

DGS Landesverband Berlin Brandenburg e.V.

Erich-Steinfurth-Str. 8

10243 Berlin

Phone +49 (030) 29 38 12 80

Email solarservices@dgs-berlin.de

Web www.dgs-berlin.de

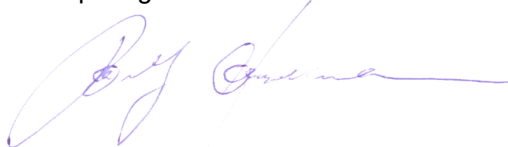
Fachgutachten zur Bewertung der Blendwirkung durch Reflexion an PV-Modulen (Blendgutachten) für den Solarpark Hespert-Buchen

Anlage: Solarpark Hespert-Buchen
50.969000°, 7.716945°
51580 Reichshof

in Auftrag gegeben von: Erneuerbare Energien Projekte (EEP)
RheinEnergie AG,
50606 Köln

Projektnummer: A-LV25/0111

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

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

Bearbeiter: Dr.-Ing. Isaac Martinez-Noguez

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Isaac Martinez-Noguez', written over a light blue grid background.

Berlin, 25.07.2025

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
5	Methodik der Untersuchung mit ForgeSolar	9
	5.1 Bewertungsbasis	9
	5.2 Simulationstool und Modellierung	10
	5.3 Simulationsausgabe und -bewertung	11
6	Simulation mit ForgeSolar	12
	6.1 PV-Anlage	12
	6.2 Immissionsorte	14
	6.3 Topologie des Geländes	17
7	Ergebnisse mit ForgeSolar	19
8	Zusammenfassung	20
9	Literaturverzeichnis	21
10	Abbildungsverzeichnis	22
11	Gewährleistung	23
12	Vorbehaltsklausel für die Veröffentlichung des Gutachtens	23

1 Einleitung

Im folgenden Gutachten wird die durch Reflexion direkter Sonneneinstrahlung verursachte Lichtemission der geplanten PV-Anlage (PVA) Hespert-Buchen 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 PVA liegt westlich des Ortsteils Hespert im Landkreis Oberbergischer Kreis in Nordrhein-Westfalen. Südlich-östlich des Solarparks liegt die Bundesautobahn 4 (A4) an, westlich die Landstraße 96 (L96). Die PVA ist auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen geplant. Da das Gelände unregelmäßig ist und teilweise geneigte Flächen aufweist, ist es erforderlich, für jede PV-Fläche die Basisneigung zu berechnen. 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. 20 ha und mit einer DC-Leistung von 20.000 kWp geplant. Vorgesehen ist eine Süd-Ausrichtung mit einem Azimut von 180° für die PV-Felder 1 und 2 sowie 186° für die PV-Felder 3, 4 und 5, jeweils bei einem Neigungswinkel von 20° . 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 3,26 m geplant. Die Unterkonstruktion ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 2: Modulbelegungsbereiche der geplanten PV-Anlage mit Azimut Ausrichtung – Grundlage der Blendungssimulation gemäß Angaben des Auftraggebers (Quelle: Google Maps)

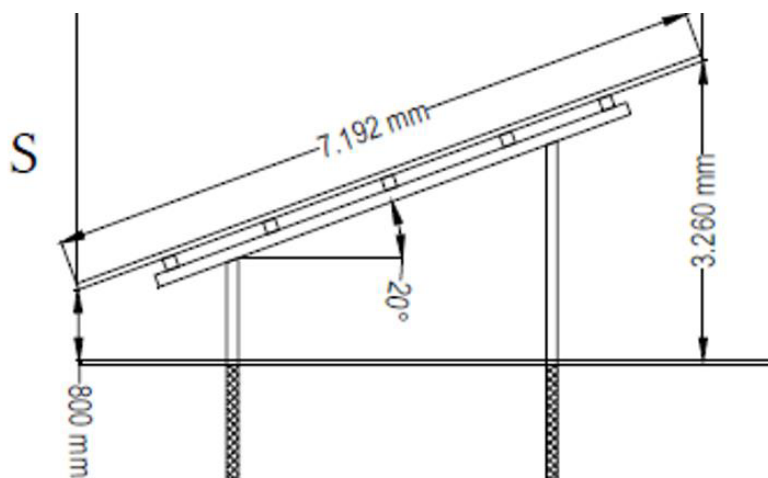


Abbildung 3: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)

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 ($\alpha = \beta$).

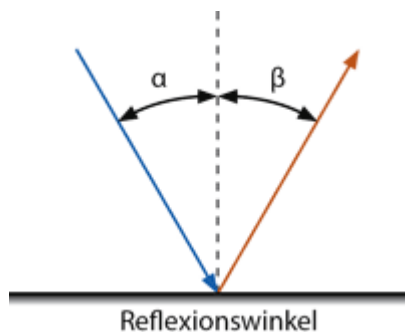


Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls

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 Lambertischen Gesetz zu sehen.

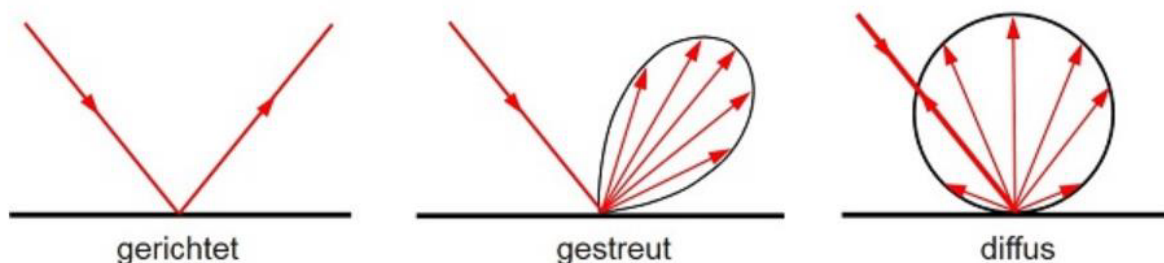


Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1]

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).

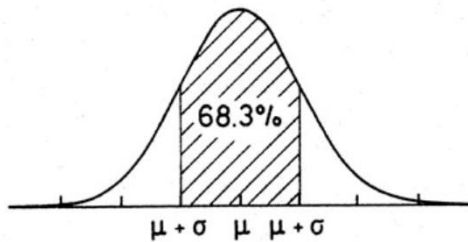


Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

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.

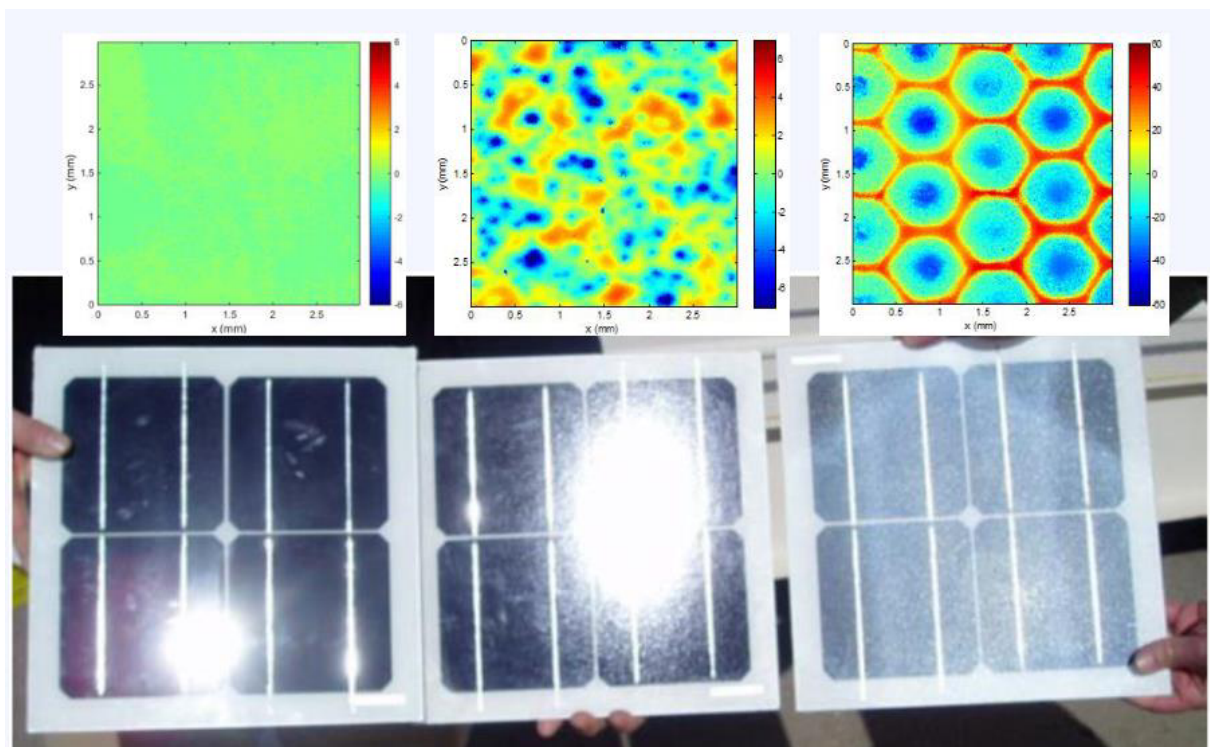


Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [2]

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.

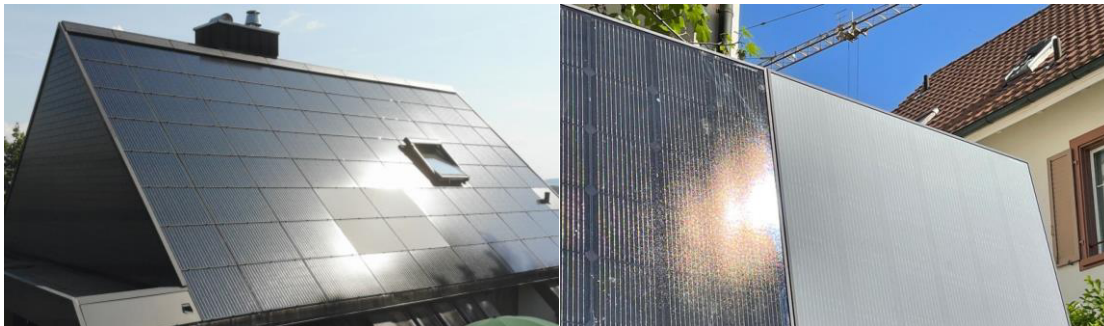


Abbildung 8: links: Module mit satinierter Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]

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.

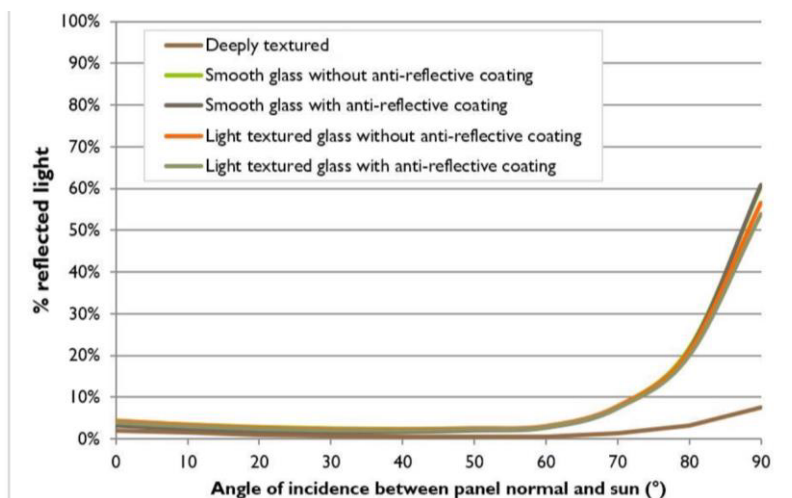


Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]

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.

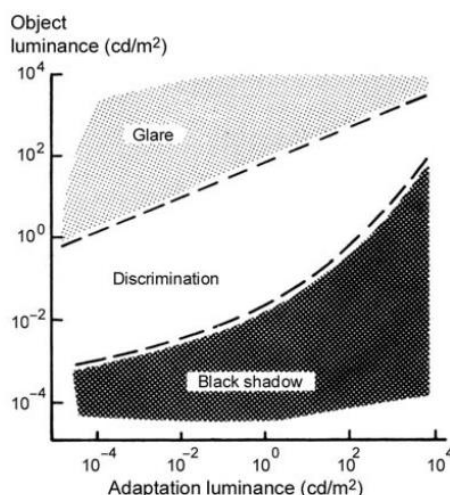


Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]

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 Hinweisepapier 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 [9].

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 [10].
- 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 [11].

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.

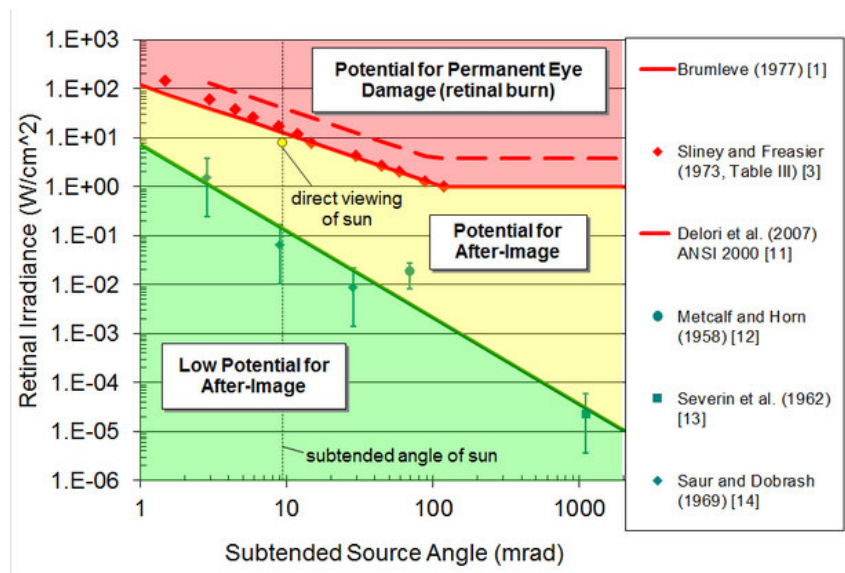


Abbildung 11: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [11]

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.

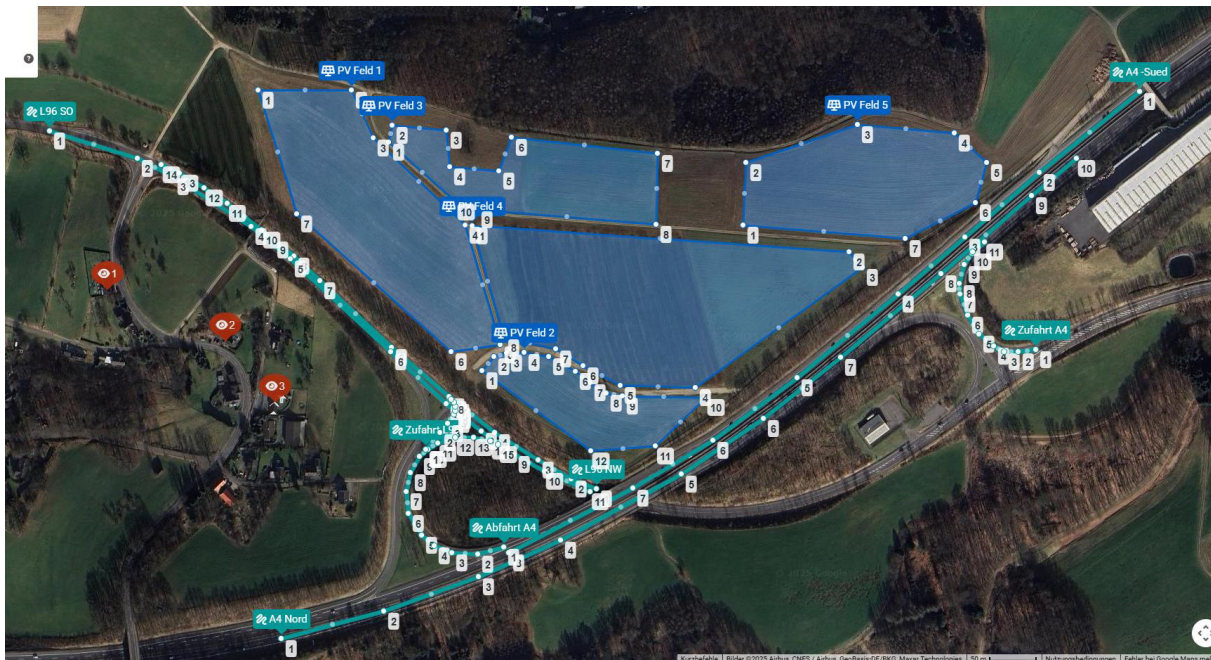


Abbildung 12: PV-Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar

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 der geplanten Anlage wurden mit einem Azimut von 180° für die Felder PV-Feld1 und PV-Feld2 sowie mit 186° für die Felder PV-Feld3, PV-Feld4 und PV-Feld5 angesetzt, wie vom Auftraggeber vorgegeben. Da das Gelände unregelmäßig ist und teilweise geneigte Flächen aufweist, wurde für jedes Teilsegment der jeweiligen PV-Flächen die Basisneigung berechnet. Diese Basisneigung hat Einfluss auf den tatsächlichen Azimut, der entsprechend in der Blendungssimulation berücksichtigt wurde. Für die Berechnung der Basisneigung wurden drei unterschiedliche Zonen pro PV-Feld ausgewertet und ein gemittelter Basisneigungswert ermittelt. Eine positive Basisneigung beschreibt dabei eine Steigung des Geländes von der linken zur rechten Seite bei frontaler Betrachtung der Modulflächen, während eine negative Basisneigung eine Neigung von der rechten zur linken Seite bezeichnet. Die für die Berechnung verwendeten Azimut- und Neigungswerte sind in Tabelle 1 dargestellt. Für alle PV-Flächen wurde ein Modulneigungswinkel von 20° angenommen. Die mittlere Modulhöhe ergibt sich zu 2 m. Als

maximale Bestrahlungsstärke auf die horizontale Fläche werden 993 W/m^2 angesetzt. Die genauen Koordinaten der Eckpunkte der PV-Flächen sind in Abbildung 2: Modulbelegungsbereiche der geplanten PV-Anlage mit Azimut Ausrichtung – Grundlage der Blendungssimulation gemäß Angaben des Auftraggebers (Quelle: Google Maps) aufgeführt.

Tabelle 1: Azimut- und Basisneigungswerte der PV-Teilflächen zur Simulationsgrundlage

	Azimut (nominell)	Modulneigung (nominell)	Basisneigung	Azimut	Modulneigung
PV-Feld 1	180	20	-2,95	172	20
PV-Feld 2	180	20	-3,24	171	20
PV-Feld 3	186	20	-2,17	174	20
PV-Feld 4	186	20	-3,55	176	20
PV-Feld 5	186	20	2,86	194	20

Tabelle 2: Koordinaten der PV-Flächen

PV-Flächen	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
PV Feld 1	1	50,97144536	7,711581381	386,3	2	388,3
	2	50,97144874	7,713002951	394,6	2	396,6
	3	50,97098933	7,713335545	399	2	401
	4	50,97015156	7,714741023	407,9	2	409,9
	5	50,96900299	7,715282829	403,6	2	405,6
	6	50,96893543	7,714526446	402,3	2	404,3
	7	50,97025628	7,712171467	391,1	2	393,1
PV Feld 2	1	50,96875328	7,715003128	401,7	2	403,7
	2	50,96888571	7,715178634	402,8	2	404,8
	3	50,9689178	7,715373095	402,8	2	404,8
	4	50,96892962	7,715639974	403,8	2	405,8
	5	50,96888908	7,716022189	404,6	2	406,6
	6	50,96874551	7,716420497	405,4	2	407,4
	7	50,96863656	7,716648485	406,4	2	408,4
	8	50,96853353	7,716896589	407,1	2	409,1
	9	50,96851157	7,71714067	407,8	2	409,8
	10	50,96849214	7,718417402	411,7	2	413,7
	11	50,96803017	7,717647608	405,5	2	407,5
	12	50,9679795	7,716656532	401,9	2	403,9
PV Feld 3	1	50,97094785	7,713571589	400,8	2	402,8
	2	50,97110999	7,713627916	401,5	2	403,5
	3	50,97106101	7,714454036	401,8	2	403,8

	4	50,97071138	7,714504998	406	2	408
	5	50,97066916	7,715258699	408,2	2	410,2
	6	50,97099683	7,7154545	403,7	2	405,7
	7	50,97083806	7,717686098	409,1	2	411,1
	8	50,97015907	7,717659276	416,7	2	418,7
	9	50,97029926	7,714926105	409	2	411
	10	50,97037189	7,714601558	407,3	2	409,3
PV Feld 4	1	50,97014598	7,714844703	408,3	0	408,3
	2	50,96989243	7,720609002	424	0	424
	3	50,96974211	7,720810168	422,9	0	422,9
	4	50,96859104	7,71826435	412	0	412
	5	50,96860793	7,717111001	408,2	0	408,2
	6	50,96879627	7,716545054	406,8	0	406,8
	7	50,96896011	7,71612663	405,5	0	405,5
	8	50,96906737	7,715328673	404,3	0	404,3
PV-Feld 5	1	50,97015318	7,718986508	423,1	2	425,1
	2	50,97074941	7,719029424	414,1	2	416,1
	3	50,97111758	7,72074063	411,9	2	413,9
	4	50,9710365	7,722221209	407,9	2	409,9
	5	50,97075106	7,722714736	411,5	2	413,5
	6	50,97036765	7,722541733	415,3	2	417,3
	7	50,97002055	7,72146885	421,4	2	423,4

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 Bundesautobahn 4 (A4), die Landstraße L96, die Zufahrt zur A4, die Abfahrt von der A4 zur L96 sowie schutzwürdige Nachbarschaften untersucht. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers. 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 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Koordinaten der zu untersuchenden Verkehrsstrecken

Verkehrsstrecken	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
A4 Fahrtrichtung Nord	1	50,96617993	7,711934823	388,5	3	391,5
	2	50,96644118	7,713495523	392,4	3	395,4
	3	50,96676888	7,714946598	396	3	399
	4	50,96712023	7,716201872	400,1	3	403,1
	5	50,96775535	7,718041867	404,4	3	407,4
	6	50,96828912	7,719305188	410,7	3	413,7
	7	50,968882	7,720477313	413,7	3	416,7
	8	50,96968093	7,722016901	412,3	3	415,3
	9	50,97043088	7,723395557	414,7	3	417,7
	10	50,97079233	7,724087567	416	3	419
A4 Fahrtrichtung Süd	1	50,97143329	7,725052452	417,2	3	420,2
	2	50,97065465	7,723518228	414,8	3	417,8
	3	50,97003477	7,722375607	413,3	3	416,3
	4	50,96948751	7,721361732	411,8	3	414,8
	5	50,96868688	7,71981678	409,7	3	412,7
	6	50,96808218	7,718526494	405,9	3	408,9
	7	50,96762442	7,717303406	402,1	3	405,1
	8	50,96700216	7,715407706	397,7	3	400,7
L96 Fahrtrichtung Nordwest	1	50,9676192	7,716748641	399,9	3	402,9
	2	50,96771379	7,716358379	399,7	3	402,7
	3	50,96789031	7,715855465	396,6	3	399,6
	4	50,96815381	7,715196983	394,3	3	397,3
	5	50,96850164	7,714490994	392,6	3	395,6
	6	50,96897784	7,713616207	390,7	3	393,7
	7	50,96961632	7,712524548	388,2	3	391,2
	8	50,96985348	7,712118782	388	3	391
	9	50,97000887	7,711804963	386,5	3	389,5
	10	50,97010346	7,71163062	386	3	389
	11	50,97036102	7,711105495	381,7	3	384,7
	12	50,97050966	7,710751443	377,7	3	380,7
	13	50,97064816	7,710375934	375,2	3	378,2
	14	50,9707343	7,71009162	374	3	377
L96 Fahrtrichtung Südost	1	50,9710582	7,708394572	367,4	3	370,4
	2	50,97079133	7,709730312	372,4	3	375,4
	3	50,97061567	7,710277483	374,6	3	377,6
	4	50,97013936	7,711468383	385,6	3	388,6
	5	50,96982605	7,71206868	387,8	3	390,8
	6	50,96893501	7,713598956	390,8	3	393,8
	7	50,96843166	7,714446256	391,8	3	394,8
	8	50,96816985	7,71498538	393,3	3	396,3

Abfahrt A4	9	50,96794857	7,715495	396,6	3	399,6
	10	50,96778641	7,715948293	398	3	401
	11	50,96758878	7,716653714	399,1	3	402,1
	1	50,96705688	7,715333895	397,6	3	400,6
	2	50,96698762	7,714931564	396,3	3	399,3
	3	50,96699945	7,714542643	395	3	398
	4	50,96707039	7,714269058	394,7	3	397,7
	5	50,96717343	7,714073257	394,4	3	397,4
	6	50,9673812	7,713874773	395,4	3	398,4
	7	50,96758727	7,713839904	393,2	3	396,2
	8	50,9677697	7,713904277	392,9	3	395,9
	9	50,96792848	7,714043752	392,8	3	395,8
	10	50,96799267	7,714169816	393,1	3	396,1
	11	50,96805854	7,714325384	393,5	3	396,5
	12	50,96811091	7,714596287	394,1	3	397,1
Zufahrt L96	13	50,9681126	7,714869873	394,3	3	397,3
	14	50,96807544	7,715130047	395,1	3	398,1
	15	50,96804165	7,715248064	395,5	3	398,5
	1	50,96799362	7,714140587	392,9	3	395,9
	2	50,96815915	7,714352482	392,8	3	395,8
	3	50,96824192	7,714469158	392,4	3	395,4
	4	50,96833567	7,714565718	392	3	395
	5	50,96836776	7,714585834	391,9	3	394,9
Zufahrt A4	6	50,96840408	7,714589857	391,9	3	394,9
	7	50,96844715	7,714567059	392,5	3	395,5
	8	50,96847502	7,714524143	392,5	3	395,5
	1	50,96895494	7,723464798	410,6	3	413,6
	2	50,96893129	7,723196577	410,2	3	413,2
	3	50,96893467	7,722982001	410,3	3	413,3
	4	50,96898872	7,722815704	410,3	3	413,3
	5	50,9691002	7,722595762	410,6	3	413,6
	6	50,96928263	7,722424101	410,9	3	413,9
	7	50,96948532	7,722306084	412	3	415
	8	50,96958666	7,722289991	411,9	3	414,9
	9	50,96976908	7,722370457	413	3	416
	10	50,96989407	7,722493838	413,7	3	416,7
	11	50,96998866	7,722676229	414,1	3	417,1

Tabelle 4: Koordinaten der zu untersuchenden Beobachtungspunkte

Beobachtungs- punkte	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
-------------------------	--------------------	-------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Wohnhaus 1	50,96957692	7,709264822	373,7	4,7	378,4
Wohnhaus 2	50,96908032	7,711067266	381,4	4,7	386,1
Wohnhaus 3	50,96849589	7,711834378	386,4	4,7	391,1

6.3 Topologie des Geländes

Zur Darstellung wichtiger Sichtunterbrechungen wurden die in Abbildung 13 gezeigten Hindernisse mit in die Simulation aufgenommen. Die genauen Koordinaten sind in der Tabelle 5 angegeben.



Abbildung 13: Topologie des Geländes (Quelle: ForgeSolar)

Tabelle 5: Koordinaten der Sichtunterbrechungen

Sichtunterbrechungen	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]
Sichtunterbrechung 1	1	50,97072277	7,710588067	377,3
	2	50,97038834	7,711489289	385
	3	50,97001675	7,712271153	390,8
	4	50,96960124	7,712969868	392,9
	5	50,96907086	7,713876455	397,2
	6	50,9683209	7,715276568	397,6
	7	50,96808442	7,715780824	398,1
	8	50,96778376	7,716537206	400,2
	9	50,96776264	7,717152773	402,6
	10	50,96835806	7,718699067	410

Sichtunterbrechung 2	1	50,96835987	7,718698891	400
	2	50,96881374	7,719626129	405
	3	50,96966082	7,721220702	408,6
	4	50,9702393	7,722459856	405
	5	50,97040314	7,722773675	404
	6	50,97057542	7,723087493	404
	7	50,97072743	7,723420087	404,6

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 6 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.

Basierend auf den Ergebnissen der Blendungssimulation kann ein mögliches Gefährdungspotenzial für die Verkehrsteilnehmenden auf der A4, der L96 sowie den betrachteten Zu- und Abfahrten ausgeschlossen werden. Auch für die untersuchten schutzwürdigen Nachbarschaften ist keine relevante Belästigung durch Blendung zu erwarten. Entsprechend sind keine Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

Tabelle 6: Simulationsergebnisse nach Filterung der Ergebnisse

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten
A4 Fahrtrichtung Nord	0	0
A4-Richtung Süd	0	0
L96 Fahrtrichtung Nordwest	0	0
L96 Fahrtrichtung Südost	0	0
Zufahrt A4	0	0
Abfahrt A4	0	0
Zufahrt L96	0	0
Wohnhaus 1	0	0
Wohnhaus 2	0	0
Wohnhaus 3	0	0

8 Zusammenfassung

Es wurde die potenzielle Blendung durch Reflexion der Sonne an PV-Modulen der geplanten PV-Anlage Hespert-Buchen für den Verkehr auf der angrenzenden Bundesautobahn A7, der Landstraße L96 sowie den betrachteten Zu- und Abfahrten und angrenzenden schutzwürdigen Nachbarschaften untersucht.

Das Gutachten kommt zu dem Schluss, dass es auf Basis der Strahlengeometrie zu keinen Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten auf der Bundesautobahn A4, der Landstraße L96 sowie den betrachteten Zu- und Abfahrten kommen kann. Auch für die benachbarten schutzwürdigen Wohnbereiche ist keine relevante Beeinträchtigung durch Blendung zu erwarten. Eine Gefährdung der Verkehrssicherheit sowie der Wohnqualität durch Reflexionen an den Modulflächen kann somit ausgeschlossen werden. Es sind keine Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

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

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modulflächen der geplanten PVA in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth).....	3
Abbildung 2: Modulbelegungsbereiche der geplanten PV-Anlage mit Azimutausrichtung – Grundlage der Blendungssimulation gemäß Angaben des Auftraggebers (Quelle: Google Maps).....	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 satinierter Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]	7
Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]	7
Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]	8
Abbildung 11: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [11]	11
Abbildung 12: PV-Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar	12
Abbildung 13: Topologie des Geländes (Quelle: ForgeSolar).....	17

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.

12 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.