



SONNWINN GmbH

Unabhängige Experten für Photovoltaik und Stromspeicher

BLENDGUTACHTEN

PVA KONRADSREUTH

VERSION 1.0

Bearbeitet:

Sachverständiger für Photovoltaik
Dr.-Ing. Stefan Bofinger

SONNWINN GmbH
Elbstraße 88/1
+49 151 64957433
stefan.bofinger@sonnwin.de
www.sonnwin.de

Waldkappel, 04.07.2025



Revisionstabelle

Version	Änderung	Datum	Name
1.0	Erste Fassung	04.07.2025	Dr.-Ing. Stefan Bofinger

Das Gutachten ist nur in seiner aktuellen Fassung gültig.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Fragestellung	4
1.2	Haftungsausschluss	4
1.3	Datengrundlage	4
1.4	Übersicht der angewendeten Methodiken	5
2	Anlagenbeschreibung	6
3	Zusammenfassung der Ergebnisse	8
4	Grundlagen	9
4.1	Blendwirkung von Modulen	9
4.2	Berechnung von Reflexionen	11
4.3	Verwendete Software, Annahmen und Limitationen	11
5	Blendwirkungen auf Gebäude	12
5.1	Auswertungsmethodik	12
5.2	Schutzwürdige Räume in der Umgebung der PVA	13
5.3	Observationspunkte	14
5.4	Ergebnisse	15
6	Blendwirkungen auf Verkehrswege	16
6.1	Auswertungsmethodik	16
6.2	Relevante Verkehrswege	18
6.3	Observationspunkte	19
6.4	Ergebnisse	20
7	Blendwirkungen auf den Luftverkehr	21
7.1	Auswertungsmethodik	21
7.2	Flughafen Hof-Plauen	24
7.3	Observationspunkte	25
7.4	Ergebnisse	26
8	Diskussion der Ergebnisse	30
8.1	Gebäude	30
8.2	Verkehrswege	30
8.3	Flugverkehr	30
9	Literaturverzeichnis	31
	Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT	32

1 Einleitung

Die SONNWINN GmbH, die unabhängigen Experten für Photovoltaik und Stromspeicher, wurde beauftragt, die möglichen Blendwirkungen folgender Photovoltaikanlage (PVA) zu untersuchen und zu bewerten:

Tabelle 1: Projektübersicht

Auftraggeber	M. Münch Elektrotechnik GmbH & Co KG
Projektname	Solarpark Konradsreuth
Adresse PVA	95176 Konradsreuth
Stand der Projektierung	<input type="checkbox"/> Bestand <input type="checkbox"/> Im Bau <input checked="" type="checkbox"/> Planung

1.1 Fragestellung

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

- Schutzwürdige Räume (z.B. Wohnräume)
- Straßenverkehr
- Luftverkehr am Flughafen Hof-Plauen

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)	geoservices.bayern.de, Bayerische Vermessungsverwaltung

1.4 Übersicht der angewendeten Methodiken

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

Tabelle 3: Methodiken

Immissionsort	Methodik
Verkehrswege	Eigene Auswertungsmethodik (siehe Kapitel 5)
Schutzbedürftige Räume (Wohnräume, Büros etc.)	Gemäß dem Leitfaden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI-Leitfaden) [1]

2 Anlagenbeschreibung

Die geplante PVA besteht aus zwei PV-Flächen.

Tabelle 4: Relevante Anlagenparameter

Parameter	Angabe/Wert
Geokoordinaten (Breite, Länge)	50°16'59.6"N 11°51'20.4"E
Art der Anlage	Freiflächenanlage
Modultyp	Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung
Aufständerung	Fest aufgeständert
PV-Fläche	ca. 81 ha (innerhalb Einfriedung)
Nennleistung (DC)	20,064 MWp
Modulausrichtung (Azimut)	180° Süd
Modulneigung	17°
Höhe Modulunterkante	1,0 m (es wird angenommen, dass die Tische entsprechend der Modulunterkante an die Topografie angepasst werden, sodass die Moduloberkanten variabel und entsprechend ggf. höher ausfallen)
Höhe Moduloberkante	angenommen: ca. 3,13 m (bei flachem Terrain)



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



Abbildung 2: Belegungsplan - Quelle: Auftraggeber

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im relevanten Umfeld (100 m Radius) der Photovoltaikanlage befinden sich keine Wohngebäude. Damit werden die Grenzwerte des LAI-Leitfadens eingehalten.

Im Umfeld der Photovoltaikanlage wurden als relevante Verkehrswege die Kreisstraße HO 37 identifiziert und entsprechend auf Blendwirkungen untersucht.

Die Straße bleibt frei von erheblichen und beeinträchtigenden Blendwirkungen.

Der Flugverkehr des nahegelegenen Flughafens Hof-Plauen (ICAO-Code: EDQM) wurde sowohl für die Platzrunden und Sichtanflug als auch für Start- und Landekorridore in Richtung des Rollfeldes untersucht. Erhebliche Blendwirkungen bei direkten Landeanflug können ausgeschlossen werden.

Geringfügige Blenderscheinungen im Gegenanflug und bei einer Distanz deutlich über 2000m vom Touch-Down-Punkt werden vom Verfasser als unkritisch eingeschätzt.

Damit sind keine beeinträchtigenden Wirkungen auf den Flugverkehr zu erwarten.

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 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 [1], müssen demnach Einfallswinkel berücksichtigt werden.

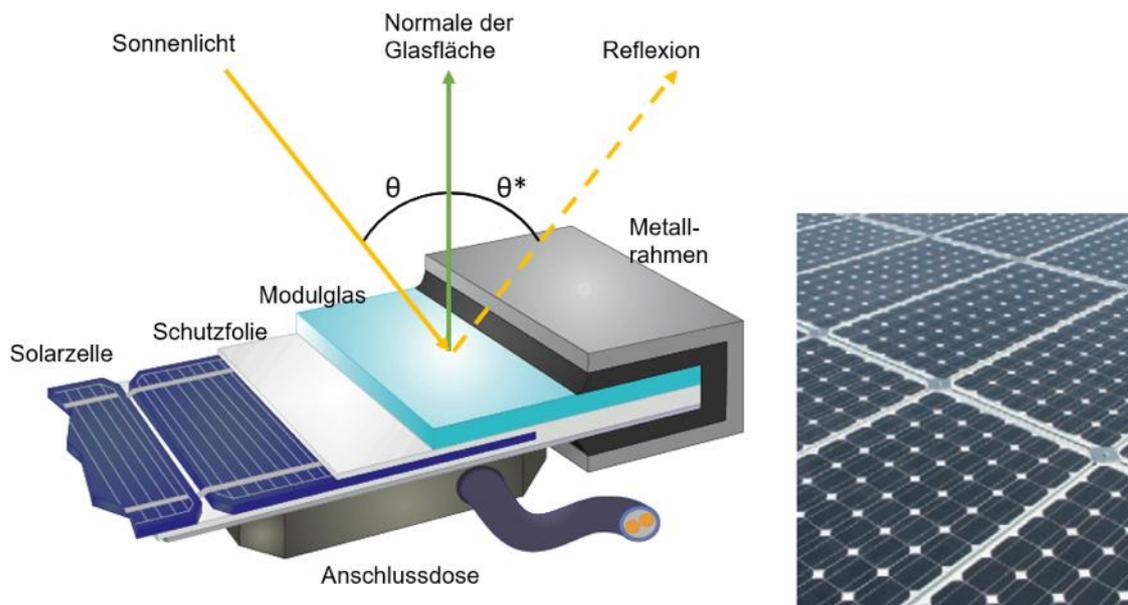


Abbildung 3: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“
- Quelle: [3] (modifiziert)

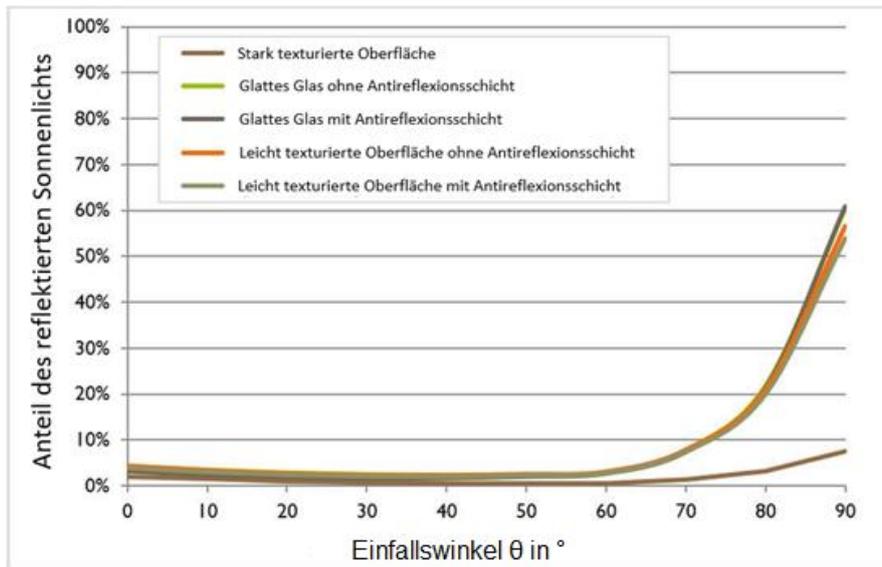


Abbildung 4: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypen - Quelle: [4], modifiziert

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 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 [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].

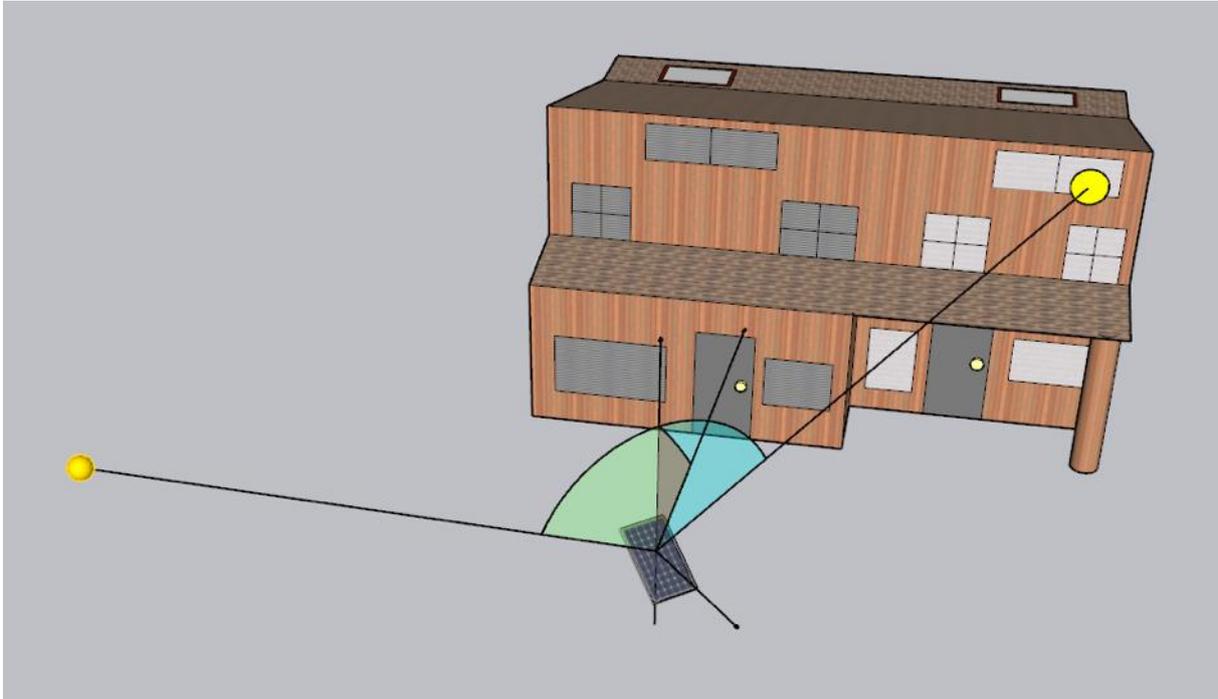


Abbildung 6: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion - Quelle: Eigene Abbildung

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].

Abbildung 7 veranschaulicht den Bereich, der 100 Meter oder näher an der Photovoltaikanlage liegt.

Es lässt sich feststellen, dass im 100-Meter-Umkreis keine schutzwürdige Wohngebäude vorhanden sind.

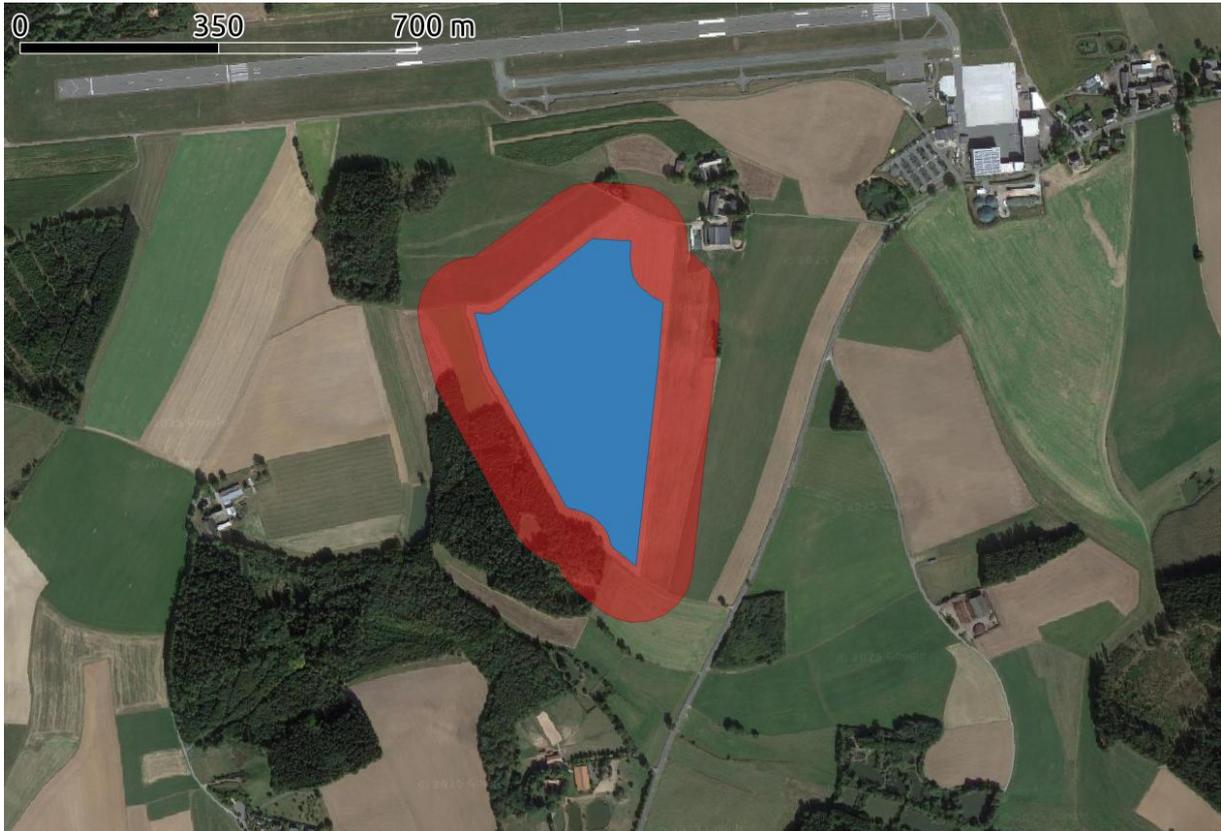


Abbildung 7: Übersicht der 100-Meter-Zone - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

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 fünf OP an den schutzwürdigen Räumen definiert.

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. Generell sind höher gelegene Immissionsorte stärkeren Blendwirkungen ausgesetzt als niedriger gelegene.

Da keine schutzwürdigen Räume identifiziert wurden, wurden keine OP definiert.

5.4 Ergebnisse

Es konnten keine schutzwürdigen Räume im Umfeld der Anlage gefunden.

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 8 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.

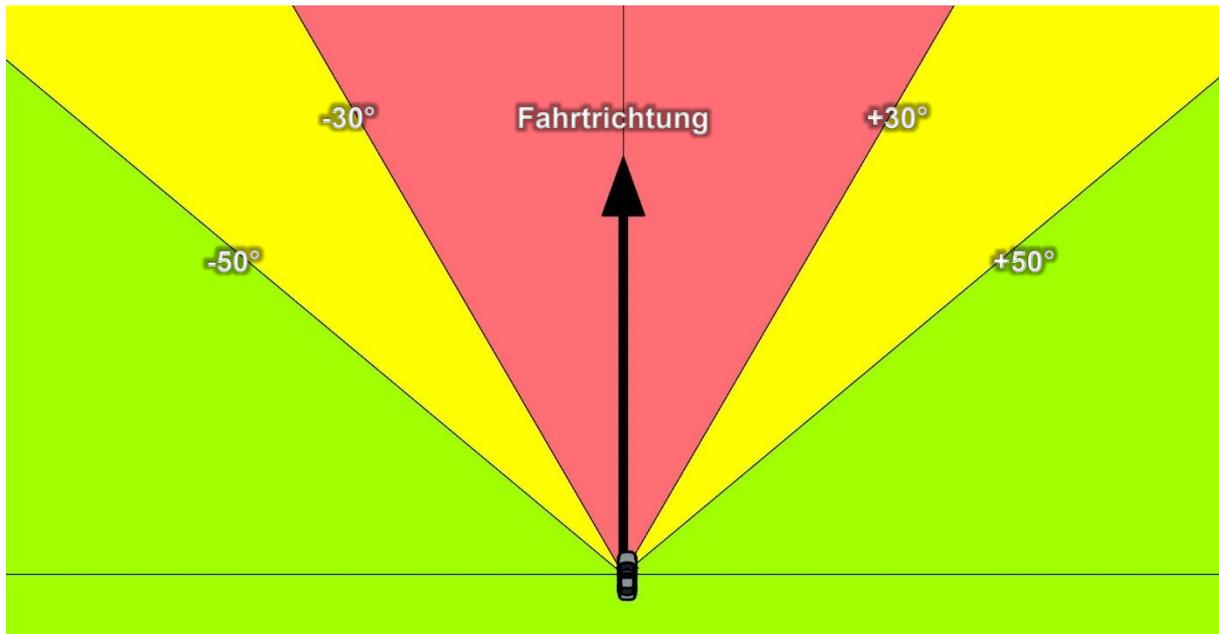


Abbildung 8: Definierte Sichtfelder eines Fahrzeugführers
– Quelle: Eigene Abbildung

Die folgenden Abbildungen zeigen die geschätzten Augenhöhen der Verkehrsteilnehmer. Diese Angaben sind im Rahmen der Simulation relevant.



Abbildung 9: Augenhöhe der Straßenverkehrsteilnehmer
– Quelle: Volkswagen AG (modifiziert), BTS GmbH & Co. KG (modifiziert)

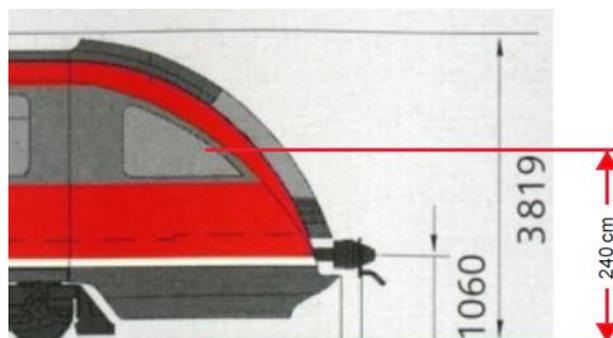


Abbildung 10: Augenhöhe von Lokführern – Quelle: www.nahverkehr-franken.de (modifiziert)

6.2 Relevante Verkehrswege

Im Umfeld der Photovoltaikanlage wurden als relevante Verkehrswege die Kreisstraße HO 37 identifiziert und entsprechend auf Blendwirkungen untersucht.

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.

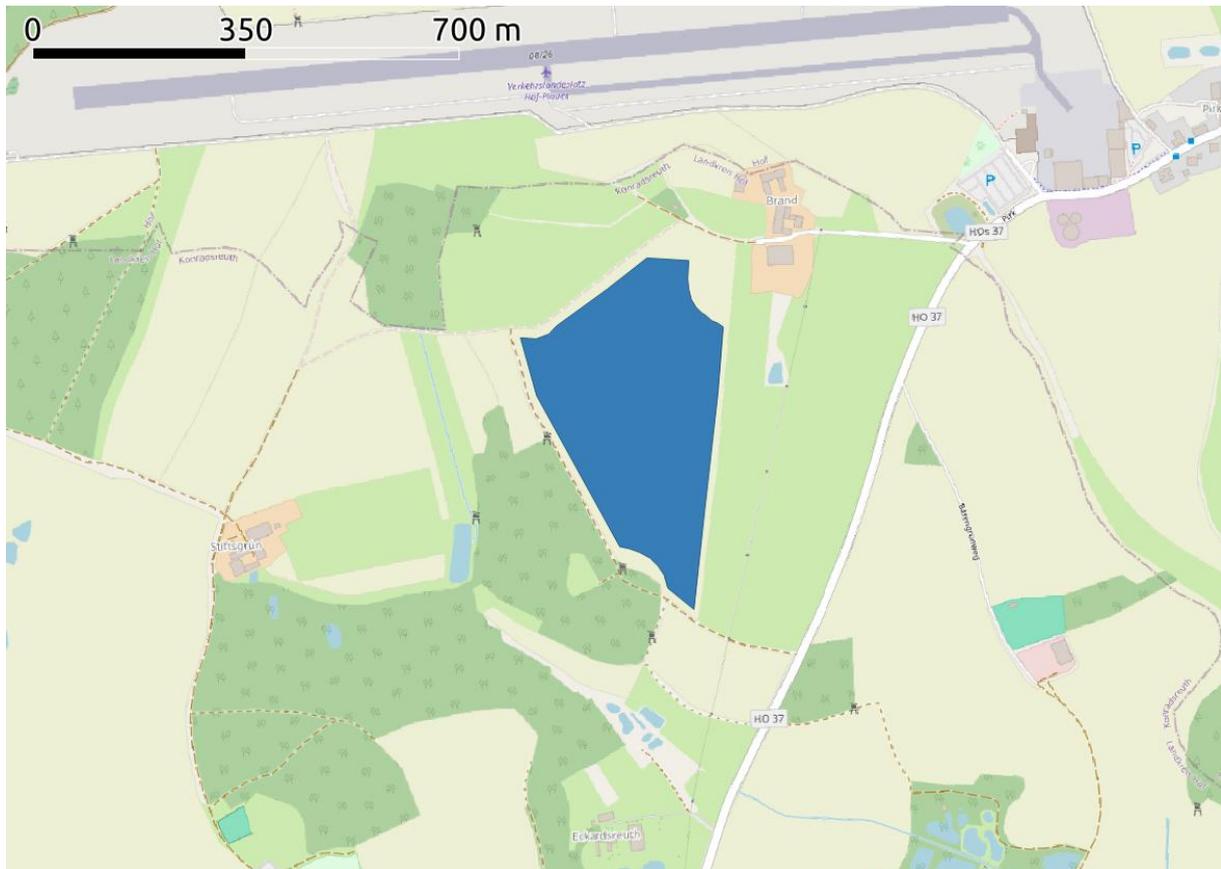


Abbildung 11: Positionen der als relevant eingestuften Verkehrswege - Quelle Karte: OpenStreetMap

6.3 Observationspunkte

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

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

- OP S1 bis S4 für den Straßenverkehr auf der HO37

Die OP S15 bis S29 sind in einer Höhe von 2,65 m über dem Straßenniveau angebracht, entsprechend der angenommenen Augenhöhe eines Lokführers.



Abbildung 12: Positionen der OP auf den Verkehrswegen - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

6.4 Ergebnisse

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

Verkehrsweg	OP	Fahrtrichtung	Min. Winkel zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle (ca.)		Werden die Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze vollständig von der Sonne überlagert?	Anmerkung
	S1	Nord	-		-	-
	S2		88,4°	-	-	-
	S3		86,7°		-	-
	S4		-		-	-
	S1	Süd	-		-	-
	S2		78,6°		-	-
	S3		70,0°		-	-
	S4		-		-	-
LEGENDE						
Relevante Blendwirkungen innerhalb der Erheblichkeitsgrenze						
Relevante Blendwirkungen innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze (aber außerhalb der Erheblichkeitsgrenze)						
Relevante Blendwirkungen außerhalb der Beeinträchtigungsgrenze / keine (relevanten) Reflexionen						

7 Blendwirkungen auf den Luftverkehr

7.1 Auswertungsmethodik

Für die Beurteilung von PVA-bedingten Blendwirkungen bei Landeanflügen auf Flugplätzen/Flughäfen ist in keiner Norm (o. Ä.) festgelegt oder standardisiert.

Dementsprechend wurde für den vorliegenden Sachverhalt eine Auswertungs- bzw. Bewertungsmethodik entwickelt, welche auf diversen Quellen beruht.

PVA-bedingte Blendwirkungen (im Kontext der Luftfahrt) werden in Anlehnung an das Dokument „Certification Specifications and Guidance Material for Aerodromes Design CS-ADR-DSN“ der Europäischen Agentur für Flugsicherheit an/in folgenden Lokationen/Situationen als relevant eingestuft [6]:

- Während des Landeanflugs
- Während des Aufsetzens (Touchdown) und beim Rollen auf der Landebahn
- Arbeitsbereich im Flugverkehrskontrollturm

Der Flugplatz verfügt über keinen Tower. Zudem sind Blendwirkungen auf den Flugplatz aufgrund der Entfernung und Position pauschal auszuschließen. Der Flugplatz ist ca. 870 m von den ersten Modulen der PVA entfernt, sodass ein Sichtbezug zur Anlage ausgeschlossen werden kann. Im Folgenden gilt es daher, nur die Anflüge zu prüfen.

Für diese wurden aus der Literatur unterschiedliche Grenzwerte angesetzt. Diese sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Grenzwerte für Blendung im Luftverkehr aus der Literatur

Quelle	Grenzwert/Kriterium
Studie der Federal Aviation Administration (FAA, USA) [8]	<ol style="list-style-type: none">1. Blendwirkungen außerhalb des Sichtfeldes von 50° sind bei Landeanflügen unerheblich2. Blendwirkungen außerhalb des Sichtfeldes von 25° sind bei Landeanflügen weniger relevant
European Aviation Safety Agency[9]	<ol style="list-style-type: none">1. Unerheblichkeitsgrenze für PV-Reflexionen ($<20.000\text{cd/m}^2$)2. Sensible Bereiche beim Anflug/Abflug: Daher wird im Entscheidungsbaum berücksichtigt, dass sofern Blendwirkungen beim Landeanflug mit ausreichend Abstand bis zum Erreichen der Entscheidungshöhe stattfinden, diese als weniger kritisch eingestuft werden.
Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) [2].	<ol style="list-style-type: none">1. Blendwirkung der Sonne überwiegt bei kleinen Differenzwinkeln zwischen Sonnenstrahlen und Reflexion. Ab einem Differenzwinkel ab ca. 10° gelten Blendwirkungen demnach als relevant2. Absolutblendung ab 100.000 cd/m^2

Vertikales Sichtfeld

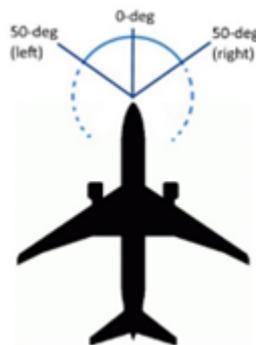


Abbildung 8: Darstellung des relevanten horizontalen Sichtfelds von Piloten: Die linke Seite stellt beispielhaft eine Blendwirkung im relevanten Sichtfeld dar. Die rechte Seite zeigt das relevante horizontale Sichtfeld von 50° zu beiden Seiten. - Quelle: [8], ForgeSolar.com (modifiziert)

Vertikales Sichtfeld



Abbildung 9: Darstellung des vertikalen Sichtfelds von Piloten - Quelle: ForgeSolar.com (modifiziert)

Die angegebenen Werte gelten für den direkten Landeanflug. Im vorliegenden Fall wird auch insbesondere die Platzrunde betrachtet. Hier ist der Blick in die Platzrunde hinein (also nach rechts vom Piloten ausgesehen) wichtig.

Daneben haben haben beim Flug in der Platzrunde sind insbesondere zwei Bereiche herausragende Bedeutung:

1. Sichtachse auf die Landebahn
2. Sicht auf ggf vorausfliegende Flugzeuge in der Platzrunde

Letztere befinden sich in ungefähr der gleichen Höhe (zwischen 800 und 1000 ft, was ungefähr 300m entspricht).

Daher wird in der Bewertung die Geradeaussicht in gleicher Höhe (vertikales Sichtfeld +/-10° und horizontales Sichtfeld +/-30°, der Blick in die Platzrunde hinein sowie die Sichtachse auf die Landebahn insbesondere analysiert.

Daneben wird noch bewertet wie stark die Blendwirkung ist und groß die PV-Anlage vom Betrachter aus erscheint (= Anteil am Sichtfeld).

Die Gesamtbewertung wird in den 4 Kategorien **unkritisch**, **mäßig kritisch**, **kritisch** und **sehr kritisch** vorgenommen.

Die unterschiedlichen Kriterien werden bei der Bewertung unterschiedlich gewichtet:

Tabelle 7: Bewertungsschema der Kriterien

Kriterium		Bewertung absolut	Anmerkung
1	Blendwirkung innerhalb der Grenzen +/-50° horizontal, +/-30° vertikal	mäßig kritisch (>0Minuten/Jahr)	Nur beim direkten Anflug auf die Landebahn werten
2	Blendwirkung innerhalb der Grenzen +/-25° horizontal, +/-30° vertikal	Sehr Kritisch (>0Minuten/Jahr)	Nur beim direkten Anflug auf die Landebahn werten
3	Blendwirkung bei Blick in die Platzrunde, +/-30° vertikal	<100.000 cd/m ² mäßig kritisch > 100.000 cd/m ² kritisch	Beim Gegenanflug und Queranflug wichtig, beim direkten Landeanflug nicht werten
4	Blendwirkung bei Blick in die Platzrunde, +/-30° vertikal, horizontal 25-90° zur Flugrichtung	<100.000 cd/m ² mäßig kritisch > 100.000 cd/m ² sehr kritisch	Beim Gegenanflug und Queranflug wichtig, beim direkten Anflug nicht werten
5	Blendung bei Blick Richtung Rollfeld	< 30.000 cd/m ² unkritisch > 30.000 cd/m ² kritisch > 100.000 cd/m ² sehr kritisch	Hier ist nicht relevant, was die Kriterien 1 bis 4 ergeben, da dieses Kriterium bei Sichtflug äußerst relevant ist
6	Blendung bei Geradeausflug +/-10°, vertikal +/-10°	Sehr kritisch (>0Minuten/Jahr)	Hier ist nicht relevant, was die Kriterien 1 bis 4 ergeben, da dieses Kriterium bei Sichtflug äußerst relevant ist
7	Anteil am Blickfeld +/-50° horizontal, +/-30° vertikale	<1% unkritisch <3% mäßig kritisch <5% kritisch >10% sehr kritisch	Diese Bewertung wird nach allen anderen vorgenommen und begrenzt die maximal mögliche Bewertung. Wenn der Anteil am Sichtbereich 2% wäre, kann die Gesamtbewertung im schlechtesten Fall "mäßig kritisch" lauten

Hingewiesen sei an dieser Stelle nochmals, dass es zur Blendbewertung keine verbindlichen Standards gibt. Die verbindlichste Richtlinie war die des US Verkehrsministeriums, mit Vorgaben wie Blendung zu berechnen sei. In [10] wurde aber die Bewertung deutlich revidiert. Zusammenfassend gilt nur: PV-Anlagen müssen nicht betrachtet werden. Sie verhalten sich ähnlich wie z.B. Wasserflächen. Damit muss ein Pilot umgehen können.

Damit stellt die vorgestellte Methodik die Einschätzung des Verfassers vorbehaltlich der Zustimmung der oberen Luftfahrtbehörde dar.

7.2 Flughafen Hof-Plauen

Es gibt mehrere Platzrunden, zwei Richtung Süden, eine Richtung Norden. Der Flughafen liegt nur wenige hundert Meter nördlich der Anlage.

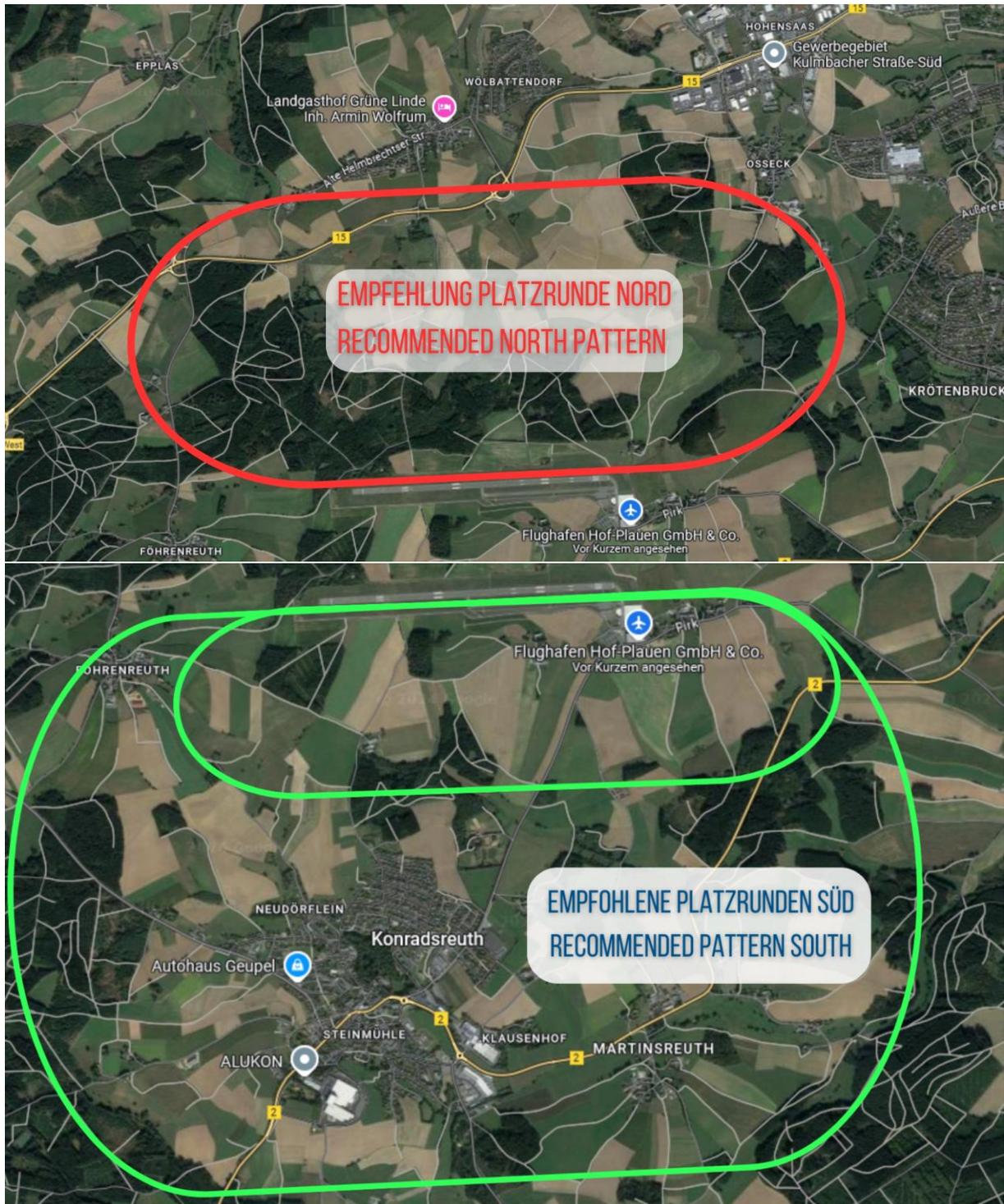


Abbildung 13: Skizze der Platzrunden am Flugplatz Quelle: Seite des Flughafens

Im Weiteren werden die beiden eingezeichneten werden die drei Platzrunden bewertet. Da auch größere Flugzeuge wie der A400M der Bundeswehr auf dem Flugplatz landen, wurden auch An- und Abflugkorridore mit einer angenommenen Steigung von 3° in Richtung der Fahrbahn analysiert.

7.3 Observationspunkte

Der Anflug bzw. Abflug kann bei den angegebenen Platzrunden in beiden Richtungen erfolgen. Es wurde die Blendwirkung an 21 OP auf den Platzrunden analysiert.

Die OP sind in Abbildung 14 dargestellt.

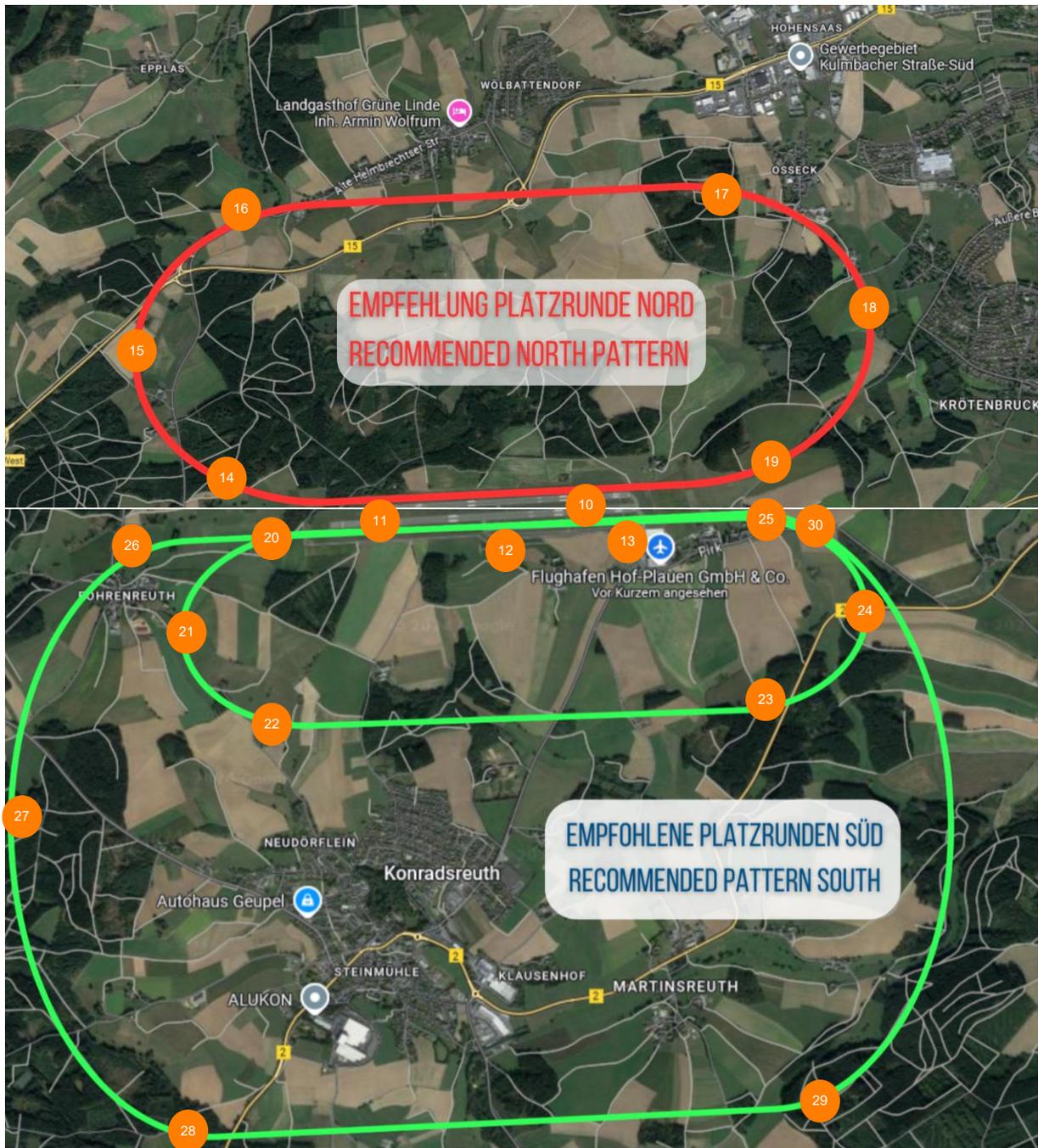


Abbildung 14: OP für den Luftverkehr, blau PVA wie geplant, Hintergrund: Google Maps Pro

In nachfolgender Tabelle sind die angenommenen Höhen über dem Gelände zusammengefasst:

OP	Höhe über dem Gelände in m
10,11,12,13	3
14,19,20,25,30	85
15,18,21,24,26	130
16,17,22,23	200
27	350
28,29	400

Tendenziell erfahren höher gelegene Punkte mehr Blendung als niedriger gelegene OP.

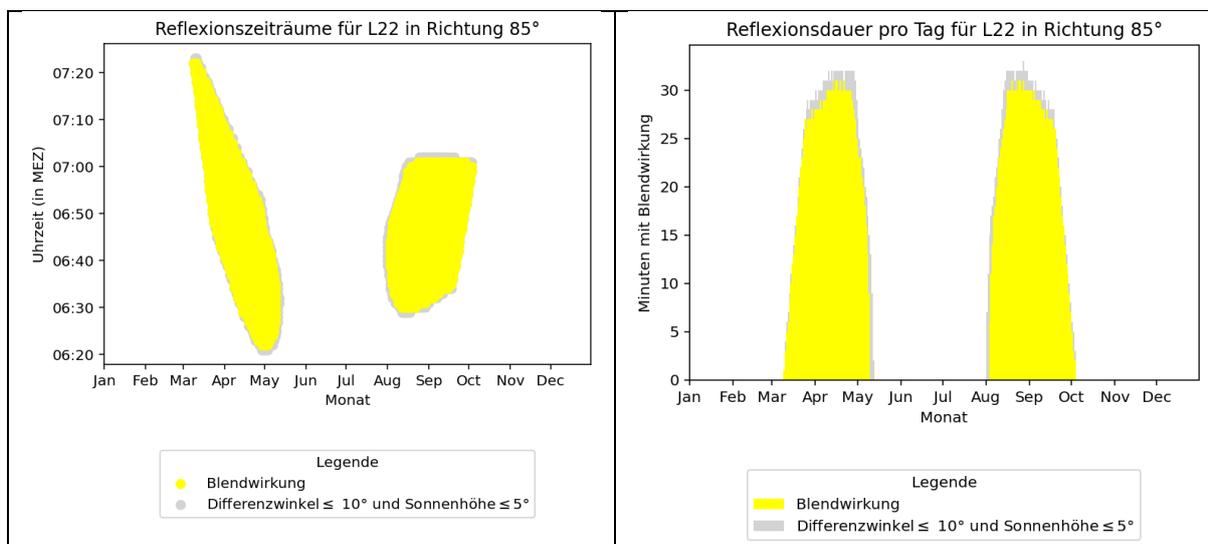
Für große Flugzeuge wurden An- bzw. Abflugsrampen in Richtung des Rollfeldes mit 3° Steigung modelliert.

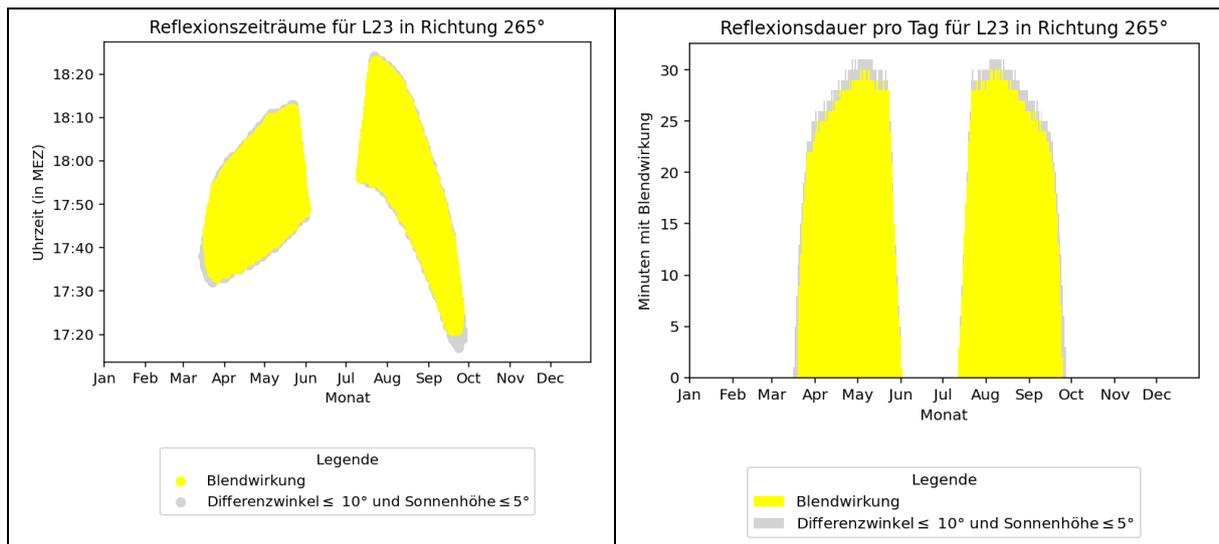
7.4 Ergebnisse

Für die verschiedenen OP wurden die Blendsituationen ausgelöst durch die PVA analysiert.

Alle Blendungszeiträume mit einer Intensität von unter $20000\text{cd/m}^2=20\text{kcd/m}^2$ wurden vor der Bewertung herausgefiltert. In den nachfolgenden Diagrammen sind die Blendzeiten und – dauern über der Jahreszeit dargestellt. Diese gelten für das zentrale Sichtfeld +/-25° und 30° Sicht nach unten.

Ergebnisdiagramme 2: Reflexionen zu den OP auf der Platzrunde, sofern diese innerhalb der Beeinträchtigungsgrenze wahrgenommen werden können. Beispielhaft hier die Diagramme für +/-25° Sichtfeld zur Flugrichtung unter einem maximalen Sichtwinkel nach unten von 30°.





Die Ergebnisse der Bewertungen sind in nachfolgender Tabelle entsprechend den Erläuterungen in Tabelle 8 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 8: Ergebnisszusammenfassung der Blendwirkung auf den Flugverkehr

OP	Blendwirkung innerhalb der Grenzen +/-50° horizontal, +/-30° einvertikal	Blendwirkung innerhalb der Grenzen +/-25° horizontal, +/-30° vertikal	Blendwirkung bei Blick in die Platzrunde (>+/-25° horizontal), +/-30° vertikal	Blendung bei Blick Richtung Rollfeld	Blendung bei Geradeausflug +/-10°, vertikal +/-10°	Anteil am Blickfeld +/-50° horizontal, +/-30° vertikale	GesamtbewertungGes
	Bei direktem Anflug des Rollfelds wichtig		Im Gegen- und Queranflug wichtig		In allen Situation wichtig		
L10	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L11	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L12	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L13	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L14	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L15	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L16	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L17	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L18	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L19	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L20	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L21	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L22	2926 Minuten 21 kcd/m ²	2926 Minuten 21 kcd/m	-	-	-	-	unkritisch
L23	4969 Minuten 25 kcd/m ²	3623 Minuten 25 kcd/m ²	-	1346 Minuten 74 kcd/m	-	<3% mäßig kritisch	Mäßig kritisch
L24	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L25	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L26	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L27	-	-	-	1319 Minuten 163 kcd/m ²	-	<1% un-kritisch	unkritisch
L28	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L29	-	-	-	-	-	-	unkritisch
L30	-	-	-	-	-	-	unkritisch

Grau: Blendung tritt im Gegenanflug auf und ist so für den direkten Landeanflug nicht relevant

Hier wird deutlich, dass es entsprechend der dargestellten Auswertungsmethodik nicht zu gravierenden Blenderscheinungen kommt.

Für Großflugzeuge wurden noch die üblichen An- und Abflugskorridore untersucht. Bei einer Steigung 3° ist der direkte Landeanflug blendfrei. Auf einem kurzen Stück der Strecke kommt es

- Bei Anflug aus Richtung Osten in einer Entfernung > 3000m vom Touchdown-Punkt kurzzeitig zu Blenderscheinungen. Diese liegen im Bereich green glare und sind so von der Intensität als eher gering einzustufen. Die Blendintensität beträgt maximal 28.000 cd/m²
- Bei Anflug aus Richtung Westen in einer Entfernung > 2000m kurzzeitig zu Blenderscheinungen. Die Blendintensität beträgt maximal 300.000 cd/m²
-

Der Tower bleibt frei von störenden Blendungen, ebenso Flugzeuge am Boden, sowohl auf dem Vorfeld, wie auch auf dem Rollfeld.

8 Diskussion der Ergebnisse

8.1 Gebäude

Im relevanten Umfeld (100 m Radius) der Photovoltaikanlage befinden sich keine Wohngebäude. Damit werden die LAI-Grenzwerte eingehalten .

8.2 Verkehrswege

Im Umfeld der Photovoltaikanlage wurden als relevante Verkehrswege die Kreisstraße HO 37 identifiziert und entsprechend auf Blendwirkungen untersucht.

Es treten keine erheblichen Blendwirkungen auf.

8.3 Flugverkehr

Flugverkehr ist durch die Höhe generell exponierter und somit mehr von Blendung betroffen als z.B. Straßenverkehr. Andererseits sind es Piloten gewohnt mit blendenden Flächen wie Wasseroberflächen umzugehen.

Im vorliegenden Fall fällt die Blendung sehr gering aus:

- Bei Betrachtung des Sichtanfluges über die Platzrunden kommt es im direkten Landeanflug zu keiner Blendung.
- Die Gegenanflüge sind teilweise von leichter, kurzzeitiger Blendung betroffen
- Nach der gewählten Auswertungsmethodik sind diese nicht kritisch
- Damit lässt sich schlussfolgern, dass keine signifikant negativen Auswirkungen der PVA auf den Sichtanflug ermittelt werden konnten
- Für den Anflug tendenziell größerer Flugzeuge wurde typische An- bzw. Abflugkorridore mit einer Steigung von 3° untersucht. Hier tritt nur eine kurzfristige Blendung in einer Entfernung von mehr als 2000 m auf. Danach ist der Landeanflug nicht von störenden Blendwirkungen beeinflusst.
- Der Tower ist von keiner Blendwirkung betroffen
- Das Vorfeld und Rollfeld bleibt frei von erheblicher Blendungswirkung

Damit kommt der Verfasser zum Schluss, dass auf Basis der gewählten Modellierung und Auswertemethodik der Flugverkehr durch die PVA nicht gefährdet wird.

9 Literaturverzeichnis

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

Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT



4. Assumptions and Limitations

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

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

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

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