

DGS Landesverband Berlin Brandenburg e.V.

Erich-Steinfurth-Str. 8

10243 Berlin

Phone +49 (030) 29 38 12 60

Email dgs@dgs-berlin.de

Web www.dgs-berlin.de

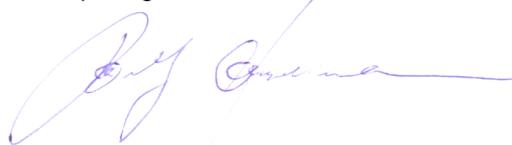
Fachgutachten zur Bewertung der Blendwirkung durch Reflexion an PV-Modulen (Blendgutachten) für den Solarpark Hübitz Nr. 3

Anlage: Solarpark Hübitz Nr. 3
51.589916°, 11.542338°
06347, Gerbstedt

in Auftrag gegeben von: Büro Knoblich GmbH Landschaftsarchitekten
Zur Mulde 25
04838 Zschepplin

Projektnummer: A-LV24/0186

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ralf Haselhuhn', written over a faint, larger version of the same signature.

Bearbeiter: M. Sc. Markus Stich

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Markus Stich', written over a faint, larger version of the same signature.

Berlin, 28.08.2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Beschreibung der Umgebung	3
3	Beschreibung der PV-Anlage.....	4
4	Grundlagen der Optik.....	5
	4.1 Geometrische Reflexionssituation.....	5
	4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen	6
	4.3 Blendung.....	8
	4.4 Bewertung der Blendwirkung.....	9
5	Methodik der Untersuchung	10
	5.1 Bewertungsbasis	10
	5.2 Simulationstool und Modellierung	11
	5.3 Simulationsausgabe und -bewertung.....	12
6	Simulation.....	13
	6.1 PV-Anlage.....	13
	6.2 Immissionsorte.....	14
7	Ergebnisse	16
	7.1 B180	17
	7.2 Gewerbegebiet	19
	7.3 Apfelborn	20
8	Zusammenfassung.....	22
9	Literaturverzeichnis	23
10	Abbildungsverzeichnis.....	25
11	Gewährleistung	26

1 Einleitung

Im folgenden Gutachten wird die durch Reflexion direkter Sonneneinstrahlung verursachte Lichtemission der geplanten PV-Anlage (PVA) Hübitz Nr. 3 und die damit einhergehende potenzielle Beeinträchtigung der Umgebung untersucht und nach den *Hinweisen zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen* (kurz: LAI) der *Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz* bewertet. Es werden Zeitraum und Immissionswinkel potenzieller Blendung ermittelt und bei Bedarf Blendschutzmaßnahmen erarbeitet, um eine solche zu verhindern.

2 Beschreibung der Umgebung

Die geplante PVA liegt südwestlich des Ortsteils Hübitz zugehörig zur Stadt Gerbstedt im Landkreis Mansfeld-Südharz in Sachsen-Anhalt. Südlich des Solarparks liegt die B180, östlich die L72, sowie ein Gewerbegebiet mit der einmündenden Straße Apfelborn. Im Westen verläuft die Bahntrasse Zirkelschacht – Thondorf. Die PVA ist auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen geplant. Das Gelände ist eben. Eine Übersicht über die nähere Umgebung der PV-Anlage wird in Abbildung 1 gegeben. Es gab keinen Ortstermin.



Abbildung 1: Modulflächen der geplanten PVA in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth)

3 Beschreibung der PV-Anlage

Die PVA ist auf einer Fläche von ca. 11,6 ha geplant. Vorgesehen ist eine Süd-Ausrichtung mit 177° Azimut¹ und einem Neigungswinkel von 15° . Der Belegungsplan ist in Abbildung 2 dargestellt. Als Unterkonstruktion kommt ein 2-Pfeiler-System zum Einsatz mit drei im Hochformat (portrait) ausgerichteten Modulen über die Tischbreite. Die Modulunterkante ist auf 0,8 m Höhe und die Moduloberkante auf 2,579 m geplant. Die Unterkonstruktion ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 2: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)

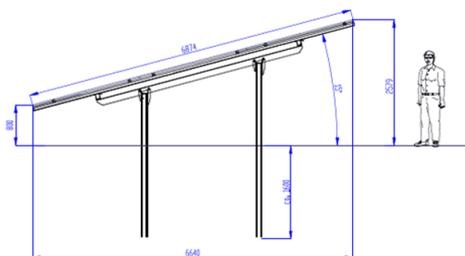


Abbildung 3: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)

¹ Abweichung von Planungsunterlagen ist auf UTM-Koordinatensystem zurückzuführen

4 Grundlagen der Optik

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Berechnung der Reflexion erläutert.

4.1 Geometrische Reflexionssituation

Nach dem Reflexionsgesetz ist der Winkel des einfallenden Lichtstrahls bezogen auf die Flächennormale (Senkrechte, Lot zur Fläche) gleich dem Winkel des reflektierten Strahls zur Normalen ($\alpha = \beta$).

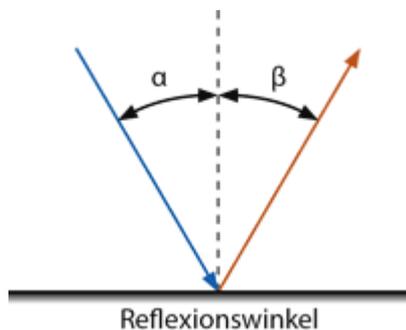


Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls

Das Reflexionsgesetz gilt grundsätzlich bei der Reflexion von Lichtstrahlen unabhängig davon, ob es sich bei der reflektierenden Fläche um eine ebene oder raue Oberfläche handelt. Im Fall einer rauen Oberfläche ändert sich jedoch der Einfallswinkel mit dem konkreten Einfallsort, sodass es zu einer Aufweitung des reflektierten Strahls kommt. Generell gilt, je rauer die Oberfläche, desto diffuser die Reflexion. In Abbildung 5 ist in a) die ideal gerichtete Reflexion an einer völlig glatten Oberfläche, in b) eine reale auftretende Streuung an einer unebenen Oberfläche und in c) eine ideal gestreute Reflexion nach dem Lambertschen Gesetz zu sehen.

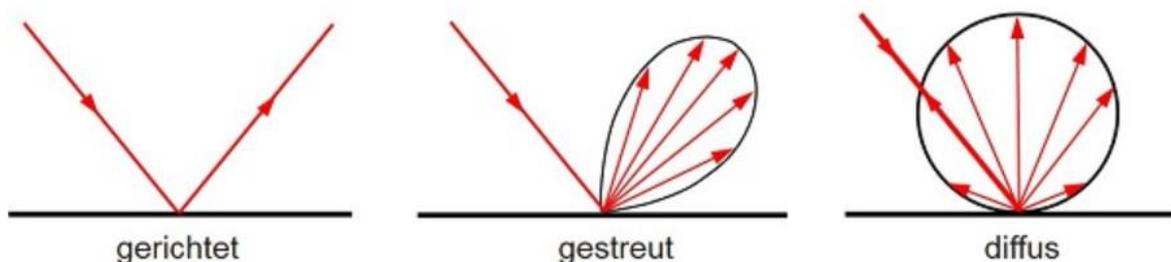


Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1]

Bei realer Reflexion kommt es zudem zu sogenannter Bündelaufweitung, einer Streuung um den idealen Reflexionswinkel. Mit steigendem Differenzwinkel zwischen idealem Reflexionswinkel und Streuwinkel nimmt die Intensität der reflektierten Strahlung stark ab. Hier wird, wenn von einer Bündelaufweitung gesprochen wird, das Bogenmaß (oder der Winkel) der Standardabweichung um die Intensität der realen Reflexion verwendet (s. Abbildung 6).

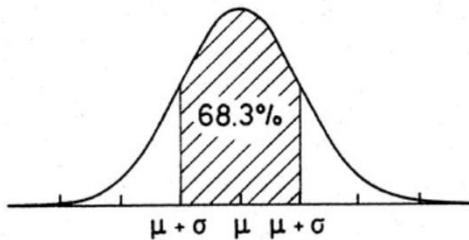


Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen

Entscheidend für die Reflexionseigenschaften eines PV-Moduls ist die Oberflächenstruktur des Glases. In Abbildung 7 sind Messungen der Oberflächenstruktur und Bilder der auftretenden Reflexion für drei unterschiedlich stark texturierte Frontgläser zu sehen.

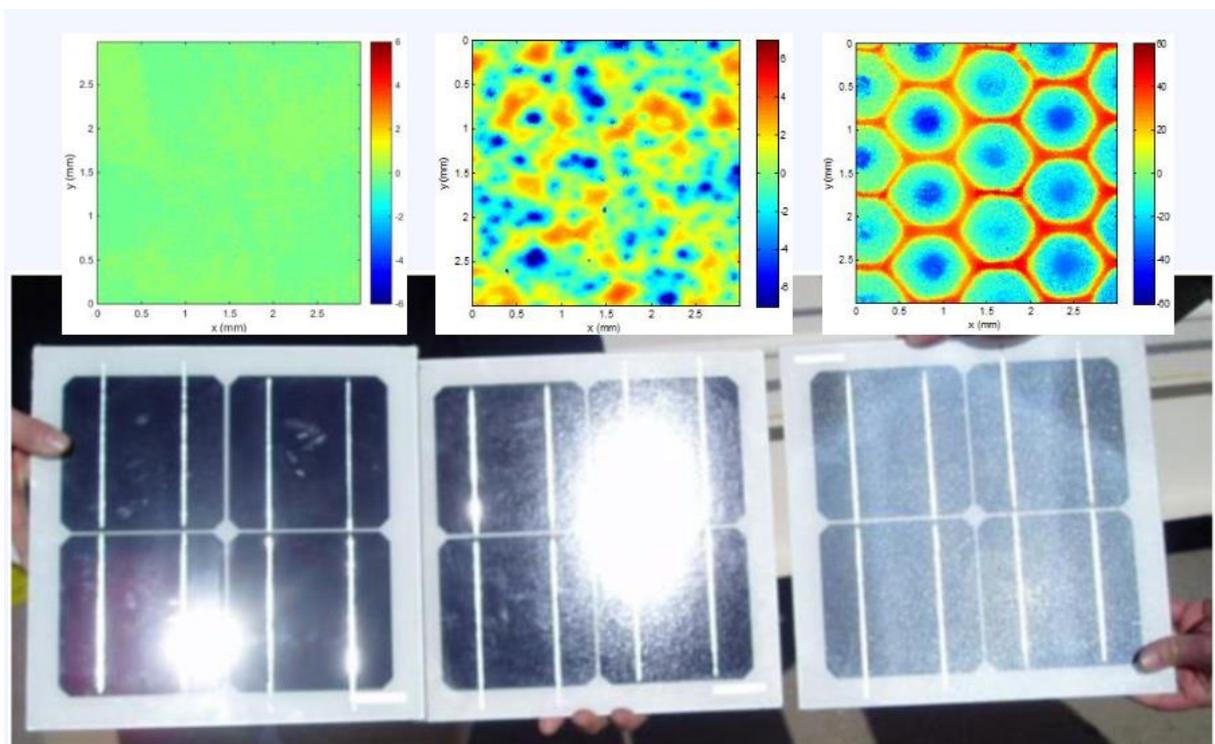


Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [2]

In der Messdatenanalyse wurde für Floatglas eine Strahlweite von 20 mrad ($1,15^\circ$), für leicht- bis mittelstark texturiertes Glas eine Aufweitung von 92-184 mrad ($5,27-10,56^\circ$) und für tiefstrukturiertes Glas 1000 mrad (57°) gemessen [2]. Während leicht bis mittelstark strukturiertes Glas bereits als Standardprodukt vertrieben wird, handelt es sich bei tiefstrukturiertem Glas noch nicht um Massenware, da die Herstellung mit erheblichen Mehrkosten einhergeht. Alternativ ist jedoch auch das Aufbringen geeigneter Folien oder das Verwenden von satiniertem Glas eine Möglichkeit, um beinahe vollständig blendfreie Module herzustellen, siehe Abbildung 8.

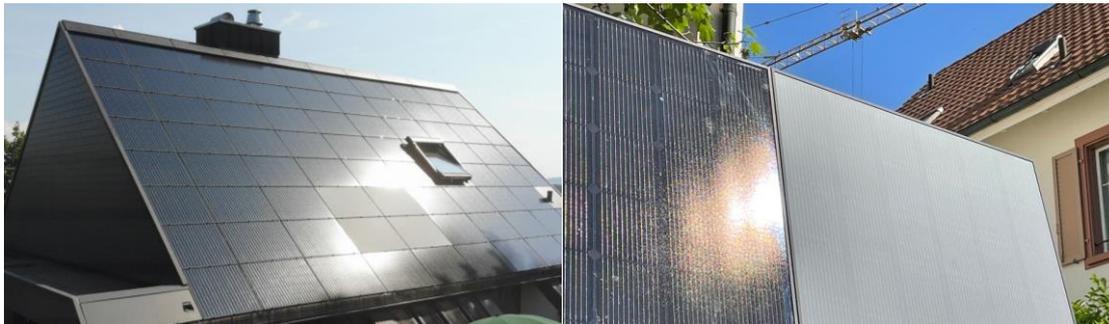


Abbildung 8: links: Module mit satinierter Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]

Solarmodule sind so konzipiert, dass sie einen möglichst hohen Anteil des Sonnenlichtes nutzen, das Frontglas also einen möglichst hohen Transmissionsgrad und möglichst niedrigen Reflexionsgrad aufweist. Die Transmission von Solargläsern liegt typischerweise bei rund 96% bei senkrechter Einstrahlung, sodass die Reflexionsverluste etwa 4% betragen. Mit Verwendung von Anti-Reflexions-Beschichtungen sind auch Reflexionsgrade von nur 2% möglich. Mit höheren Einfallswinkeln steigt der Reflexionsgrad jedoch bei beinahe allen Modultypen stark an, wie in Abbildung 9 zu sehen ist. Ausnahmen sind hier nur tief texturierte Module.

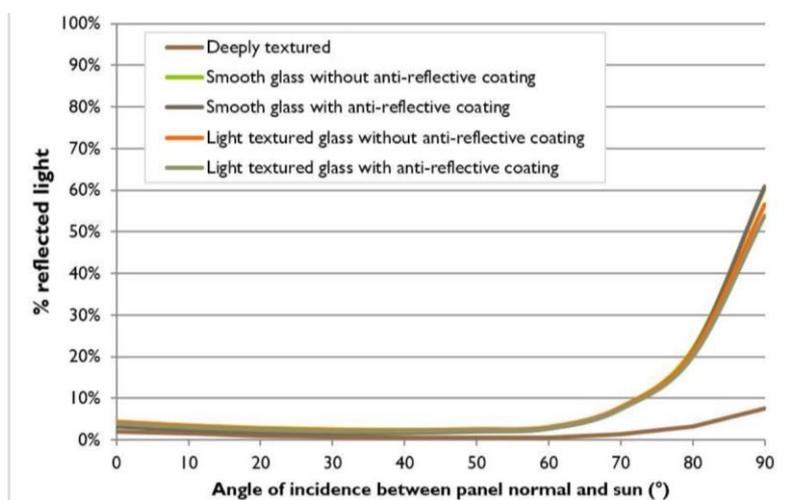


Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]

4.3 Blendung

Blendung bezeichnet einen Sehzustand, der als unangenehm empfunden wird oder die Sehleistung beeinträchtigt. Blendung tritt aufgrund einer zu hohen absoluten Leuchtdichte oder zu großer Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld auf und hängt immer vom Adaptionszustand des Auges ab. Das Anpassungsvermögen an die Umgebungshelligkeit endet bei einer Helligkeit im Bereich zwischen 10^4 - 10^5 cd/m². Bei höherer Umgebungshelligkeit können die Sinneszellen bzw. die Iris nicht weiter adaptieren, was dann als Absolutblendung bezeichnet wird. Es setzen dann in der Regel Schmerzen ein und es folgen in der Regel andere Schutzfunktionen wie das Zusammenkneifen der Augen oder das Abwenden von der Lichtquelle [5].

Die Netzhaut weist unterschiedliche Lichtempfindlichkeiten auf, welche in etwa mit der Zahl der Nervenzellen korrelieren. Für das Sehen bei Tageslicht (photopisches Sehen) sind die Zapfen relevant. Wichtig für die Adaptionshelligkeit des Auges ist daher der Lichteinfall auf die Makula (gelber Fleck) mit einem Durchmesser von 1,5 mm und besonders auf die Fovea centralis (Sehgrube) mit einem Durchmesser von 0,5 mm, die im zentralen Bereich der Netzhaut rund um die Sehachse liegt. Die Adaptionshelligkeit des Auges wird daher maßgeblich durch die Helligkeit des zentralen Blickfelds bestimmt. Es kommt jedoch bei jeglichem Lichteinfall zur Streuung des Lichts an den Strukturen des Auges (Hornhaut, Pupille, Glaskörper), was dazu führt, dass auch Licht außerhalb des zentralen Sichtfelds auf die Makula trifft. Dieser Lichteinfall führt zur sogenannten Schleierleuchtdichte, welche, je nach Intensität, zu einer Anhebung der Adaptionsleuchtdichte führt. Diese resultierende Schleierleuchtdichte ist umso höher, je näher eine Blendquelle an der zentralen Blickrichtung liegt. Bei hohen Leuchtdichten kann es demnach auch bei Blick in Nähe der Blendquelle zu einer Absolutblendung kommen. Bei größeren Differenzwinkel kommt es dagegen in der Regel eher zu einer Relativblendung, bei welcher die eigentliche Sehaufgabe schwieriger zu erfüllen wird. Die Erhöhung der adaptiven Helligkeit durch eine Blendquelle führt dazu, dass das Auge nicht mehr richtig an die eigentliche Sehaufgabe angepasst ist. Hierdurch erhöht sich auch die minimale Helligkeit, die ein Objekt haben muss, um gut erkennbar zu sein und die Kontrastwahrnehmung dunkler Objekte verschlechtert sich.

Ein weiterer Mechanismus, durch welchen es zu Blendung kommen kann, folgt aus der zeitlichen Sensitivität der Sinneszellen. Ändert sich die Umgebungshelligkeit sprunghaft, so kann es zur sogenannten Adaptationsblendung kommen. Diese folgt aus der notwendigen Adaptionsdauer der Sinneszellen an das neue Helligkeitsniveau. Es wird hier von Helladaption bei einer Anpassung an eine hellere Umgebung und Dunkeladaption bei Anpassung an eine dunklere Umgebung gesprochen. Die Helladaption erfolgt in zwei Phasen, wobei nach spätestens 0,5 s eine gute Anpassung und nach ca. 6 Minuten die maximale Kontrastwahrnehmung erreicht wird. Die Dunkeladaption dauert deutlich länger, die Sensitivität der Zapfen regeneriert sich nach Einwirkung einer hohen Lichtintensität erst innerhalb weniger Minuten, wobei in der Regel bei ca. 10 Minuten das Ausgangsniveau erreicht wird. In diesem Zeitraum ist die Empfindlichkeit an der betroffenen Stelle der Netzhaut bzw. des Sichtfeldes verringert,

typisch ist auch die Wahrnehmung dunkler Flecken an betroffenen Stellen (Nachbilder). Entscheidend für die Stärke dieses Effekts ist neben der Intensität auch die Dauer der Exposition, sodass der sehr kurze Blick in eine Blendquelle in der Regel auch zu keinem Nachbild führt [5].

4.4 Bewertung der Blendwirkung

In der Literatur werden je nach Anwendungsbereich verschiedene Berechnungsmethoden vorgeschlagen. Die psychologische Blendwirkung beschreibt die subjektive Empfindung und wird international als *discomfort glare* bezeichnet. Maßgeblich ist hier die subjektive Empfindung der Person hinsichtlich der Lichtverhältnisse. In der Bewertung hat sich jedoch bisher kein einheitlicher Standard etablieren können, es werden je nach Situation unterschiedliche Berechnungsansätze und Skalen vorgeschlagen.

Davon abgegrenzt besteht hinsichtlich der physiologischen Blendwirkung (*disability glare*), welche die messbare Auswirkung einer Blendung, also die Verringerung der Sehfunktionen beschreibt, ein weitreichender Konsens. Der Blendungsgrad, der als Quotient der Kontrastempfindlichkeit ohne Blendung und mit Blendung definiert ist, kann als Maß für die Bewertung dienen. Dieser wird als die resultierende relative Anhebung K_{rel} der Kontrastschwelle ausgedrückt. Um eine signifikante physiologische Blendung zu verursachen, muss der Wert der relativen Erhöhung durch eine Blendlichtquelle etwa den Wert von 2 überschreiten [5].

$$K_{rel} = \frac{L_U + L_V}{L_U}$$

Hierin stellt L_U die Adaptionshelligkeit der potenziell geblendeten Person dar und L_V die durch die Blendquelle(n) verursachte äquivalente Schleierleuchtdichte.

Für die Berechnung der Schleierleuchtdichte L_V gibt die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) eine Methodik vor [6], mit welcher auch Einflüsse wie Alter und Augenfarbe beachtet werden und welche in diesem Gutachten für den worst-case angewandt wird.

Weiter wird für die Berechnung die Umgebungs- bzw. Adaptionshelligkeit L_U der potenziell geblendeten Person benötigt. Eine genaue Modellierung erweist sich hier als äußerst komplex und kann nur unter Vermessung bzw. Einbezug der gesamten Umgebung erfolgen. Es wird daher ein vereinfachtes Verfahren angewandt, welches sich an der Helligkeit des Himmels orientiert. Für einen freien Himmel und einen frei einzusehenden Horizont werden als beste Näherung für die Adaptionshelligkeit die Helligkeit des Himmels in Blickrichtung gemäß der CIE [7] und die Umgebungsleuchtdichte auf Basis der horizontalen Beleuchtungsstärke gemäß Sonnenstand bei einer Albedo von 0,2 gemittelt.

Für schutzwürdige Immissionsorte ist eine Bewertung gemäß der psychologischen Blendwirkung relevant, für Verkehrssituationen dagegen die Bewertung gemäß der physiologischen Blendwirkung.

5 Methodik der Untersuchung

5.1 Bewertungsbasis

Um die betroffenen örtlich aufgelösten Bereiche bestimmen zu können und eine quantitative Aussage über die Reflexionsimmissionen zu treffen, wird ein Simulationstool verwendet. Dieses soll minutengenau darstellen, ob und zu welchem Zeitpunkt schutzwürdige Räume einer potenziellen Blendung ausgesetzt sind. Schutzwürdige Räume sind laut LAI-Hinweisen:

- 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 [8]

Ist einer dieser Räume von Blendung betroffen, wird überprüft, ob es zu einer erheblichen Belästigung im Sinne der LAI-Hinweise kommt. Derzeit gibt es dafür in Deutschland keine gesetzlichen Regelungen, bzw. Grenzwerte. Allerdings leiten die LAI - Hinweise Bewertungsgrößen aus einem Hinweispapier für Windenergieanlagen [9] ab. Die LAI-Hinweise definieren diese Bewertungsgrößen wie folgt:

*„[Gegenwärtig wird davon ausgegangen, dass...] eine erhebliche Belästigung im Sinne des BImSchG durch die maximal mögliche astronomische Blenddauer unter Berücksichtigung aller umliegenden Photovoltaikanlagen vorliegt, wenn diese **mindestens 30 Minuten am Tag oder 30 Stunden pro Kalenderjahr** beträgt.“ [8]*

Liegt die Blenddauer unterhalb dieser Grenzwerte wird die Blendung als allgemein hinnehmbar bewertet. Auch der Österreichische Verband für Elektrotechnik veröffentlichte im November 2016 eine Richtlinie mit identischen Richtwerten für die Ermittlung von durch Blendung verursachte Belästigung [10]. Zusätzlich zu den schutzwürdigen Räumen muss überprüft werden, ob die auftretende Blendung die Sicherheit von folgenden Bereichen gefährdet:

- Straßenverkehr
- Schienenverkehr
- Schifffahrtsverkehr
- Flugverkehr

Tritt in einem dieser Arbeitsbereiche Blendung auf, kann selbst eine kurzzeitige Blendung schwerwiegend Folgen haben. Es sollte deshalb beim Auftreten von Blendung im Verkehrsbereich mit der Behörde und den Beteiligten eine Risikoanalyse zur Gefährdungsbeurteilung vorgenommen werden, um ggf. Blendschutzmaßnahmen vorzunehmen.

5.2 Simulationstool und Modellierung

Als Simulationstool zur Bestimmung der auftretenden Blendung wird das Programm *ForgeSolar* der Firma Sims Industries, LLC verwendet. Dieses basiert auf dem wissenschaftlichen Modell „Solar Glare Hazard Analysis Tool“, welches durch die Sandia National Laboratories, New Mexico entwickelt wurde. Dieses wurde 2013 in den USA von staatlicher Seite anerkannt und bis 2021 war eine Analyse mit diesem Tool verpflichtend für PV-Flächen in Flughafenumgebung [11].

Das Tool berechnet aus den lokalen Sonnenständen die Einfallswinkel auf die Module, bzw. Modulreihen. Hierzu werden auf einer Karte die Modulflächen markiert und Neigungswinkel und Azimut der Ausrichtung eingestellt. Mit den Höhendaten des Geländes wird hieraus eine einheitliche Fläche approximiert. Es lassen sich verschiedene Modultypen mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften auswählen, welche im Wesentlichen darüber entscheiden, wie stark das reflektierte Licht gestreut wird. Die Simulation wertet nur als relevant markierte Beobachtungspunkte und Strecken aus. Die Auflösung der Simulation ist minütlich und erfolgt für ein Kalenderjahr. Bei der Simulation werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Blendwirkung wird unabhängig vom Bedeckungsgrad des Himmels berechnet. Somit ergeben sich die astronomisch maximalen Blendzeiträume. Das entspricht einer „worst case“ Betrachtung der Blendsituation. Das Vernachlässigen der Wetterverhältnisse empfiehlt auch das Ministerium für Umwelt [8] und die TU Ilmenau [12].
- Zur Bewertung des Straßenverkehrs wird nur die Blendung im Bereich des Blickwinkels von $\pm 30^\circ$ berücksichtigt, ausgehend von der jeweiligen Fahrtrichtung. Zur Bewertung des Bahnverkehrs wird die Blendung im Bereich des Blickwinkels von $\pm 20^\circ$ berücksichtigt. Zudem werden Blendungen nicht betrachtet, welche aus der gleichen Richtung wie die direkte Sonnenstrahlung kommen. Somit muss die Differenz der Richtungsvektoren von Reflexionsstrahl und Sonneneinstrahlung weniger als 10° betragen. Dies wird begründet dadurch, dass die Sonne, die eine höhere Lichtintensität aufweist als die Reflexion, als Hauptblendquelle wahrgenommen wird und die Reflexion in diesen Fällen keine zusätzliche Blendungsquelle darstellt [10].
- Der Immissionsort im Straßenverkehr wird in der Regel auf eine Höhe von 3 m festgelegt, was in etwa der Sichthöhe von Lastkraftwagen entspricht. Grund hierfür ist, dass in der Regel höhere Beobachtungspositionen auch einer stärkeren Blendung ausgesetzt sind. In Situationen, in denen das nicht zutrifft, weil eine Blendung von oben stattfindet, wird die Sichthöhe stattdessen auf 1,5 m über dem Boden festgelegt, um in diesem Fall einen PKW abzubilden. Der Immissionsort von Bahntrassen wird typischerweise auf 3 m über dem Boden festgelegt.

Für weitere Informationen wird an dieser Stelle auf die Webseite von *ForgeSolar* verwiesen [13].

5.3 Simulationsausgabe und -bewertung

Die Simulation wertet jede PV-Fläche und jeden Beobachtungspunkt bzw. Strecke einzeln aus. Es werden dabei folgende Werte für jede Minute, jeweils für die betreffende Position berechnet:

- Die Einstrahlungsstärke der Sonne in Abhängigkeit der Uhrzeit [W/m²]
- Der berechnete Reflexionsgrad des PV-Fläche [-]
- Alle Strahlungsvektoren
- Der Raumwinkel des blendenden Bereichs der PV-Fläche aus Sicht des Beobachters [rad]
- Die Bestrahlungsstärke der Reflexion auf der Netzhaut [W/cm²]
- Die Einstufung des Blendpotenzials auf Basis der Bestrahlungsstärke und der Größe der Blendquelle [grün/gelb/rot]
- Leuchtdichte der Blendung [cd/m²]

Das Blendpotenzial wird gemäß Abbildung 10 in drei Bereiche unterteilt. Im grünen Bereich ist davon auszugehen, dass keine Beeinträchtigung der Sicht stattfindet, im gelben Bereich kann es dagegen zu Sichteinschränkungen kommen und im roten Bereich sogar zu dauerhaften Verbrennungen der Netzhaut. Je größer die Blendquelle (angegeben als Sichtwinkel in Milli-rad), desto größer ist auch deren Blendpotenzial.

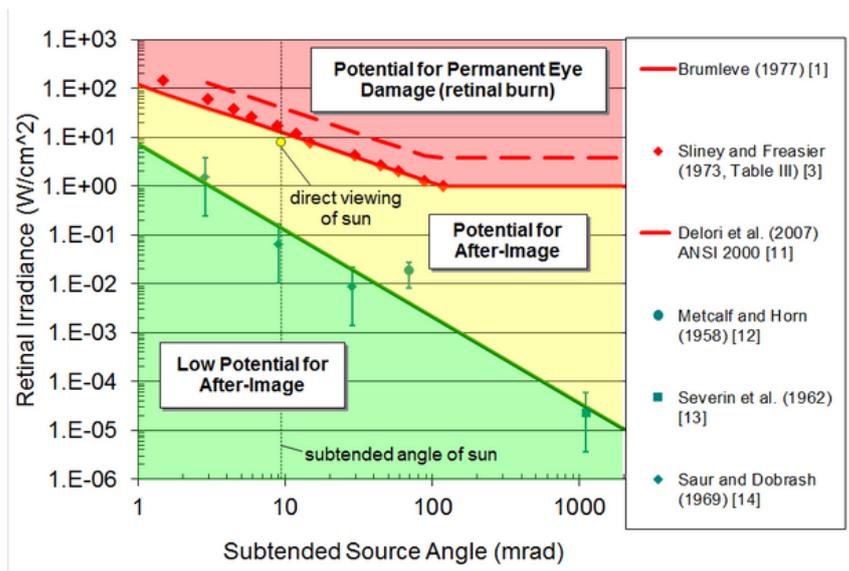


Abbildung 10: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [13]

6 Simulation

Dieses Kapitel stellt die Simulationsparameter dar. Es werden die Eingabedaten und Simulationsparameter für die PV-Flächen und die zu untersuchenden Immissionsorte aufgeführt. In Abbildung 11 ist eine Übersicht über die angelegte Simulation dargestellt.



Abbildung 11: Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar

6.1 PV-Anlage

Für die Simulation werden die Eingabedaten der PV-Anlage mit den Koordinaten und der Höhe über Normalhöhennull ermittelt. Die Nachstellung im Simulationsprogramm basiert auf den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Planungsunterlagen, sowie Satellitendaten. Die PV-Flächen werden mit 177° Azimut und 15° Neigungswinkel simuliert. Die mittlere Modulhöhe ergibt sich zu 1,7 m. Die genauen Koordinaten der Eckpunkte der PV-Flächen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Koordinaten der PV-Flächen

PV-Fläche	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Modulhöhe [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
PV1	1	51,58857	11,54409	240,6	1,7	242,3
	2	51,58884	11,5444	239,9	1,7	241,6
	3	51,58961	11,54424	237,9	1,7	239,6
	4	51,5904	11,54409	236	1,7	237,7
	5	51,59129	11,54392	233,2	1,7	234,9
	6	51,59206	11,54381	228,7	1,7	230,4
	7	51,59277	11,54369	227,3	1,7	229
	8	51,59276	11,54344	227,3	1,7	229
	9	51,59249	11,54265	228	1,7	229,7
	10	51,5919	11,54189	229	1,7	230,7
	11	51,59131	11,54113	230,7	1,7	232,4
	12	51,5906	11,54035	232,6	1,7	234,3
	13	51,59004	11,53992	233,9	1,7	235,6
	14	51,58907	11,53964	235,6	1,7	237,3
	15	51,58809	11,53934	238,4	1,7	240,1
	16	51,588	11,53936	238,7	1,7	240,4
	17	51,58805	11,54035	240	1,7	241,7
	18	51,58826	11,54198	240,9	1,7	242,6
	19	51,58847	11,54363	240,8	1,7	242,5

Für die optischen Eigenschaften der Moduloberfläche ist ein glattes Glas mit einer Rauigkeit (auf Englisch: slope error) von 6,55 mrad ausgewählt worden. Dies ist hinsichtlich der resultierenden Leuchtdichte als worst-case Szenario anzusehen, da die meisten handelsüblichen Module leicht texturiert sind und eine Antireflexionsbeschichtung aufweisen.

6.2 Immissionsorte

Als relevante Immissionsorte werden die angrenzenden Straßen, die Bahntrasse und das Gewerbegebiet untersucht. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers, sowie Satellitenbilder vom Oktober 2022. Die Untersuchungshöhe für den Straßen und Schienenverkehr wird auf 3 m (worst case) über der Strecke festgelegt. Für die Straßen wird ein relevanter Sichtwinkel von +/- 30° zur Fahrtrichtung untersucht, für die Bahnstrecke ein relevanter Sichtwinkel von +/- 20° zur Fahrtrichtung. Im Gewerbegebiet befindet sich gemäß Vor-Ort-Aufnahmen von Google Street View lediglich ein Immissionsort mit Fensterfassade im 1. OG (angenommene Höhe 4,7 m), die Bereiche der anderen Betriebe weisen keine von der Modulfläche einzusehenden schutzwürdigen Orte gemäß der LAI-Hinweise auf, werden jedoch pauschal mit einer Höhe von 3 m in die Simulation mitaufgenommen.

Die exakten Koordinaten, die Höhe ü. NN, die für die Simulation angenommene Untersuchungshöhe und die daraus resultierende Gesamthöhe sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Koordinaten der zu untersuchenden Immissionsorte

Immissionsort	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Betrachtungshöhe [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
B180	1	51,58535	11,52162	250	3	253
	2	51,58504	11,52468	248,3	3	251,3
	3	51,58478	11,52761	247,1	3	250,1
	4	51,58471	11,52905	244,9	3	247,9
	5	51,58476	11,53079	244	3	247
	6	51,585	11,53308	242,3	3	245,3
	7	51,58514	11,53486	241,8	3	244,8
	8	51,58516	11,5361	241,8	3	244,8
	9	51,58506	11,53739	240,8	3	243,8
	10	51,58477	11,53905	239,4	3	242,4
	11	51,5843	11,54066	239,6	3	242,6
	12	51,58365	11,54208	238,9	3	241,9
	13	51,58286	11,54331	237,5	3	240,5
L72	1	51,58481	11,54505	241,1	3	244,1
	2	51,58718	11,54507	241,5	3	244,5
	3	51,58763	11,545	241,7	3	244,7
	4	51,59278	11,54395	227,5	3	230,5
	5	51,59329	11,54393	227,2	3	230,2
	6	51,59468	11,54404	228,6	3	231,6
Apfelborn	1	51,58881	11,54484	239,9	3	242,9
	2	51,58887	11,54531	239,5	3	242,5
	3	51,58947	11,54656	238	3	241
Bahnstrecke	1	51,5853	11,53703	241,5	3	244,5
	2	51,58552	11,53725	241,3	3	244,3
	3	51,58576	11,53739	241,1	3	244,1
	4	51,58607	11,53747	241	3	244
	5	51,58633	11,53742	240,7	3	243,7
	6	51,58779	11,53695	240,2	3	243,2
	7	51,58925	11,53648	239,5	3	242,5
	8	51,59072	11,536	237,5	3	240,5
	9	51,59219	11,53553	236,2	3	239,2
	10	51,59363	11,53507	236,6	3	239,6
	11	51,59509	11,5346	236,5	3	239,5
	12	51,59656	11,53413	235,4	3	238,4
	13	51,59804	11,53365	234	3	237
Fensterfassade Gewerbegebiet	OP1	51,58965	11,54566	238,1	4,7	242,8
Gewerbegebiet	OP2	51,59039	11,54527	235,9	3	238,9
	OP3	51,59153	11,5452	233,8	3	236,8
	OP4	51,59212	11,54506	232,1	3	235,1

7 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Simulation bezüglich der potenziell auftretenden solaren Blendungen durch Reflexionen dargestellt. Die Simulationsergebnisse werden aufgrund der technischen Limitierung der Simulationssoftware einer weiteren Korrektur unterzogen. So ist gemäß LAI-Hinweisen keine Blendung gegeben, wenn die Richtung des Vektors der Lichtreflexion und die des Vektors der Sonnenstrahlung weniger als 10° auseinander liegen. Das bedeutet, dass die Sonne aus nahezu der gleichen Richtung scheint wie die Reflexion der Sonne an den PV-Modulen. Somit wird die Sonne, die eine höhere Lichtintensität aufweist als die Reflexion, als Hauptblendquelle wahrgenommen. Die Reflexion wird sozusagen von der Sonne überstrahlt und erscheint nicht als zusätzliche Blendung. Auch Sichtunterbrechungen werden durch die Simulation nicht ermittelt und müssen nachträglich herausgefiltert werden. Die genaue Vorgehensweise hierbei wird in den folgenden Abschnitten erläutert. In Tabelle 3 sind die Werte nach genannten Korrekturen aufgeführt. Werte, welche den LAI-Grenzwert von 30 Stunden/Jahr bzw. 30 Minuten/Tag überschreiten und einen schutzbedürftigen Ort betreffen oder eine kritische Blendung im Verkehr betreffen, sind in Rot dargestellt. Die so simulierte Blenddauer stellt das Höchstmaß potenzieller Blendung dar, welche ohne Bewölkung auftritt.

Tabelle 3: Simulationsergebnisse mit Filterung: gesamte potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer über ein Jahr in Stunden	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten
B180	23,5	15
L72	0	0
Apfelborn	0	0
Bahnstrecke	0,0	0,0
OP1	42,4	18
OP2	35,5	16
OP3	46	19
OP4	48,5	20

Für die L72 und die Bahnstrecke treten gemäß der durchgeführten Simulation keine Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer auf.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Simulation detailliert dargestellt.

7.1 B180

Die Ergebnisse der Simulation für die B180 sind in Abbildung 12 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 21.04. bis zum 20.08. von 6:24 Uhr bis 7:05 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 63° - 77° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 15 Minuten erreicht. Der betroffene Streckenabschnitt und die möglichen Immissionswinkel sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Reflexionen treten in einem Abstand von über 800 m Entfernung zum Modulfeld und in einem Differenzwinkel von wenigstens 16° zur Fahrtrichtung auf.

Es ist daher für die Verkehrsteilnehmer bei der der Ausführung Ihrer Sehaufgabe von keiner relevanten Blendwirkung durch diese Reflexionen auszugehen, dies wird nachfolgend gemäß der in Kapitel 4.4 beschriebenen Methodik begründet.

Eine Abschätzung der Blendwirkung durch die auftretenden Reflexionen wird hinsichtlich der verursachten relativen Anhebung der Kontrastschwelle K_{rel} gegeben. Es berechnet sich hier für K_{rel} für die Verkehrsteilnehmer bei Blick in Fahrtrichtung ein Maximalwert von 1,05. Bei Werten unterhalb von 2 ist von keiner relevanten physiologischen Blendwirkung auszugehen [5]. Der berechnete Wert liegt weit von diesem Grenzwert entfernt, es tritt demnach durch die Reflexionen bei Ausführung der Fahraufgabe **keine relevante physiologische Blendwirkung** auf. Die Reflexion stellen damit **kein Gefährdungspotenzial für die Verkehrssicherheit** dar. Die Annahmen und Zwischenergebnisse der Berechnungen hierzu sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Sollte die zuständige Behörde dennoch den vollständigen Ausschluss aller Reflexionen im relevanten Sichtfeld für erforderlich halten, so wäre an der Südgrenze des Modulfelds eine Sichtunterbrechung mit einer Höhe von ca. 3 m erforderlich. Eine solche Maßnahme ist aus Sicht des Gutachters jedoch weder notwendig noch verhältnismäßig.

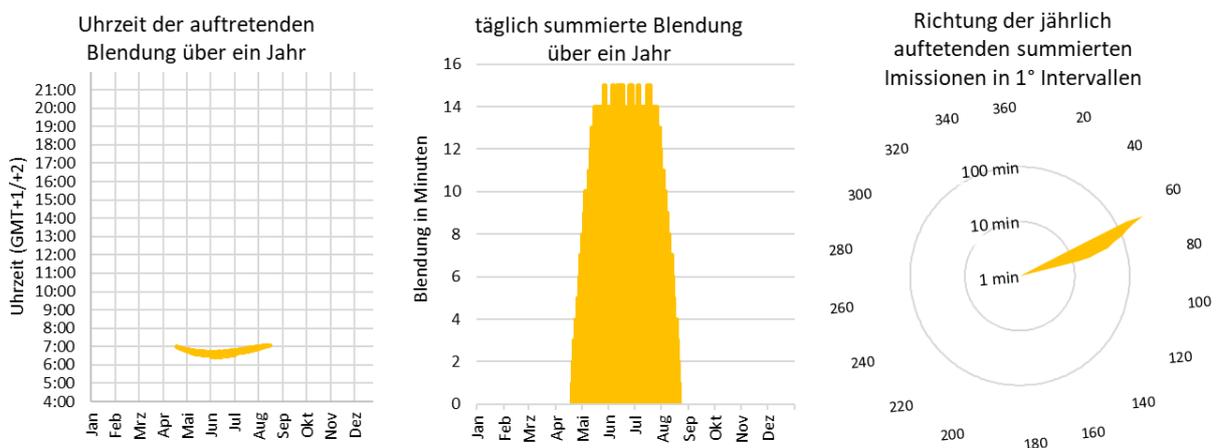


Abbildung 12: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf der B180



Abbildung 13: Streckenabschnitt auf der B180, auf welchem Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer auftreten, in Orange, relevantes Sichtfeld Verkehrsteilnehmer in Gelb, Reflexionen auf die Verkehrsteilnehmer in Rot (Quelle: Google Earth)

Tabelle 4: Berechnung der maximalen Blendwirkung für den in Abbildung 13 dargestellten Punkt (worst-case)

Bezeichnung	Wert	Einheit
Höhenwinkel der Sonne	11	°
Leuchtdichte der Sonne bei diesem Höhenwinkel [14]	5,31E+08	°
Abgeschätzte Adaptionshelligkeit [7]	925	lm/m ²
steilster Ein/Ausfallswinkel auf/von Modulfläche (Differenz zur Normalen)	80	°
Reflexionsgrad bei diesem Einfallswinkel [15]	21%	
Strahlaufweitung der Reflexion an der Modulfläche [15]	87	mrاد
resultierende Leuchtdichte der Reflexion	3,51E+06	cd/m ²
Entfernung zum Immissionsort	850	m
vertikaler Öffnungswinkel der Modulfläche vom Immissionsort aus	0,13	°
Bestrahlungsstärke am Immissionsort durch reflektierende Modulfläche	0,4	klx
Differenzwinkel der Reflexion zur Hauptsichtrichtung	16,0	°
Resultierende äquivalente Schleierleuchtdichte [6]	54	lm/m ²
relative Anhebung der Kontrastschwelle K_{rel} [5]	1,06	

7.2 Gewerbegebiet

OP1

Es werden in der Simulation mehrere Standorte des östlich anliegenden Gewerbegebiets untersucht. Die Ergebnisse der Simulation für den untersuchten Immissionsort OP1 sind in Abbildung 14 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 27.03. bis zum 14.09. von 18:47 Uhr bis 19:44 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 270° - 294° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 18 Minuten erreicht.

Es handelt sich um Lichtfenster der Werkhalle und damit nicht um dauerhafte Arbeitsplätze welche von Blendung beeinträchtigt würden. Gemäß LAI-Hinweisen ist daher nicht von einem schutzwürdigen Ort auszugehen, die auftretenden Reflexionen sind daher unerheblich.

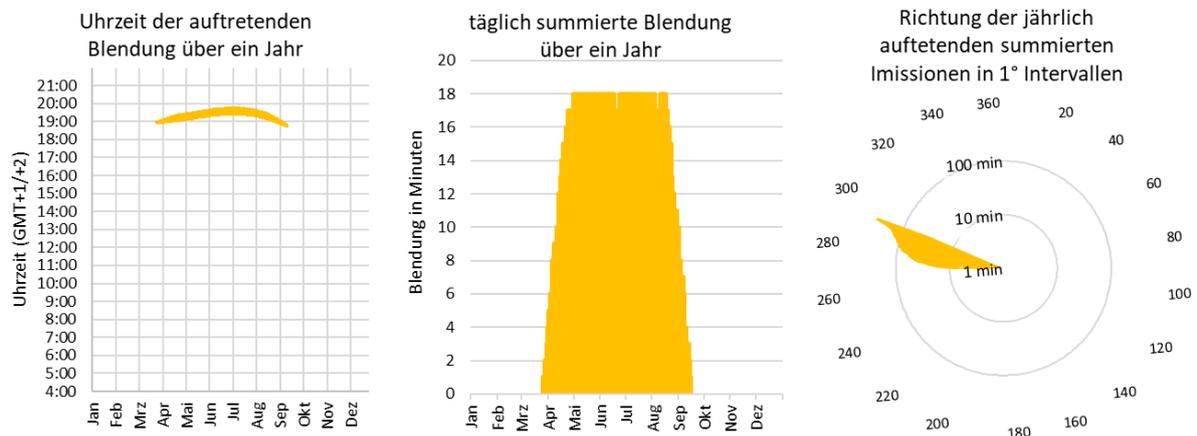


Abbildung 14: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf OP1

OP1-4

Gemäß Vor-Ort-Aufnahmen vom August 2023 befinden sich keine weiteren Fenster in Richtung des PV-Feldes entlang der weiteren Betriebsstätten des Gewerbegebiets. Reflexionen sind daher nur auf den umgebenden asphaltierten Park- bzw. Arbeitsflächen relevant. Am höchsten sind die potenziellen Blenddauern hier für OP4, die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 15 dargestellt. Die Ergebnisse für OP 2 und 3 sind vergleichbar, jedoch mit niedrigeren Gesamtdauern und werden daher nicht separat aufgeführt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 23.03. bis zum 17.09. von 17:54 Uhr bis 19:44 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 268° - 294° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 20 Minuten erreicht.

Die Reflexionen treten bei tiefstehender Sonne bis zu einer maximalen Sonnenhöhe von 17° auf. Die Sonne steht annähernd zentral über den reflektierenden Modulflächen, es ist daher durch die Reflexionen gegenüber der Sonne nicht von einer zusätzlichen Beeinträchtigung für die betroffenen Personen auszugehen. Es werden keine Blendschutzmaßnahmen für notwendig erachtet.

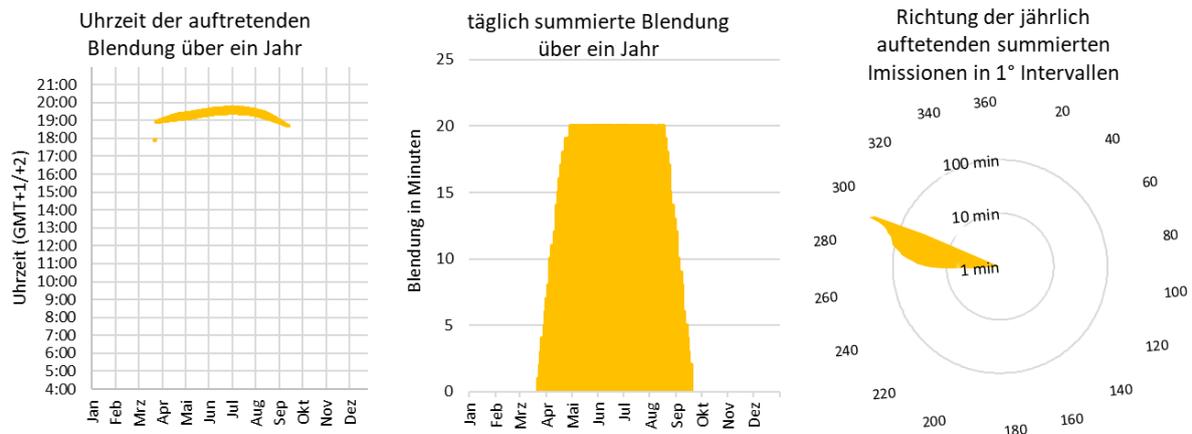


Abbildung 15: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf OP4

7.3 Apfelborn

Die Ergebnisse der Simulation für die Straße Apfelborn zum Gewerbegebiet sind in Abbildung 16 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 27.03. bis zum 13.09. von 18:49 Uhr bis 19:43 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 270° - 291° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 18 Minuten erreicht.

Zwischen Modulfeld und dem betroffenen Streckenabschnitt befindet sich gemäß Vor-Ort-Aufnahmen vom August 2023 ein Gehölzstreifen, durch welchen voraussichtlich nur im Frühjahr ein Blick auf die Modulfläche möglich ist. Der betroffene Streckenabschnitt, der Gehölzstreifen und die möglichen Immissionswinkel sind in Abbildung 17 dargestellt.

Die Straße Apfelborn mündet am Ende des betroffenen Streckenabschnitts auf die L72, wobei den Verkehrsteilnehmern der L72 Vorfahrt zu gewähren ist. Die einmündende Kreuzung ist übersichtlich und es treten auf die Verkehrsteilnehmer keine Reflexionen aus Richtung Norden oder Süden. Der ankommende Verkehr der L72 aus Richtung Norden und Süden ist damit zu jedem Zeitpunkt für die Verkehrsteilnehmer auf der Straße Apfelborn gut einzusehen.

Der Gutachter kommt daher zu der Einschätzung, dass, selbst wenn vereinzelt direkte Reflexionen durch das Modulfeld auf den Verkehr treffen, keine Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit besteht. Es sind daher keine Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

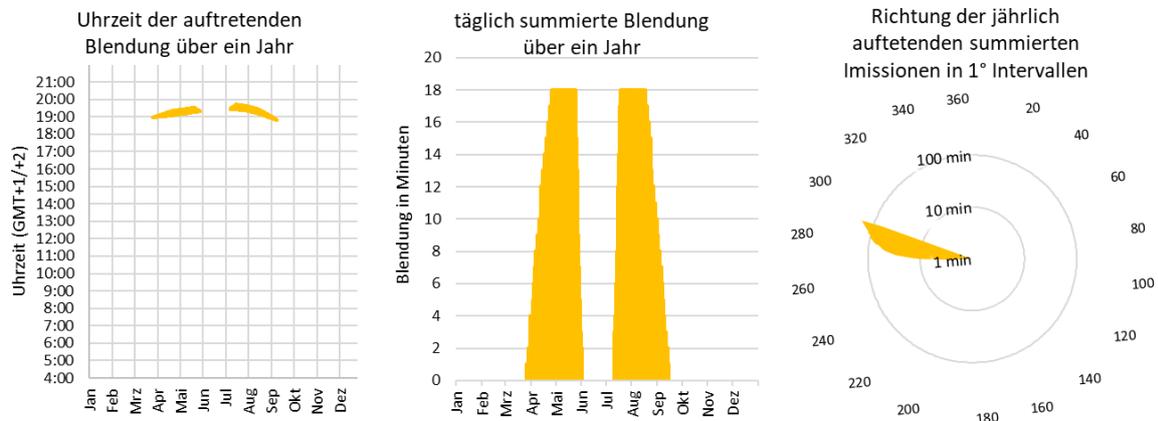


Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Straße Apfelborn



Abbildung 17: Streckenabschnitt auf der Straße Apfelborn auf welchem Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer auftreten, in Orange, Reflexionen auf die Verkehrsteilnehmer in Rot, bestehende Sichtunterbrechung durch Gehölz in Grün (Quelle: Google Earth)

8 Zusammenfassung

Es wurde die potenzielle Blendung durch Reflexion der Sonne an PV-Modulen des geplanten Solarparks Hübitz Nr. 3 für den Verkehr der anliegenden Straßen und der Bahntrasse, sowie für das Gewerbegebiet untersucht.

Das Gutachten kommt zu dem Schluss, dass es auf Basis der Simulationsergebnisse zu keinen Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten auf der L72 und der Bahnstrecke kommen kann. Eine Gefährdung der Verkehrssicherheit durch Reflexionen an den Modulflächen wird damit ausgeschlossen.

Auf der B180 kommt es bei Entfernungen von über 800 m zu Reflexionen auf die Verkehrsteilnehmer, die Reflexionen liegen außerhalb des zentralen Sichtfelds. Gemäß den durchgeführten Berechnungen ergibt sich durch diese Reflexionen keine relevante Sichtbeeinträchtigung für die Verkehrsteilnehmer und es ist damit entsprechend von keiner Gefährdung der Verkehrssicherheit auszugehen.

Auf die Straße Apfelborn sind Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer möglich. Mit dem bestehenden Gehölzstreifen sind hiervon voraussichtlich nur wenige Tage im Frühjahr betroffen. Der ankommende Verkehr der L72, auf welche am Ende der Straße abgelenkt wird, ist ohne Blendwirkung einzusehen. Es ist daher von keiner Gefährdung der Verkehrssicherheit auszugehen.

Auf das Gewerbegebiet sind Reflexionen im Sommerhalbjahr in den Abendstunden möglich. Gemäß Vor-Ort-Aufnahmen sind hiervon jedoch keine schutzwürdigen Orte, wie sie in den LAI-Hinweisen definiert werden, betroffen.

Es sind keine Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

9 Literaturverzeichnis

- [1] J. Trempler, *Optische Eigenschaften*, Carl Hanser Verlag, 2015.
- [2] J. Yellowhair und C. K. Ho, *Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts*, Proceedings of the ASME 2015 9th International Conference on Energy Sustainability, 2015.
- [3] C. Bucher, <https://www.bulletin.ch/de/news-detail/reflexionen-an-photovoltaikanlagen.html>, 2021.
- [4] P. Warthmann, <https://www.gebaeudetechnik.ch/gebaeudehuelle/photovoltaikanlage/sandstrahl-atelier-loest-blendproblem>, 2021.
- [5] BAuA, „Bericht "Blendung durch optische Strahlungsquellen",“ 2185.
- [6] J. J. Vos, „Reflections on glare,“ *Lighting Research & Technology*, Bd. 35, p. 163–175, June 2003.
- [7] S. Darula und R. Kittler, „CIE GENERAL SKY STANDARD DEFINING LUMINANCE DISTRIBUTIONS,“ 1994.
- [8] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg als Vorsitzland der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), *Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI)*, 2012.
- [9] Länderausschuss für Immissionsschutz, *Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immission von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise)*, 2002.
- [10] OVE (Österreichischer Verband für Elektrotechnik), *Blendung durch Photovoltaikanlagen*, Wien, 2016.
- [11] Federal Aviation Administration, *Interim Policy, FAA Review of Solar Energy System Projects on Federally Obligated Airports*, Federal Register, 2013.
- [12] C. Schierz, *Über die Blendbewertung von reflektierendem Sonnenlicht bei Solaranlagen*, TU Ilmenau, FG Lichttechnik, 2012.
- [13] ForgeSolar, <https://www.forgesolar.com/help/#assumptions>.
- [14] J. Robledo, J. Leloux, B. Sarr, C. Gueymard und P. Darez, „Dynamic simulation of the shading cast by a wind farm on an adjacent photovoltaic plant,“ 3546.



- [15] C. Ho, C. Sims und J. Yellowhair, „Solar Glare Hazard Analysis Tool (SGHAT) User's Manual v. 2G,“ 2015.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modulflächen der geplanten PVA in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth).....	3
Abbildung 2: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)	4
Abbildung 3: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)	4
Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls.....	5
Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1].....	5
Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung	6
Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [2]	6
Abbildung 8: links: Module mit satiniertes Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]	7
Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]	7
Abbildung 10: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [13]	12
Abbildung 11: Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar.....	13
Abbildung 12: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf der B180	17
Abbildung 13: Streckenabschnitt auf der B180, auf welchem Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer auftreten, in Orange, relevantes Sichtfeld Verkehrsteilnehmer in Gelb, Reflexionen auf die Verkehrsteilnehmer in Rot (Quelle: Google Earth)	18
Abbildung 14: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf OP1	19
Abbildung 15: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf OP4.....	20
Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Straße Apfelborn	21
Abbildung 17: Streckenabschnitt auf der Straße Apfelborn auf welchem Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer auftreten, in Orange, Reflexionen auf die Verkehrsteilnehmer in Rot, bestehende Sichtunterbrechung durch Gehölz in Grün (Quelle: Google Earth)	21

11 Gewährleistung

Unsere Fachgutachten werden nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Die Messungen, Bewertungen, Berechnungen und Simulationen werden entsprechend dem Stand der Wissenschaft und Technik und den anerkannten Regeln der Technik mit größtmöglicher Sorgfalt vorgenommen.

Die Fachgutachten erfolgen auf Basis der vom Auftraggeber übermittelten Informationen und Planungsunterlagen. Diese werden einer fachkritischen Wertung unterzogen. Die Informationen zu den technischen Parametern der einzelnen Komponenten werden soweit möglich mit Herstellerangaben abgeglichen. Dabei wird die Eignung der Komponenten anhand der entsprechenden Zertifikate oder anderer Nachweise geprüft. Der Gutachter unterstellt dabei, dass die für die Komponenten geltenden anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden. Für Fehlangaben des Auftraggebers sowie modellbedingte Abweichungen hat der Gutachter nicht einzustehen. Die in den Fachgutachten verwendeten Messungen sind mit Messunsicherheiten behaftet. Die Bewertungen anhand von Berechnungen sind mit Unsicherheiten in der Modellierung verbunden. Somit können Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Werten zu den tatsächlichen Werten nicht ausgeschlossen werden. Der Gutachter ist bestrebt, die Abweichungen gering zu halten.

Für einfache und grobe Fahrlässigkeit gilt eine Haftungsbegrenzung auf folgende Beträge:

1. Die Haftung für einfache Fahrlässigkeit ist auf einen Betrag von 100.000 € beschränkt.
2. Die Haftung für alle sonstigen Fälle der Fahrlässigkeit ist auf einen Betrag von 200.000 € begrenzt.
3. Die Haftung für Schäden aus der Verletzung des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit wird durch die vereinbarten Haftungsbegrenzungen nicht berührt. Das gleiche gilt für die Haftung wegen Vorsatz.