

DGS Landesverband Berlin Brandenburg e.V.

Erich-Steinfurth-Str. 8

10243 Berlin

Phone +49 (030) 29 38 12 80

Email dgs@dgs-berlin.de

Web www.dgs-berlin.de

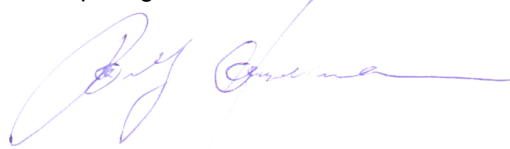
Fachgutachten zur Bewertung der Blendwirkung durch Reflexion an PV-Modulen (Blendgutachten) für den Solarpark Falkenberg

Anlage: Solarpark Falkenberg
52.786201°, 13.940953°
16259, Falkenberg

in Auftrag gegeben von: MKG Projekt GmbH
Kraillshausener Straße 15
D-74575 Schrozberg

Projektnummer: A-LV25/0119

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ralf Haselhuhn', written over a light blue horizontal line.

Bearbeiter: Dr. -Ing. Isaac Martinez-Noguez

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Isaac Martinez Noguez', written over a light blue horizontal line.

Berlin, 11.06.2025 11.06.2025

Handelsregister:
Amtsgericht
Charlottenburg
HRB 90823 B

Bankverbindung:
Bank für Sozialwirtschaft
BLZ 100 205 00
Konto 130 96 00

U-ID-Nr.: DE 813844044
Steuer-Nr.: 37/259/32257
BIC: BFSWDE33BER
IBAN: DE 84 1002 0500 00013 09600

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Beschreibung der Umgebung	3
3	Beschreibung der PV-Anlage.....	4
4	Grundlagen der Optik.....	6
	4.1 Geometrische Reflexionssituation.....	6
	4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen	7
	4.3 Blendung.....	9
5	Methodik der Untersuchung mit ForgeSolar	10
	5.1 Bewertungsbasis	10
	5.2 Simulationstool und Modellierung	11
	5.3 Simulationsausgabe und -bewertung	12
6	Simulation mit ForgeSolar	13
	6.1 PV-Anlage.....	14
	6.2 Immissionsorte.....	15
7	Ergebnisse mit ForgeSolar.....	17
8	Blendschutzmaßnahmen.....	21
9	Zusammenfassung.....	22
10	Literaturverzeichnis	23
11	Abbildungsverzeichnis.....	24
12	Gewährleistung	25
13	Vorbehaltsklausel für die Veröffentlichung des Gutachtens	25

1 Einleitung

Im folgenden Gutachten wird die durch Reflexion direkter Sonneneinstrahlung verursachte Lichtemission der geplanten PV-Anlage (PVA) Falkenberg und die damit einhergehende potenzielle Beeinträchtigung der Umgebung untersucht und nach den *Hinweisen zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz* (kurz: LAI) 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 Photovoltaikanlage (PVA) befindet sich in der Gemeinde Falkenberg im Landkreis Märkisch-Oderland in Brandenburg. Die PVA 1 liegt südlich des Ortsteils Hohenfinow, nördlich von Cöthen und westlich von Falkenberg. Die PVA 2 befindet sich südlich des Ortsteils Cöthen. Westlich der PVA 1 und östlich der PVA 2 verläuft die Landesstraße L35. Nördlich der PVA 1 liegt die Bundesstraße B167. 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.

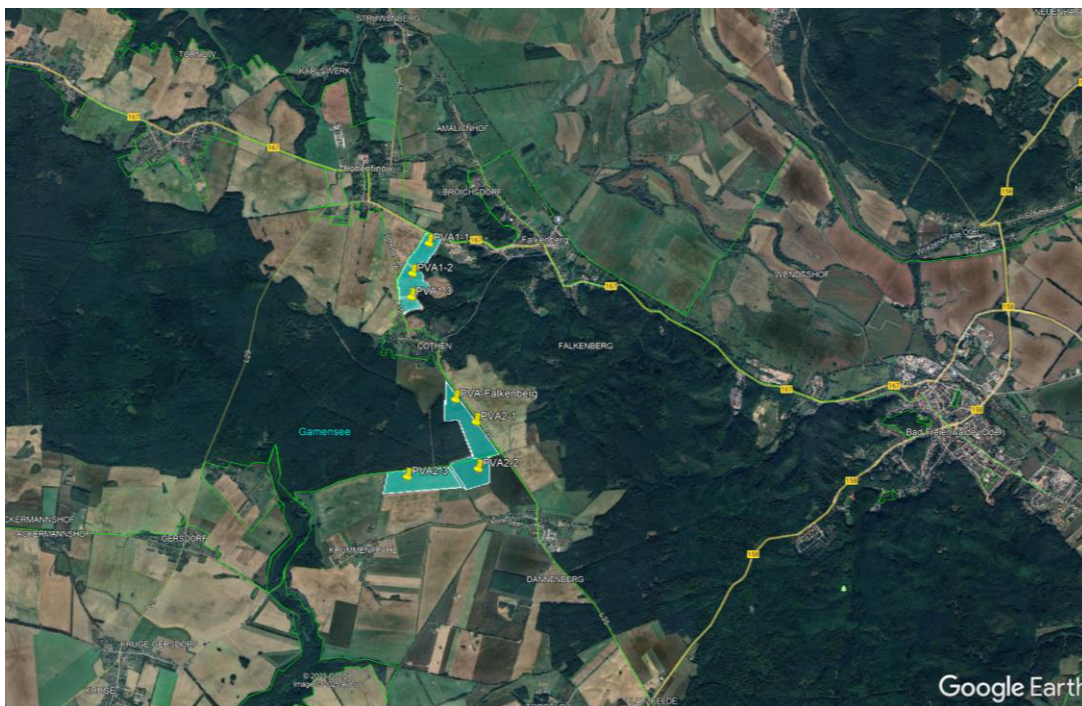


Abbildung 1: Modulflächen der geplanten PVA und Umgebung (Quelle: Google Earth)

3 Beschreibung der PV-Anlage

Die PVA ist auf einer Fläche von ca. 88,5 ha und mit einer DC-Leistung von 129.358 kWp geplant. Vorgesehen ist eine Süd-Ausrichtung mit 180° Azimut und einem Neigungswinkel von 11° . Der Belegungsplan ist in Abbildung 2 dargestellt. Als Unterkonstruktion kommt ein 2-Pfeiler-System zum Einsatz mit drei im Längsformat ausgerichteten Modulen über die Tischbreite. Die Modulunterkante ist auf 0,8 m Höhe und die Moduloberkante auf 2,27 m geplant. Die Unterkonstruktion ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

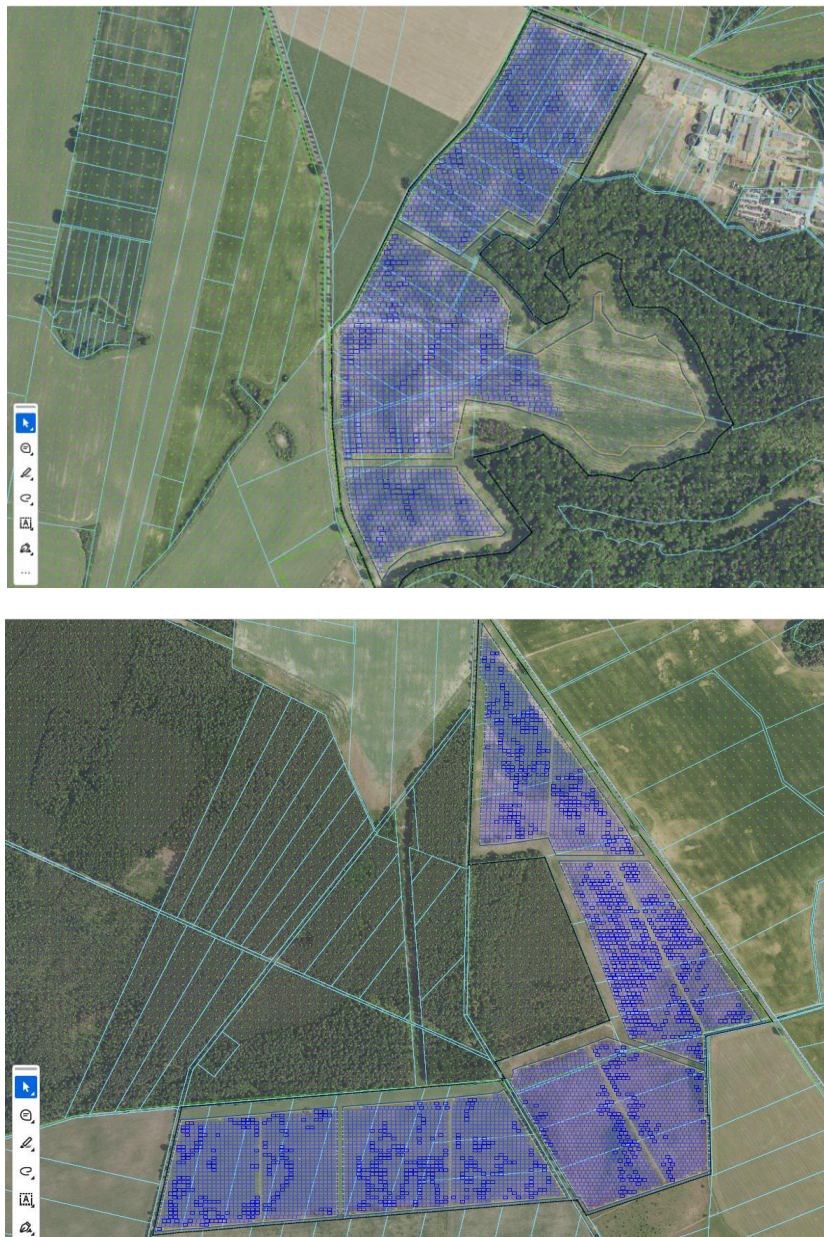
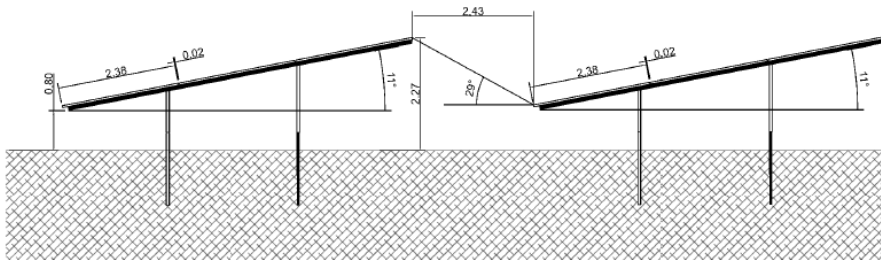


Abbildung 2: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)

PV MODULTISCHE

SEITENANSICHT



VORDERANSICHT

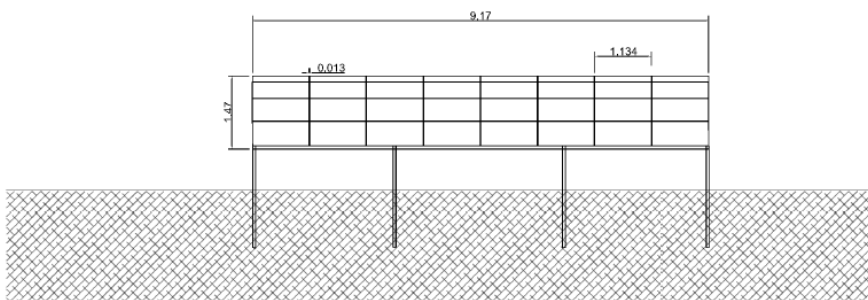


Abbildung 3: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)

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 ($\alpha = \beta$).

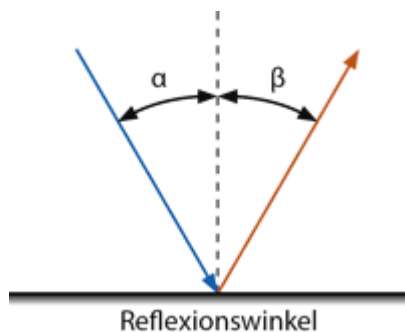


Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls

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.

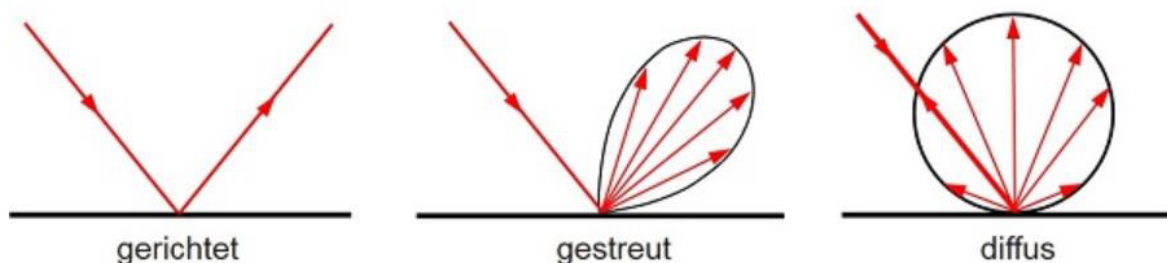


Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1]

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).

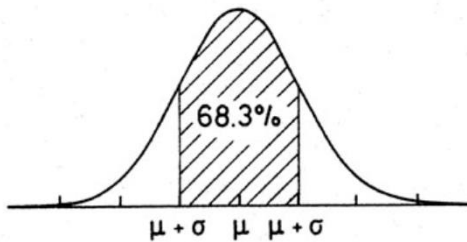


Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

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.

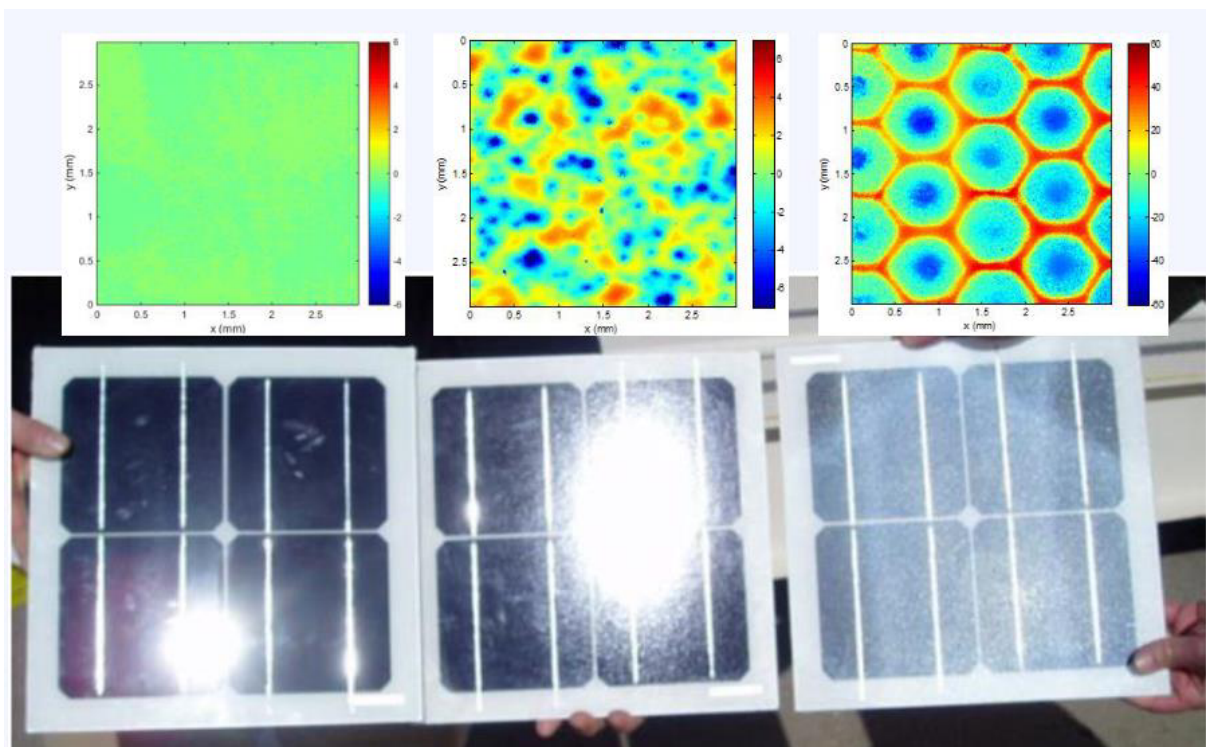


Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [2]

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.

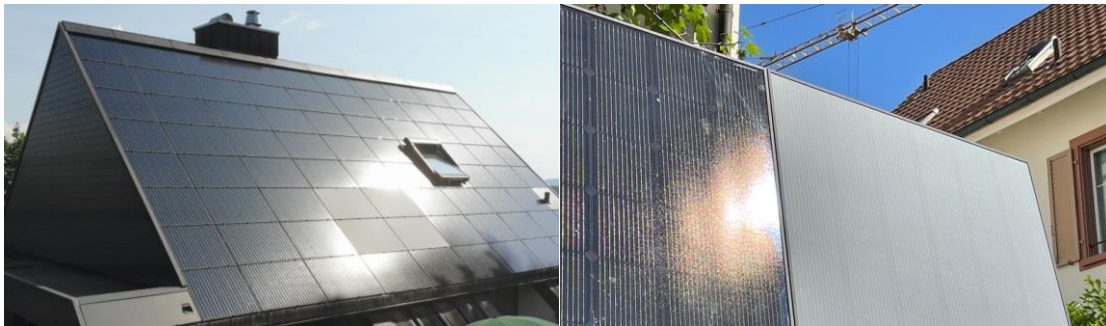


Abbildung 8: links: Module mit satinierter Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]

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.

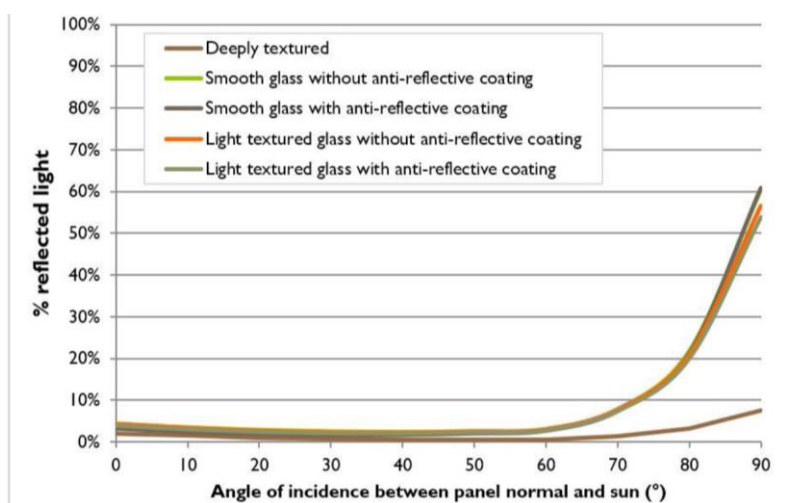


Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]

4.3 Blendung

Blendung wird hier definiert als eine Störung der Wahrnehmung durch eine Lichtquelle. Hierfür ist zum einen die gewichtete Helligkeit des Sichtfeldes relevant, welche zu einer entsprechenden Adaption des Auges führt, zum anderen die Helligkeit des Objekts, auf welches das Auge fokussiert ist und welches wahrgenommen werden soll.

Es wird zwischen einer Blendung, welche eine Beeinträchtigung der Sicht zur Folge hat und einer Blendung, welche „nur“ als unangenehm empfunden wird, unterschieden. Während eine Beeinträchtigung der Sicht in Verkehrssituationen gänzlich vermieden werden sollte, ist für ortsfeste Beobachter eine kurzzeitige Beeinträchtigung durch Blendung ein geringeres Problem als eine lang andauernde „nur“ unangenehm empfundene Blendung. Wann eine Reflexion als unangenehm empfunden wird, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. In der Literatur werden verschiedene Berechnungsmethoden vorgeschlagen, es hat sich jedoch bisher kein Standard etablieren können [5].

Eine Beeinträchtigung der Sicht liegt vor, wenn die Helligkeit der Blendquelle (gewichtet mit deren Entfernung zum zentralen Sichtfeld) eine Anhebung der adaptiven Helligkeit zur Folge hat, welche dazu führt, dass das Ziel nicht mehr richtig wahrgenommen werden kann. Dies wird in Abbildung 10 verdeutlicht: Erhöht sich die adaptive Helligkeit, erhöht sich auch die minimale Helligkeit, die ein Objekt haben muss, um gut erkennbar zu sein. Das Anpassungsvermögen an die Umgebungshelligkeit endet bei einer Helligkeit zwischen $10^4 - 10^5 \text{ cd/m}^2$, was dann als Absolutblendung bezeichnet wird. Ob es durch eine Blendquelle zu einer Absolutblendung kommt, hängt somit immer auch von der Blickrichtung zu dieser ab und ist in der Regel nur bei einer Blickrichtung direkt in die Blendquelle oder in deren direkte Nähe möglich.

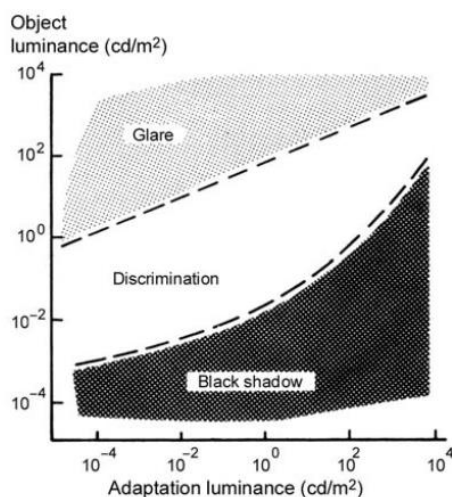


Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]

5 Methodik der Untersuchung mit ForgeSolar

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 [6]

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 [7] 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.“ [6]*

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 [8]. 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 [10].

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 [6] und die TU Ilmenau [11].
- 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 [8].
- 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 [12].

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/m^2]
- 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/cm^2]
- Die Einstufung des Blendpotenzials auf Basis der Bestrahlungsstärke und der Größe der Blendquelle [grün/gelb/rot]
- Leuchtdichte der Blendung [cd/m^2]

Das Blendpotenzial wird gemäß Abbildung 11 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.

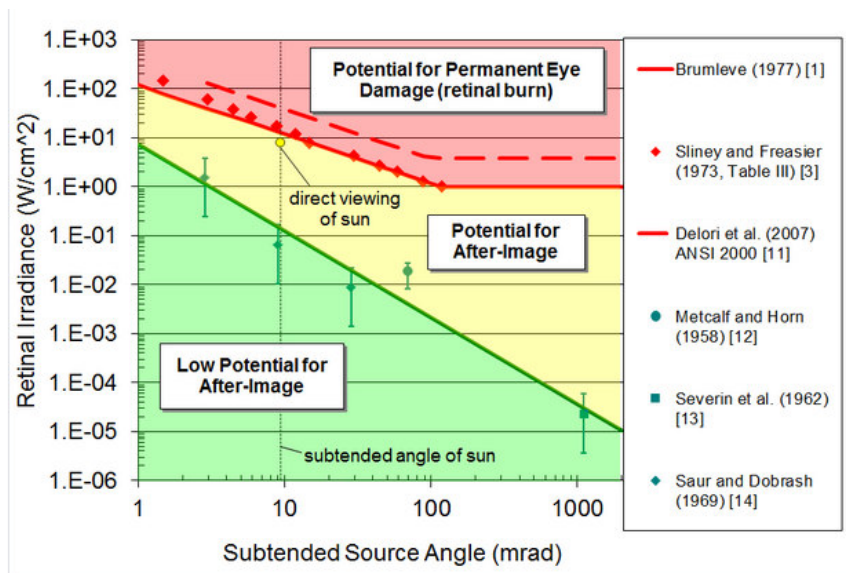


Abbildung 11: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [12]

6 Simulation mit ForgeSolar

Dieses Kapitel stellt die Simulationsparameter dar. Es werden die Eingabedaten und Simulationsparameter für die PV-Flächen und die zu untersuchenden Immissionsorte aufgeführt. In Abbildung 12 ist eine Übersicht über die angelegte Simulation dargestellt.



Abbildung 12: PV-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 180° Azimut und 11° Neigungswinkel simuliert. Die mittlere Modulhöhe ergibt sich zu 1,5 m. Als maximale Bestrahlungsstärke auf die horizontale Fläche werden 971 W/m² angesetzt. Die genauen Koordinaten der Eckpunkte der PV-Flächen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Koordinaten der PV-Flächen

PV-Flächen	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
PVA 1-2	1	52,80257194	13,93206214	63,5	1,5	65
	2	52,80155173	13,93490687	54,2	1,5	55,7
	3	52,80123517	13,93530249	56,8	1,5	58,3
	4	52,80059868	13,93522471	64,8	1,5	66,3
	5	52,80042192	13,93605887	66	1,5	67,5
	6	52,79927893	13,93687148	67,6	1,5	69,1
	7	52,79959759	13,93530507	66,1	1,5	67,6
	8	52,79970949	13,93412355	69,3	1,5	70,8
	9	52,79875128	13,93367632	60,2	1,5	61,7
	10	52,79872106	13,93071425	69,9	1,5	71,4
	11	52,80083188	13,93050796	64,7	1,5	66,2
PVA 1-1	1	52,80604869	13,9358579	61,3	1,5	62,8
	2	52,80536237	13,93882658	61,9	1,5	63,4
	3	52,80362763	13,93733404	61,6	1,5	63,1
	4	52,80363411	13,93699072	62	1,5	63,5
	5	52,80259062	13,93597938	59,2	1,5	60,7
	6	52,80281115	13,93516802	57,6	1,5	59,1
	7	52,80208064	13,93393018	54,7	1,5	56,2
	8	52,80274224	13,93216126	65,2	1,5	66,7
	9	52,80321249	13,93263199	66,7	1,5	68,2
	10	52,80434044	13,9342028	69,5	1,5	71
PVA1-3	1	52,79858802	13,93071392	69,9	1,5	71,4
	2	52,79858802	13,93383601	60,5	1,5	62
	3	52,79752416	13,93511274	69	1,5	70,5
	4	52,79743983	13,93505641	68,8	1,5	70,3
	5	52,79740415	13,93365094	65	1,5	66,5
	6	52,79719332	13,93256464	66,9	1,5	68,4
	7	52,79690789	13,93194505	66,5	1,5	68

	8	52,79666787	13,93179216	65,1	1,5	66,6
	9	52,79784365	13,93089899	68,3	1,5	69,8
PVA2-1	1	52,78924797	13,93948437	81	1,5	82,5
	2	52,78078842	13,94967788	94,6	1,5	96,1
	3	52,78049801	13,9476233	95,4	1,5	96,9
	4	52,77985554	13,9475938	95	1,5	96,5
	5	52,78042663	13,9448204	98	1,5	99,5
	6	52,78467656	13,94194298	90,3	1,5	91,8
	7	52,78457922	13,93938684	87,2	1,5	88,7
PVA2-2	1	52,77949413	13,94039804	91,9	1,5	93,4
	2	52,77979833	13,94064212	90,8	1,5	92,3
	3	52,78048461	13,94405792	96,8	1,5	98,3
	4	52,77975677	13,94763759	94,8	1,5	96,3
	5	52,77755123	13,94784514	96,8	1,5	98,3
	6	52,7767687	13,94342534	98,5	1,5	100
PVA2-3	1	52,7792921	13,94013673	90,8	1,5	92,3
	2	52,77706413	13,94250174	95,6	1,5	97,1
	3	52,77628586	13,92767629	88,5	1,5	90
	4	52,77871351	13,92861354	88,9	1,5	90,4

Für die optischen Eigenschaften der Moduloberfläche wurde für die Simulation mit Straßen ein glattes Glas mit einer Rauigkeit (auf Englisch: slope error) von 6,55 mrad gewählt. 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 Landesstraße L35 und die Bundesstraße B167 untersucht. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers, sowie Satellitenbilder von September 2024. Die Untersuchungshöhe für den Straßenverkehr wird auf 3 m über der Strecke festgelegt. Für die Straßen wird ein relevanter Sichtwinkel von +/- 30° zur Fahrtrichtung untersucht. 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 Verkehrsstrecken

Verkehrsstrecken	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
B167 Richtung W	1	52,80511861	13,94088676	60,2	3	63,2
	2	52,80564072	13,93848886	60,9	3	63,9
	3	52,80613201	13,93625458	60,1	3	63,1

	4	52,80631037	13,93559744	60,8	3	63,8
	5	52,80650656	13,93494298	61,4	3	64,4
L35 Richtung N-1	1	52,79600692	13,93197742	64,6	3	67,6
	2	52,79752259	13,93078103	70	3	73
	3	52,79784207	13,93062278	69,6	3	72,6
	4	52,7990455	13,93036064	68,9	3	71,9
	5	52,80076999	13,93028824	65	3	68
	6	52,80301725	13,93019725	64,6	3	67,6
	7	52,80323778	13,93014093	65,2	3	68,2
	8	52,80391184	13,92975088	66,1	3	69,1
	9	52,80684743	13,9280766	71	3	74
	10	52,80755544	13,9276698	68,8	3	71,8
L35 Richtung N-2	1	52,77786314	13,95381816	105,9	3	108,9
	2	52,78146811	13,94951847	96,5	3	99,5
	3	52,78449073	13,94589235	91,2	3	94,2
	4	52,78663196	13,94332364	83,9	3	86,9
	5	52,78838488	13,94122586	80,7	3	83,7
	6	52,79004148	13,93922618	82,5	3	85,5
L35 Richtung S-1	1	52,80754825	13,9276384	68,9	3	71,9
	2	52,80682025	13,92804878	71,3	3	74,3
	3	52,80389062	13,9297135	66	3	69
	4	52,80322579	13,9301051	65,2	3	68,2
	5	52,80301499	13,93016947	64,6	3	67,6
	6	52,80075722	13,93026146	65	3	68
	7	52,79904373	13,93032631	68,8	3	71,8
	8	52,79783625	13,93057397	69,7	3	72,7
	9	52,79750298	13,93074161	70	3	73
	10	52,79598661	13,93192982	64,9	3	67,9
L35 Richtung S-2	1	52,79003293	13,93918174	82,6	3	85,6
	2	52,78837293	13,94118085	80,8	3	83,8
	3	52,78661454	13,94328906	84	3	87
	4	52,78444404	13,94589885	91,3	3	94,3
	5	52,78145104	13,94948626	96,5	3	99,5
	6	52,77990781	13,95132479	98,6	3	101,6
	7	52,77785615	13,95376502	105,9	3	108,9

7 Ergebnisse mit ForgeSolar

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 nach Filterung der Ergebnisse Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten	Verursachende PV- Anlage
B167 Richtung Westen	28	20	PVA 1-1
B167 Richtung Osten	0	0	
L35 Richtung Norden	41	49	PVA 2-1
L35 Richtung Süden	0	0	

B167

Die Ergebnisse der Simulation für den B167 sind in Abbildung 13 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 05.03. bis zum 07.10. zwischen 17:12 - 19:45 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 257° - 289° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 20 Minuten erreicht und über das gesamte Jahr eine potenzielle Dauer von 27,7 Stunden.

Die Reflexionen können nahe der Hauptblickrichtung der Verkehrsbeteiligten auftreten, die Reflexionen sind daher als potenziell sichtbeeinträchtigend einzustufen. Der betroffene Streckenabschnitt und die möglichen Immissionswinkel sind in Abbildung 14 und dargestellt.

Gemäß den Ergebnissen der Simulation treten Reflexionen zwar auf die Landesstraße auf, jedoch wird – wie in Abbildung 15 ersichtlich – die Ausbreitung der Reflexionen durch einen vorhandenen Gehölzstreifen unterbrochen, der als natürliche Sichtbarriere fungiert und eine effektive Sichtunterbrechung gewährleistet. Da die Reflexionen laut Simulation im Zeitraum zwischen Frühjahr

und Sommer auftreten, ist davon auszugehen, dass die Bäume in diesem Zeitraum belaubt sind – was durch das Bildmaterial bestätigt wird – und somit die Sichtunterbrechung gesichert ist.

Zudem handelt es sich um eine Bundesstraße mit Geschwindigkeitsbegrenzung (70 km/h) und jeweils nur einer Fahrspur pro Richtung, was im Allgemeinen zu niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten führt. Darüber hinaus verläuft der betroffene Straßenabschnitt geradlinig, was die Sicht auf den Gegenverkehr erleichtert und die Sicherheit zusätzlich erhöht.

Aus diesen Gründen wird die Blendungssituation als unkritisch eingestuft. Sollte der Gehölzstreifen jedoch entfernt oder nicht erhalten werden, wären Maßnahmen erforderlich, die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

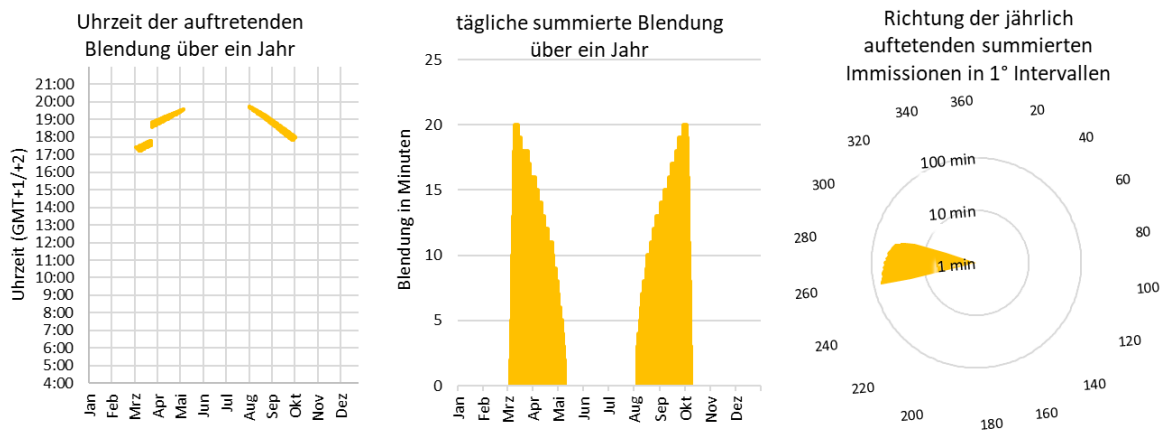


Abbildung 13: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf den B167



Abbildung 14: Das potenziell von Blendung betroffene Sichtfeld entlang der B167 ist in Rot dargestellt, der betroffene Streckenabschnitt in Orange



Abbildung 15: Gehölzstreifen als Sichtunterbrechung zwischen geplanter PV-Anlage und Bundesstraße
– Luftbild und Straßenansicht

Landstraße L35

Die Ergebnisse der Simulation für den L35 sind in Abbildung 16 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 16.05. bis zum 28.07. zwischen 19:15 - 20:05 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 291 - 297° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 49 Minuten erreicht und über das gesamte Jahr eine potenzielle Dauer von 40,6 Stunden.

Die berechneten Reflexionen treten lediglich am äußersten Rand des Sichtfeldes der Verkehrsteilnehmenden auf und befinden sich nicht im Zentrum der Hauptblickrichtung. Zudem handelt es sich bei dem betrachteten Straßenabschnitt um eine gerade verlaufende Landstraße ohne Kurven oder Sichtbarrieren, welche die Sicht auf den Gegenverkehr einschränken könnten. Aufgrund dieser geradlinigen Streckenführung ist eine klare Übersicht über den Straßenverlauf gegeben, was die potenzielle Beeinträchtigung der Sichtwahrnehmung durch kurzzeitige Reflexionen weiter relativiert. Darüber hinaus handelt es sich nicht um eine hochfrequentierte Autobahn, sondern um eine Landstraße mit geringeren Geschwindigkeiten und Verkehrsaufkommen, wodurch das Risiko einer sicherheitsrelevanten Beeinträchtigung zusätzlich als gering einzuschätzen ist. Aus diesen Gründen sind die auftretenden Reflexionen unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten nicht als signifikant sichtbeeinträchtigend einzustufen. Der betroffene Streckenabschnitt und die möglichen Immissionswinkel sind in Abbildung 17 dargestellt.

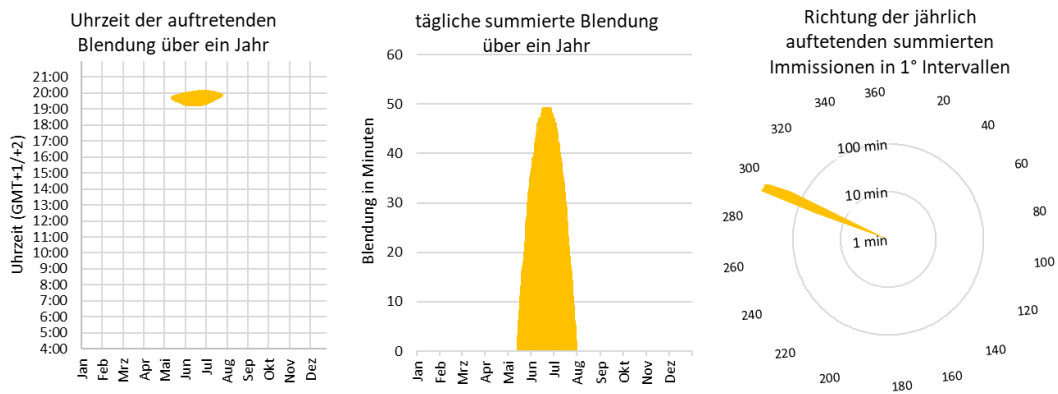


Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf der L35



Abbildung 17: Das potenziell von Blendung betroffene Sichtfeld entlang der B167 ist in Rot dargestellt, der betroffene Streckenabschnitt in Orange.

8 Blendschutzmaßnahmen

Wie bereits erwähnt, wird die Blendung auf der B167 entsprechend der aktuellen Situation des Gehölzstreifens beurteilt. Aus diesen Gründen wird die Blendungssituation als unkritisch eingestuft. Sollte der Gehölzstreifen jedoch entfernt oder nicht erhalten bleiben, wären Maßnahmen erforderlich.

Die vorgeschlagene und mittels Simulation überprüfte Maßnahme ist der Einsatz einer 2,5 m hohen Sichtunterbrechung entlang des nördlichen Teils sowie mindestens 40 m östlich der PV-Anlage 1-1, wie in Abbildung 18 dargestellt.



Abbildung 18: Darstellung der vorgeschlagenen Maßnahme: 2,5 m hohe Sichtunterbrechung (gelb markiert) bei Entfernung des Gehölzstreifens

9 Zusammenfassung

Es wurde die potenzielle Blendung durch Reflexion der Sonne an PV-Modulen der geplanten PV-Anlage Falkenberg für den Verkehr der anliegenden Bundesstraße 167 (B167) und der Landstraße 35 (L35) untersucht.

Für die B167 liegen die Reflexionen zwar in der Nähe der Hauptblickrichtung der Verkehrsteilnehmenden, werden jedoch durch einen bestehenden Gehölzstreifen wirksam abgeschirmt. Dieser fungiert als natürliche Sichtbarriere und verhindert eine direkte Sichtverbindung zu den reflektierenden Modulflächen. Aufgrund der geradlinigen Straßenführung, der Geschwindigkeitsbegrenzung (70 km/h) sowie des begrenzten Verkehrsaufkommens wird die Blendwirkung als nicht sicherheitsrelevant eingestuft. Sollte der Gehölzstreifen jedoch entfernt oder nicht erhalten bleiben, wären entsprechende Maßnahmen erforderlich.

Für die L35 treten die berechneten Reflexionen lediglich am äußersten Rand des Sichtfeldes auf und befinden sich nicht im Zentrum der Hauptblickrichtung. Die Straße verläuft ebenfalls geradlinig und weist keine Sichtbarrieren auf, was eine uneingeschränkte Sicht auf den Straßenverlauf und den Gegenverkehr ermöglicht. Aufgrund des Straßentyps (Landstraße, kein Schnellstraßenverkehr) und der moderaten Fahrgeschwindigkeiten wird auch hier keine signifikante Sichtbeeinträchtigung festgestellt.

10 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] P. R. Boyce, *Human Factors in Lightning*, CRC Press, 2014.
- [6] 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.
- [7] Länderausschuss für Immissionsschutz, *Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immission von Windnergieranlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise)*, 2002.
- [8] OVE (Österreichischer Verband für Elektrotechnik), *Blendung durch Photovoltaikanlagen*, Wien, 2016.
- [9] European Union Aviation Safety Agency, *Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design (CS-ADR-DSN, Issue 6)*, 2022.
- [10] Federal Aviation Administration, *Interim Policy, FAA Review of Solar Energy System Projects on Federally Obligated Airports*, Federal Register, 2013.
- [11] C. Schierz, *Über die Blendbewertung von reflektierendem Sonnenlicht bei Solaranlagen*, TU Ilmenau, FG Lichttechnik, 2012.
- [12] ForgeSolar, <https://www.forgesolar.com/help/#assumptions>.

11 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)	5
Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls.....	6
Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1].....	6
Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung	7
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]	7
Abbildung 8: links: Module mit satiniertes Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]	8
Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]	8
Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]	9
Abbildung 11: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [12]	12
Abbildung 12: PV-Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar	13
Abbildung 13: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf den B167.....	18
Abbildung 14: Das potenziell von Blendung betroffene Sichtfeld entlang der B167 ist in Rot dargestellt, der betroffene Streckenabschnitt in Orange.....	18
Abbildung 15: Gehölzstreifen als Sichtunterbrechung zwischen geplanter PV-Anlage und Bundesstraße – Luftbild und Straßenansicht	19
Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf der L35.....	20
Abbildung 17: Das potenziell von Blendung betroffene Sichtfeld entlang der B167 ist in Rot dargestellt, der betroffene Streckenabschnitt in Orange.....	20
Abbildung 18: Darstellung der vorgeschlagenen Maßnahme: 2,5 m hohe Sichtunterbrechung (gelb markiert) bei Entfernung des Gehölzstreifens.....	21

12 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.

13 Vorbehaltsklausel für die Veröffentlichung des Gutachtens

Der Auftraggeber ist nicht berechtigt, das Gutachten ohne die ausdrückliche schriftliche Zustimmung des Auftragnehmers an Dritte weiterzugeben oder zu veröffentlichen, mit Ausnahme der Weitergabe an dafür vorgesehene Behörden. Eine Veröffentlichung im Internet oder die Weitergabe an andere Dritte muss schriftlich angefragt werden. Es ist wichtig, dass alle Parteien die vertraglichen Vereinbarungen respektieren, um rechtliche Konflikte zu vermeiden.