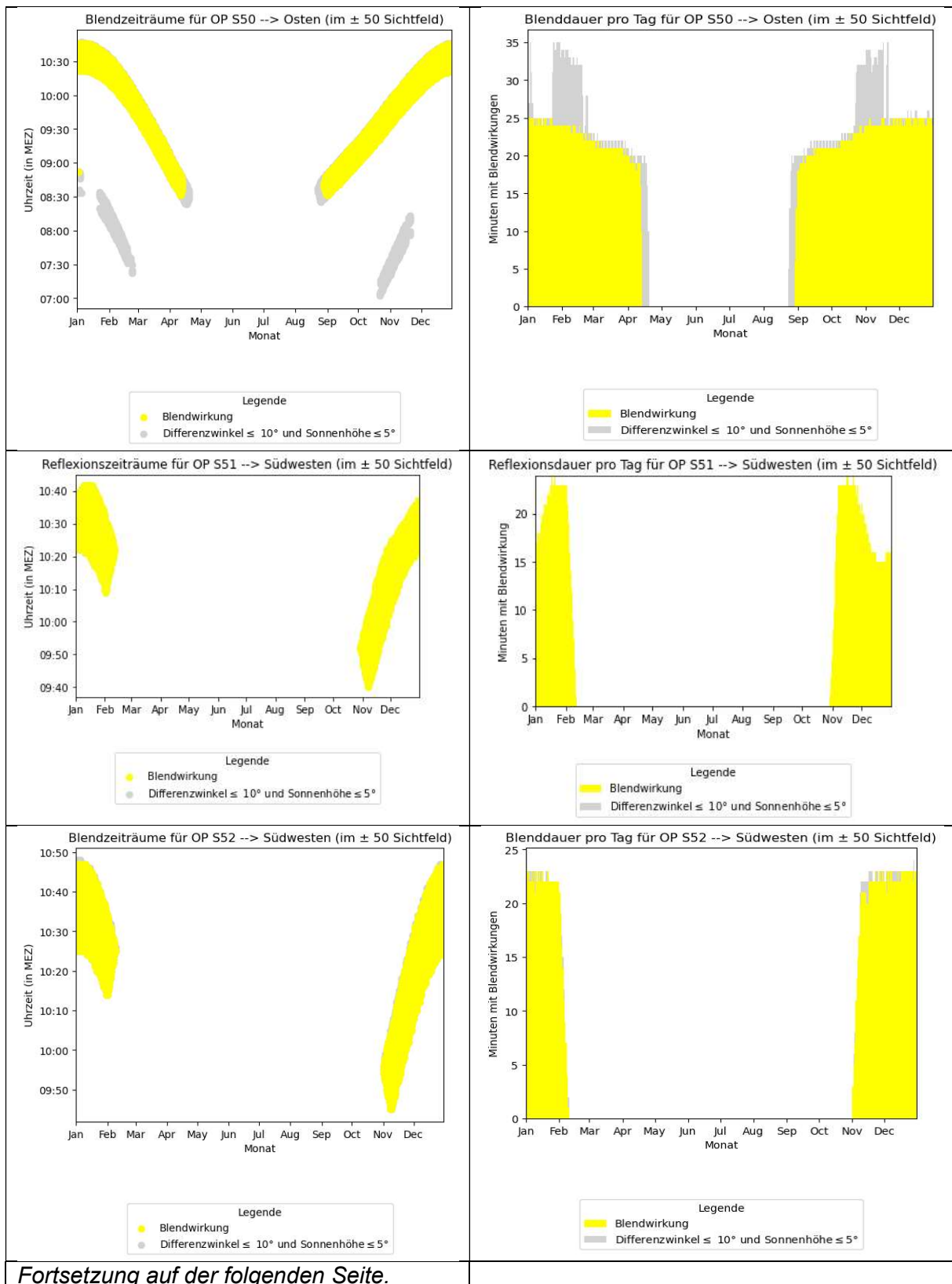
Fortsetzung auf der folgenden Seite.

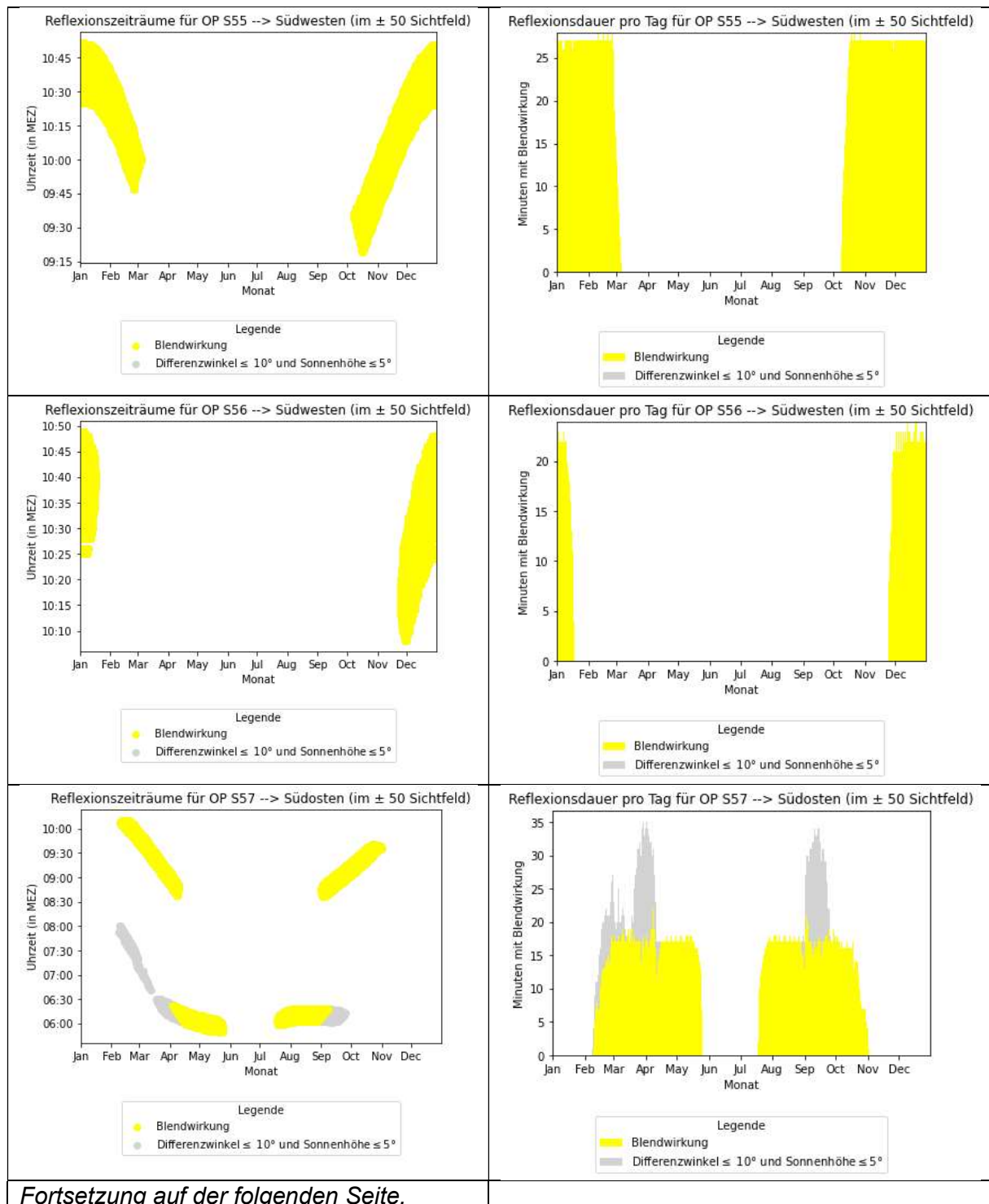




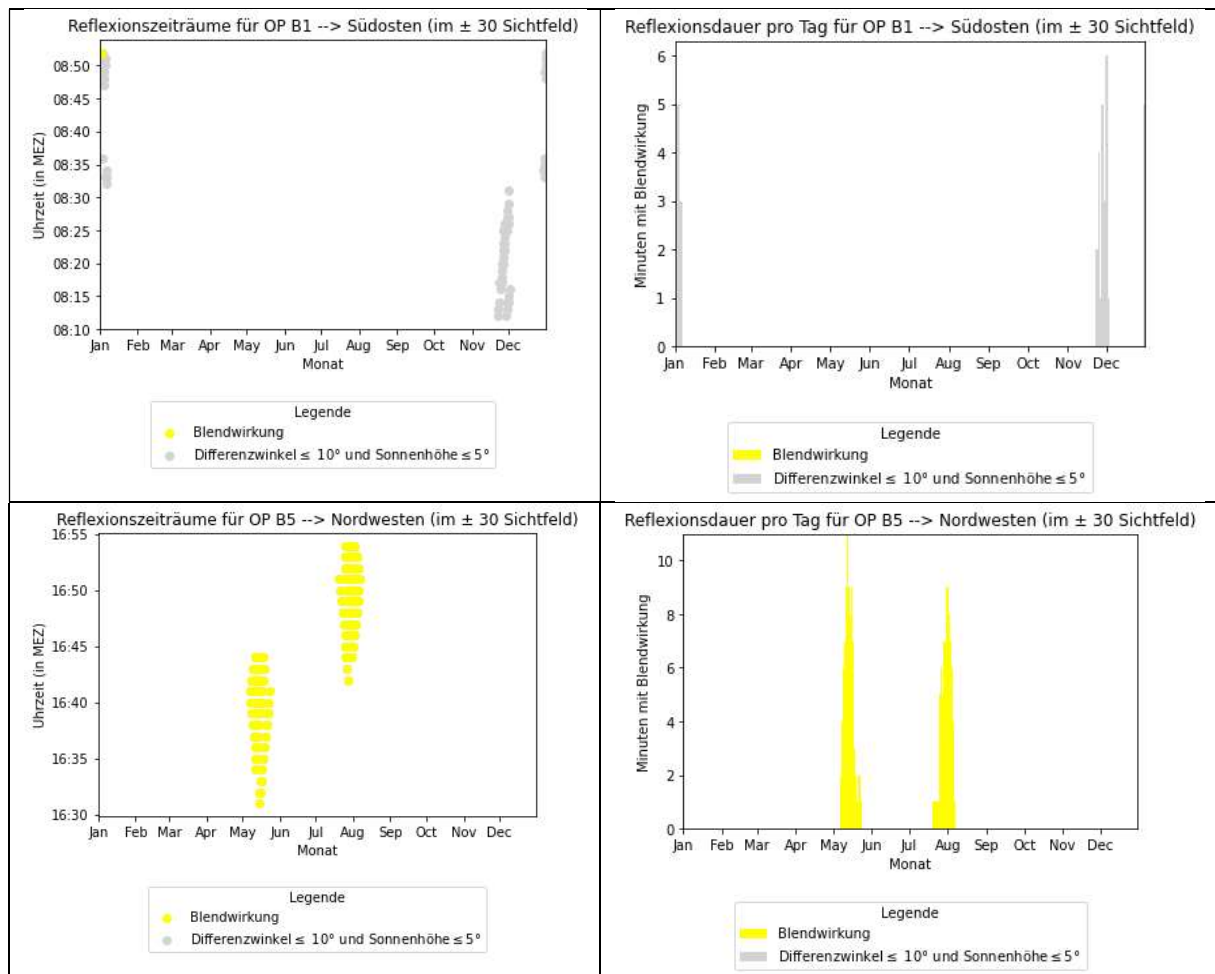
Fortsetzung auf der folgenden Seite.







Fortsetzung auf der folgenden Seite.



7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Gebäude

Im relevanten Umfeld der Photovoltaikanlage (200 m Radius) befinden sich mehrere Wohn- und Bürogebäude. Allerdings können die LAI-Grenzwerte nur am Betrachtungspunkt OP H4 überschritten werden. Der OP H4 repräsentiert den Gebäudekomplex westlich der PV-Felder 3 und 4.

In der Berechnung wurde die örtliche Vegetation nicht berücksichtigt. Tatsächlich schränken hochgewachsene Bäume die Sicht von OP H4 auf die PV-Flächen 2 bis 5 ein, während PV-Fläche 1 in diese Richtung keine Reflexionen erzeugt. Wird die örtliche Vegetation mit einbezogen, ergeben sich keine erheblichen Blendwirkungen auf schutzwürdige Räume.

Ohne die Vegetation könnten bei den Gebäuden an OP H4 im Obergeschoss störende Blendwirkungen auftreten.



Abbildung 19: Vegetation bei OP H4

7.2 Verkehrswege

Im Umfeld der Photovoltaikanlage wurden als relevante Verkehrswege die Bundesautobahn A 3 mit ihren lokalen Auffahrten, die Staatsstraße ST 2660 mit der anbindenden Ostenhafenstraße, die Max-Planck-Straße, die Siemensstraße mit den anliegenden Seitenstraßen Maxhüttenstraße und Glasfaserstraße, die Landauer Straße und die Kremser Straße sowie die Bahnanlage am Osthafen identifiziert und geprüft.

Darüber hinaus wurde die westlich der Anlage gelegene Teststrecke von „Vitesco Technologies“ untersucht.

7.2.1 Bundesautobahn A 3

Fahrzeugführer auf der Bundesautobahn können, rein geometrisch betrachtet (ohne Berücksichtigung etwaiger Hindernisse), Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld ($\pm 30^\circ$ bezogen auf die Fahrtrichtung) erfahren. Tatsächlich werden die Reflexionen jedoch von der Sonne überlagert, und es besteht kein freier Sichtbezug zur Photovoltaikanlage.

Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.2 Staatsstraße ST 2660

Fahrzeugführer auf der Staatsstraße ST 2660 können bei Fahrtrichtung Nordwesten, rein geometrisch betrachtet, Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Die Reflexionen gehen von den PV-Flächen 1 bis 3 aus.

Aufgrund der großen Entfernung von über 800 m zur Photovoltaikanlage nehmen die Module jedoch nur einen schmalen Streifen am Horizont ein, sodass keine große reflektierende Fläche entsteht, die erhebliche Blendwirkungen verursachen könnte. Zudem wird die Sichtlinie zur Anlage durch Vegetationsstreifen, Gebäude und die Module von PV-Fläche 4 unterbrochen.

Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.3 Osthafenstraße

Fahrzeugführer auf der Osthafenstraße können bei Fahrtrichtung Südwesten, rein geometrisch betrachtet, Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Tatsächlich wird die Sichtlinie zur Photovoltaikanlage jedoch durch Gebäude und hohe Vegetation unterbrochen.

Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.4 Max-Planck-Straße

Das zentrale Sichtfeld von Fahrzeugführern auf der Max-Planck-Straße bleibt durchgehend blendfrei. Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.5 Siemensstraße

Fahrzeugführer auf der Siemensstraße können, rein geometrisch betrachtet, Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Tatsächlich wird die Sichtlinie zur Photovoltaikanlage jedoch durch Vegetation und Gebäude unterbrochen.

Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.6 Maxhüttenstraße

Fahrzeugführer auf der Maxhüttenstraße können, rein geometrisch betrachtet, Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Tatsächlich wird die Sichtlinie zur Photovoltaikanlage jedoch durch Vegetation und Gebäude unterbrochen.

Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.7 Glasfaserstraße

Das zentrale Sichtfeld von Fahrzeugführern auf der Glasfaserstraße bleibt durchgehend blendfrei.

Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.8 Landauer Straße

Auf der Landauer Straße können Fahrzeugführer, rein geometrisch betrachtet, Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Die für die Blendwirkungen verantwortlichen Reflexionen gehen von den PV-Flächen 3 und 4 aus.

Tatsächlich wird die Sichtlinie auf PV-Fläche 3 durch Vegetation unterbrochen. Um die Reflexionen von PV-Fläche 4 zu verhindern, besteht die Möglichkeit, die Tracking-Anlage so einzustellen, dass der Anstellwinkel während des Backtrackings in den Abendstunden 10° nicht unterschreitet.

7.2.9 Kremser Straße

Das zentrale Sichtfeld von Fahrzeugführern auf der Kremser Straße bleibt durchgehend blendfrei.

Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.10 Bahnanlage

Lokführer auf der Bahnanlage nördlich der PVA können, rein geometrisch betrachtet, Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Tatsächlich wird die Sichtlinie zur Photovoltaikanlage jedoch durch Vegetation und Gebäude unterbrochen.

Daher sind keine erheblichen Blendwirkungen zu erwarten.

7.2.11 Teststrecke

Fahrzeugführer auf der Teststrecke westlich der PVA können abschnittsweise Blendwirkungen im zentralen Sichtfeld erfahren. Tatsächlich befindet sich jedoch ein Vegetationsstreifen zwischen der PVA und der Strecke, der die Sichtlinie unterbricht.

Reflexionen können jedoch auch in den Wintermonaten auftreten (unbelaubter Zustand). Insbesondere in Fahrtrichtung im Uhrzeigersinn könnten Fahrzeugführer dann in der Nordkurve frontal geblendet werden, wie die folgende Grafik skizziert. Entsprechend sollte hier im Kurvenbereich der Sichtschutz durch vorgezogene immergrüne Pflanzen oder einen Sichtschutzzaun verstärkt werden. Der Sichtschutz sollte etwa 2,7 m hoch sein.

Zudem wird empfohlen, mit dem Betreiber der Teststrecke in Kontakt zu treten. Seitliche Reflexionen auf die Teststrecke sind nicht auszuschließen, da sie auch in den Wintermonaten auftreten können. Soll die Teststrecke vollständig frei von Reflexionen sein, sollte die Vegetation im Osten verdichtet werden.



Abbildung 20: Skizze der störenden Reflexionen in den nördlichen Kurvenbereich (gelbe Pfeile) sowie empfohlene Position eines zusätzlichen Sichtschutzes (grün)

7.3 Allgemeiner Hinweis

Da der Algorithmus der Tracker-Steuerung derzeit nicht einsehbar ist, wurde die Nachführung gemäß [9] modelliert.

In Anbetracht der umliegenden Immissionsorte bietet sich eine Fehlerstellung bzw. Sturmstellung mit einer Modulneigung von 10° in Richtung Westen an. Dadurch können stärkere Blendwirkungen auf der Landauer Straße verhindert werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), *Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen (Leitfaden)*. 2012. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/lichthinweise-2015-11-03mit-formelkorrektur_aus_03_2018_1520588339.pdf
- [2] K. Mertens, *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, 5. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2020.
- [3] Volker Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*, 9. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [4] J. Yellowhair und C. K. Ho, „Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts“, San Diego, California, USA: American Society of Mechanical Engineers, Juni 2015, S. V002T11A003. doi: 10.1115/ES2015-49481.
- [5] J. A. Duffie und W. A. Beckman, „Solar Engineering of Thermal Processes“, Bd. 4, 2013.
- [6] Österreichischer Verband für Elektrotechnik (OVE), „Blendung durch Photovoltaikanlagen - OVE-Richtlinie R 11-3“. 2016.
- [7] R. Jurado-Piña und J. M. P. Mayora, „Methodology to Predict Driver Vision Impairment Situations Caused by Sun Glare“, *Transportation Research Record*, Bd. 2120, Nr. 1, S. 12–17, Jan. 2009, doi: 10.3141/2120-02.
- [8] Jason A- Rogers, Clifford K. Ho, Andrew Mead, Angel Millan, Melissa Beben, und Gena Drechsler, „Evaluation of Glare as a Hazard for General Aviation Pilots on Final Approach“. 2015. Zugriffen: 15. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/2010s/media/201512.pdf
- [9] E. Lorenzo, L. Narvarte, und J. Muñoz, „Tracking and back-tracking“, *Progress in Photovoltaics*, Bd. 19, Nr. 6, S. 747–753, Sep. 2011, doi: 10.1002/pip.1085.

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