

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

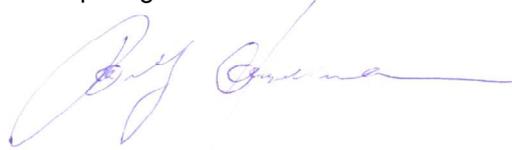
Fachgutachten zur Bewertung der Blendwirkung durch Reflexion an PV-Modulen (Blendgutachten) für den Solarpark Bennstedt

Anlage: Solarpark Bennstedt
51.493809°, 11.836081°
06198 Bennstedt, Gemeinde Salzatal

in Auftrag gegeben von: SolarPark BENNSTEDT GmbH
Lehmweg 17
20251 Hamburg

Projektnummer: A-LV25/0088

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ralf Haselhuhn', written over the printed name.

Bearbeiter: M. Sc. Jessica Grunert

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Grunert', written over the printed name.

Berlin, 18.04.2025

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.....	16
	6.3 Topologie des Geländes.....	18
7	Ergebnisse mit ForgeSolar.....	20
8	Zusammenfassung.....	22
9	Literaturverzeichnis	23
10	Abbildungsverzeichnis.....	24
11	Gewährleistung	25
12	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) Bennstedt 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 nordöstlich des Ortsteils Bennstedt der Einheitsgemeinde Salzatal im Saalekreis in Sachsen-Anhalt. Westlich des Solarparks liegt die geplante Bundesautobahn 143 (A143) an, südlich befindet sich eine Kleingartenanlage und südwestlich die Ortschaft Bennstedt auf der anderen Seite der geplanten A143. Die PVA ist auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen geplant. Das Gelände ist nicht eben: laut den Google Earth Daten und Vermessungsdaten des Auftraggebers, dargestellt in Abbildung 2, fällt es hauptsächlich in Richtung Westen und Nordwesten um bis zu +3° (positive Steigung von linker zu rechter Seite bei frontalem Blick auf die Modulflächen) ab. Eine Übersicht über die nähere Umgebung der PV-Anlage wird in Abbildung 1 gegeben. Es gab keinen Ortstermin.



Abbildung 1: Modulfläche der geplanten PVA in Blau, Streckenverlauf der geplanten A143 in Weiß und Umgebung (Quelle: Google Earth)

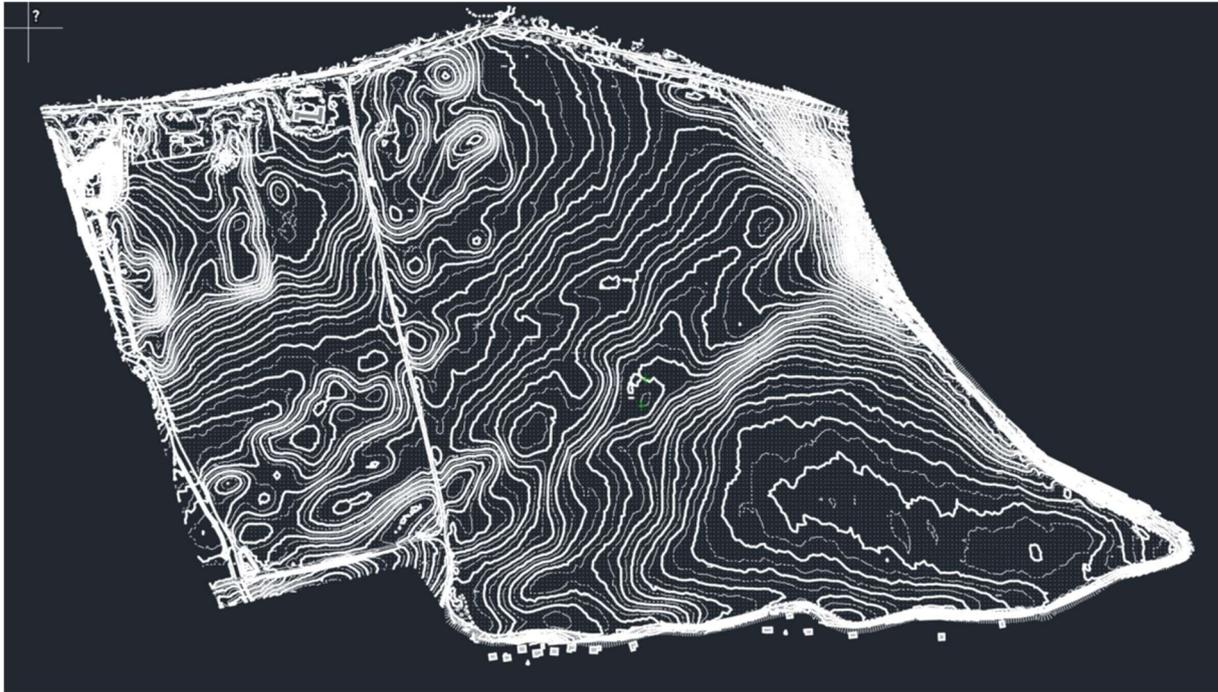


Abbildung 2: Vermessungsdaten des Geländes (Quelle: Auftraggeber)

3 Beschreibung der PV-Anlage

Die PVA ist auf einer Fläche von ca. 50,8 ha und mit einer DC-Leistung von 71,41 MWp geplant. Vorgesehen ist eine Süd-Ausrichtung mit 180° Azimut und einem Neigungswinkel von 11° . Der Belegungsplan ist in Abbildung 3 dargestellt. Als Unterkonstruktion kommt ein 2-Pfeiler-System zum Einsatz mit drei im Querformat (landscape) 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 4 dargestellt.

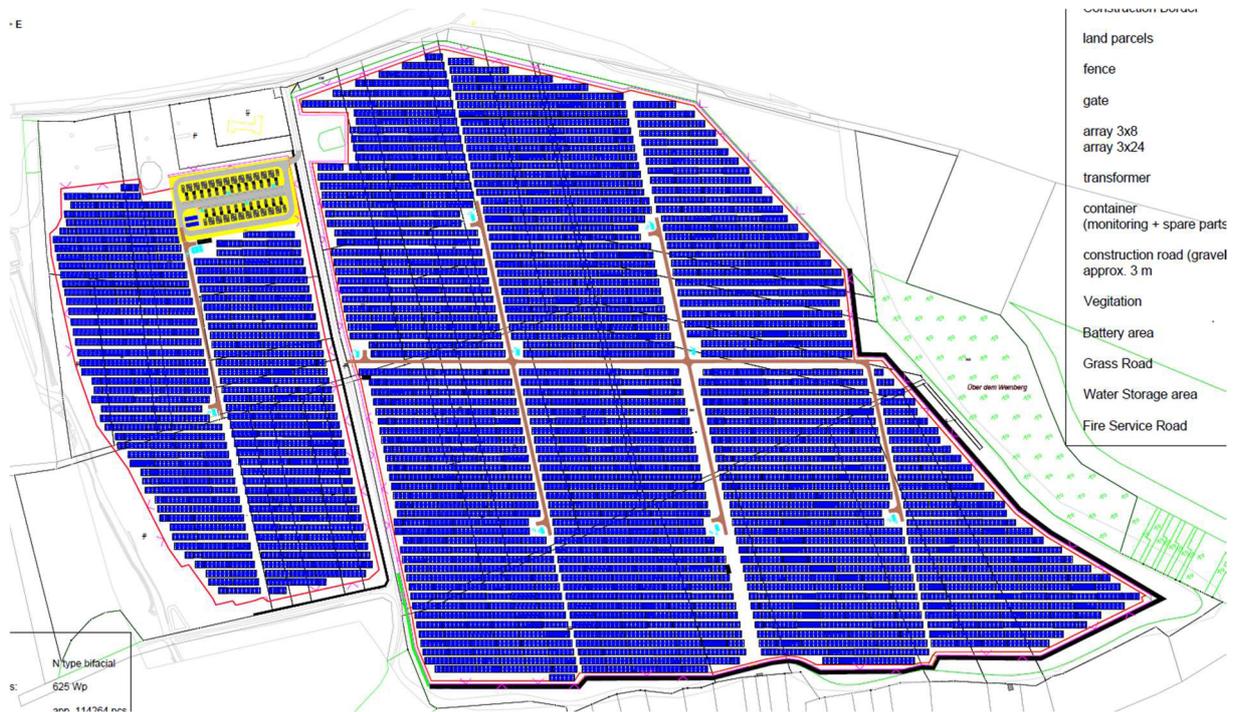


Abbildung 3: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)

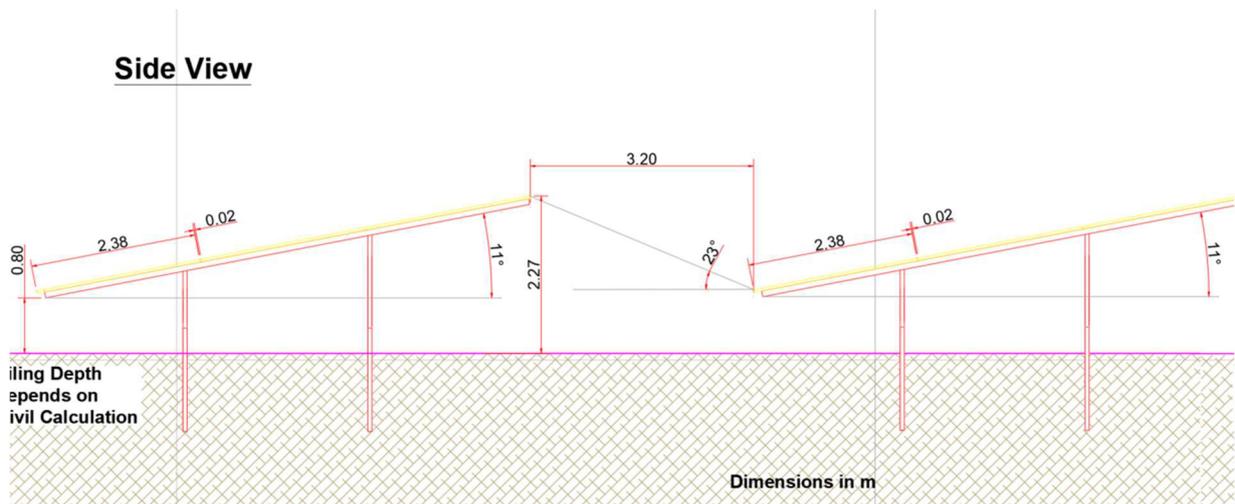


Abbildung 4: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)

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 ($\alpha = \beta$).

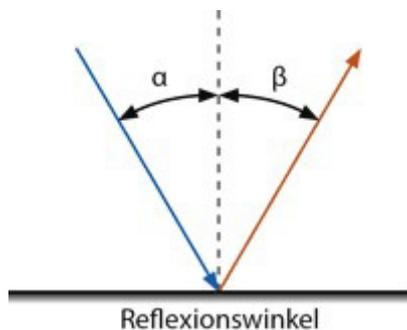


Abbildung 5: Reflexion eines Lichtstrahls

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 6 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.

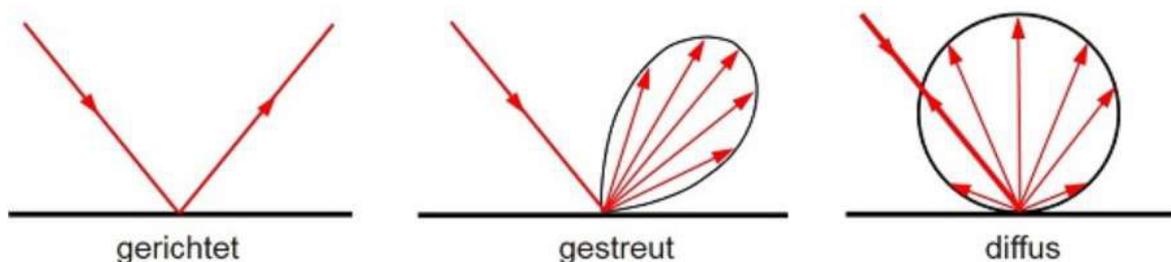


Abbildung 6: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1]

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 7).

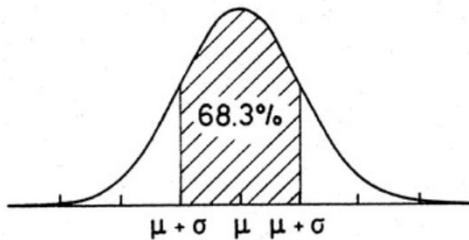


Abbildung 7: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen

Entscheidend für die Reflexionseigenschaften eines PV-Moduls ist die Oberflächenstruktur des Glases. In Abbildung 8 sind Messungen der Oberflächenstruktur und Bilder der auftretenden Reflexion für drei unterschiedlich stark texturierte Frontgläser zu sehen.

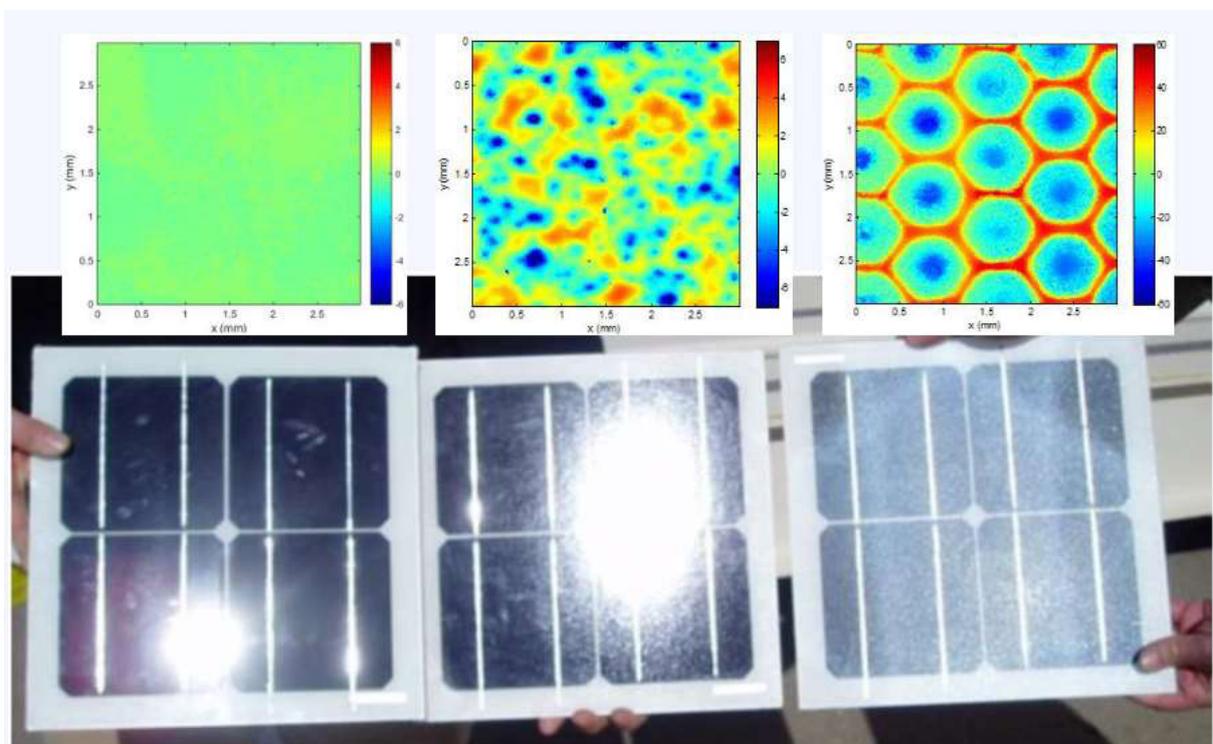


Abbildung 8: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [2]

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 9.

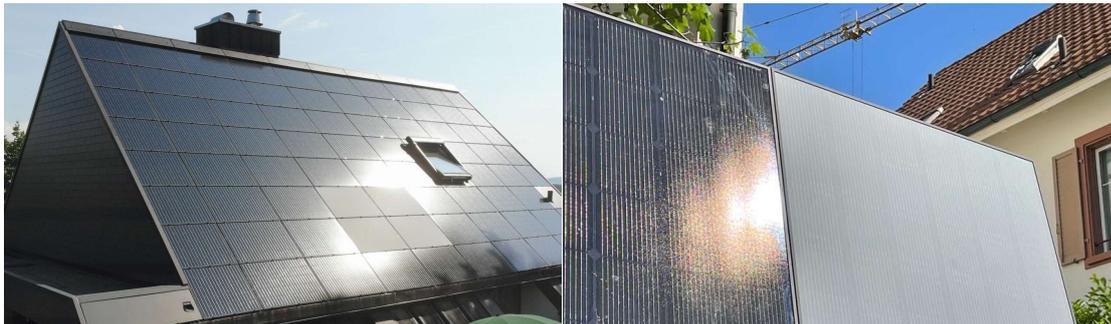


Abbildung 9: links: Module mit satinierter Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]

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 10 zu sehen ist. Ausnahmen sind hier nur tief texturierte Module.

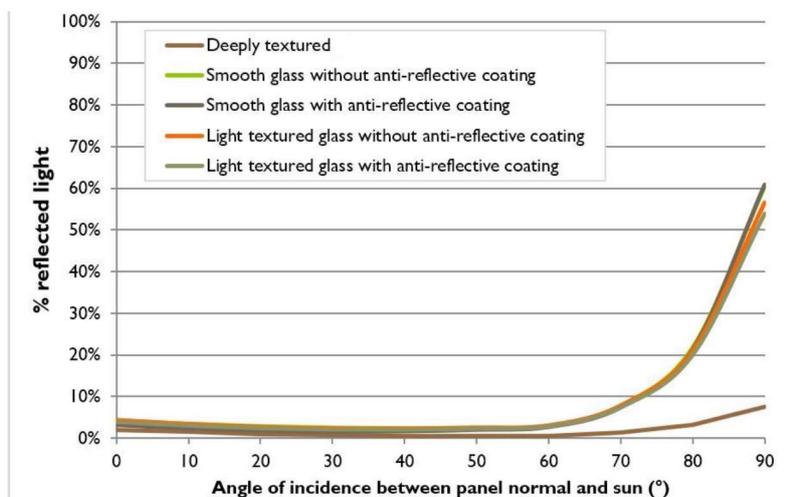


Abbildung 10 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]

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 11 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.

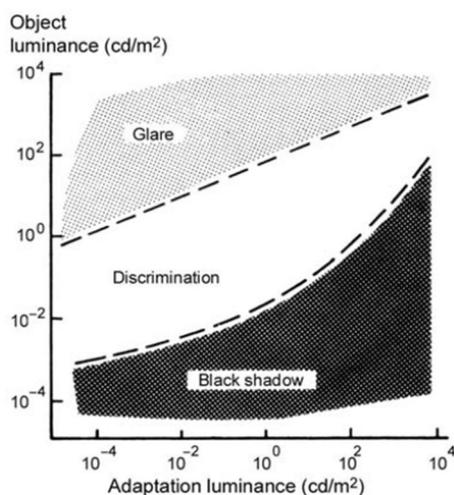


Abbildung 11: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]

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 [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 12 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.

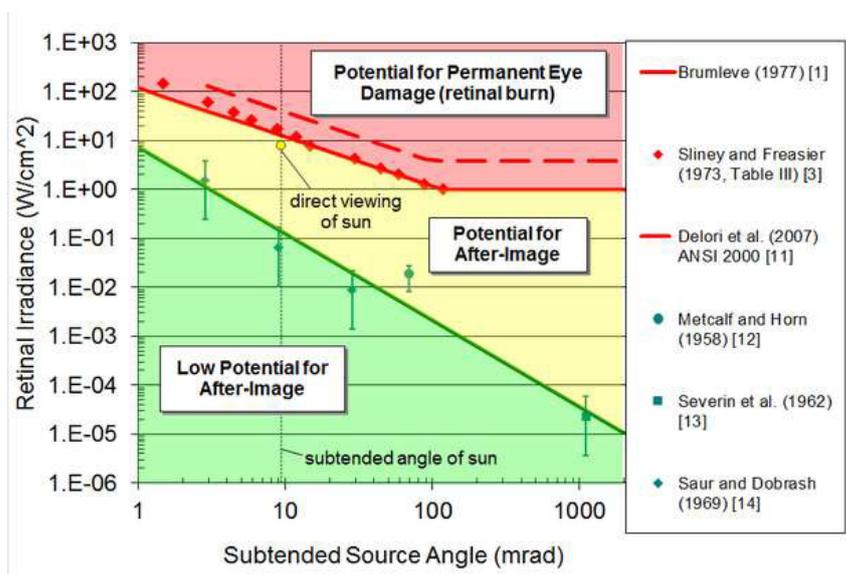


Abbildung 12: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [11]

6 Simulation mit ForgeSolar

Dieses Kapitel stellt die Simulationsparameter dar. Es werden die Eingabedaten und Simulationsparameter für die PV-Fläche und die zu untersuchenden Immissionsorte aufgeführt. In Abbildung 13 und Abbildung 14 ist eine Übersicht über die angelegte Simulation dargestellt.



Abbildung 13: Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar (1/2)

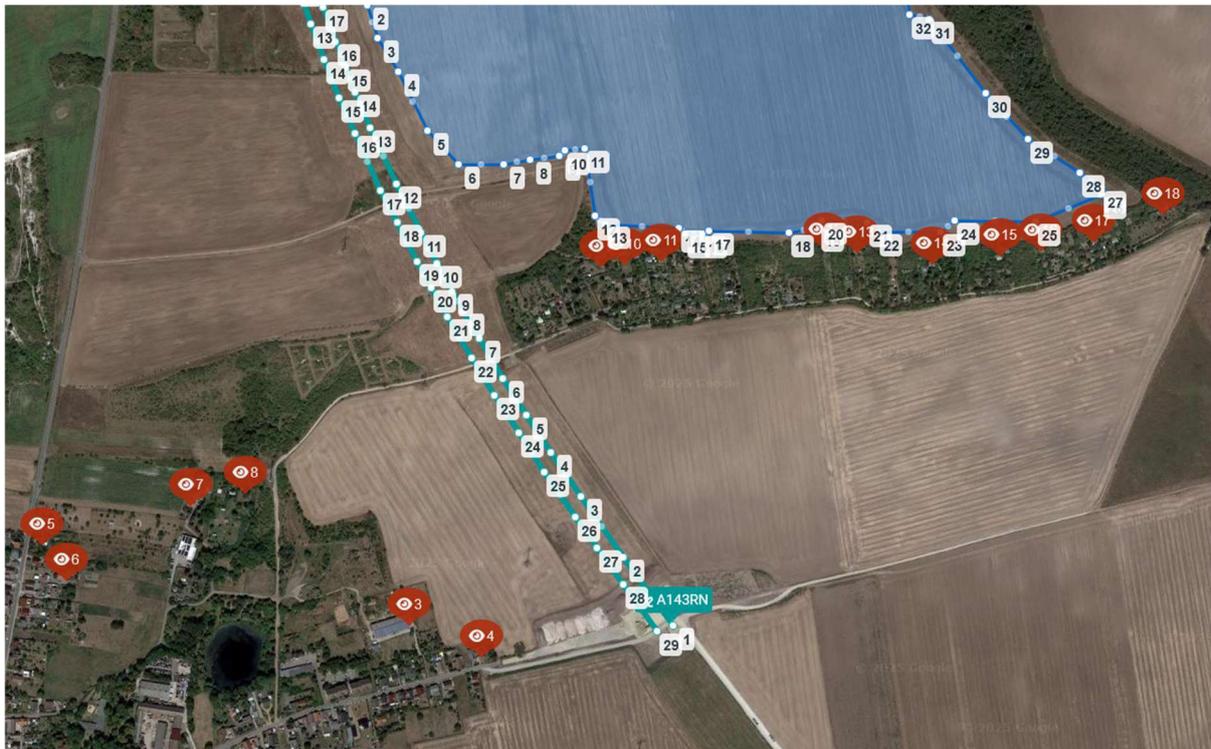


Abbildung 14: Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar (2/2)

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-Fläche wird mit 180° Azimut und 11° Neigungswinkel simuliert. Die mittlere Modulhöhe ergibt sich zu 1,5 m. Als maximale Bestrahlungsstärke auf die horizontale Fläche werden 1000 W/m² angesetzt. Die genauen Koordinaten der Eckpunkte der PV-Fläche sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Koordinaten der PV-Fläche

PV-Fläche	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
PV-Feld	1	51,49575794	11,83185939	115,9	1,5	117,4
	2	51,49436525	11,83222417	117,9	1,5	119,4
	3	51,49390147	11,83247627	120,5	1,5	122
	4	51,49341719	11,83293225	122,4	1,5	123,9
	5	51,49257468	11,83360706	121,3	1,5	122,9
	6	51,49210374	11,83430443	121,8	1,5	123,4
	7	51,49210374	11,83533977	121,7	1,5	123,2
	8	51,49217054	11,83593522	121	1,5	122,5

9	51,49222064	11,83660577	120,9	1,5	122,4
10	51,4923008	11,83673988	121,1	1,5	122,7
11	51,49232084	11,83719585	122,4	1,5	123,9
12	51,49136428	11,83742275	125,3	1,5	126,8
13	51,49123735	11,83765878	125,1	1,5	126,6
14	51,49119393	11,83933784	125,7	1,5	127,3
15	51,49110375	11,83948268	125,8	1,5	127,4
16	51,49110375	11,83987429	126	1,5	127,5
17	51,49115385	11,84001376	125,9	1,5	127,5
18	51,49112878	11,84183537	128,1	1,5	129,6
19	51,49120727	11,84253274	129	1,5	130,5
20	51,49129912	11,84258639	128,9	1,5	130,4
21	51,49127091	11,84363317	129,4	1,5	130,9
22	51,49113981	11,84386518	128,4	1,5	129,9
23	51,49114128	11,8452933	128,9	1,5	130,5
24	51,49129993	11,84563126	129	1,5	130,5
25	51,49128156	11,84745785	130,1	1,5	131,6
26	51,49166483	11,84896659	130,1	1,5	131,6
27	51,49174833	11,84896793	130,1	1,5	131,6
28	51,49197295	11,84848647	130,5	1,5	132
29	51,49245382	11,84728797	129,6	1,5	131,1
30	51,49311962	11,84633598	128,1	1,5	129,6
31	51,49417395	11,84504979	125,4	1,5	126,9
32	51,49423907	11,84459918	125,5	1,5	127,1
33	51,49512183	11,84441786	117,9	1,5	119,5
34	51,49617132	11,84302244	122	1,5	123,5
35	51,49668063	11,84232775	121,9	1,5	123,4
36	51,49686488	11,84188999	121,7	1,5	123,3
37	51,49696817	11,84107086	122,8	1,5	124,4
38	51,49744477	11,83808249	121,1	1,5	122,6
39	51,49699303	11,83584889	120	1,5	121,5
40	51,49692456	11,835869	120	1,5	121,5
41	51,49690369	11,83663343	118,3	1,5	119,8
42	51,49642391	11,83666392	118	1,5	119,5
43	51,49639385	11,83610602	118,5	1,5	120
44	51,49569223	11,83599663	118,8	1,5	120,4
45	51,49571291	11,83493296	118,1	1,5	119,7
46	51,49565029	11,83443676	118	1,5	119,5
47	51,49548164	11,8344381	117,7	1,5	119,2
48	51,49551377	11,83402829	117,8	1,5	119,3
49	51,49605265	11,833738	117	1,5	118,5
50	51,49607019	11,83335177	117,1	1,5	118,6
51	51,49625282	11,83324523	117,5	1,5	119
52	51,49618603	11,83205433	117,7	1,5	119,2

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.

Für die optischen Eigenschaften der Moduloberfläche wurde für die Simulation mit Beobachtungspunkten ein glattes Glas mit einer Rauigkeit (auf Englisch: slope error) von 0 mrad gewählt, um den Ansatz der LAI [7] (ideale Verspiegelung) nachzubilden.

6.2 Immissionsorte

Als relevante Immissionsorte werden die Gebäude im Nordwesten der PVA, die Kleingartenanlage im Süden der PVA und die der PVA nächstgelegenen Gebäude der Ortschaft Bennstedt untersucht. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers, sowie Satellitenbilder von August 2022. 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 und Tabelle 3 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]
A143 Fahrtrichtung Norden	1	51,48551742	11,83920651	98,9	3	101,9
	2	51,48649283	11,83805853	95,8	3	98,8
	3	51,4873587	11,837096	95,5	3	98,5
	4	51,48798334	11,83642008	97,1	3	100,1
	5	51,48852424	11,83586127	99,6	3	102,6
	6	51,48904532	11,83533288	100,7	3	103,7
	7	51,48961837	11,83478206	108,7	3	111,7
	8	51,49000704	11,83442149	116,8	3	119,8
	9	51,49028594	11,83416936	117,4	3	120,4
	10	51,4906786	11,83382254	116,1	3	119,1
	11	51,49112116	11,83344872	118,7	3	121,7
	12	51,49181422	11,83289082	123,6	3	126,6
	13	51,4926254	11,83229878	123,1	3	126,1
	14	51,49313265	11,83195419	122,1	3	125,1
	15	51,49348719	11,83173072	121,4	3	124,4
	16	51,49384623	11,83151212	119,9	3	122,9
	17	51,49434645	11,83122369	116,7	3	119,7
	18	51,49510419	11,83083686	115,2	3	118,2

	19	51,49573709	11,83054084	114	3	117
	20	51,49626142	11,83032626	115,6	3	118,6
	21	51,49684602	11,83010568	119,7	3	122,7
	22	51,49751394	11,82989647	117,4	3	120,4
	23	51,49814513	11,82973017	115,1	3	118,1
	24	51,49900787	11,82956417	119	3	122
	25	51,49976927	11,82943543	120,2	3	123,2
	26	51,50062082	11,82937105	120,7	3	123,7
	27	51,50126896	11,82935891	121,1	3	124,1
A143 Fahrtrichtung Süden	1	51,50127035	11,82900123	121,6	3	124,6
	2	51,50070633	11,829014	121,5	3	124,5
	3	51,50007852	11,82904082	120,6	3	123,6
	4	51,49948582	11,8291049	119,8	3	122,8
	5	51,49891811	11,82919074	118,3	3	121,3
	6	51,49839755	11,82930196	116,5	3	119,5
	7	51,49788493	11,82942534	115,3	3	118,3
	8	51,49742389	11,82954773	116,1	3	119,1
	9	51,49676347	11,82975292	118,8	3	121,8
	10	51,49617786	11,82997294	115,8	3	118,8
	11	51,49534126	11,83031895	114,3	3	117,3
	12	51,49470084	11,8306268	115,5	3	118,5
	13	51,49409633	11,83095403	117,6	3	120,6
	14	51,49358867	11,83125444	119,9	3	122,9
	15	51,49304906	11,83159561	121,2	3	124,2
	16	51,49253831	11,83194466	123,3	3	126,3
	17	51,49172854	11,83254133	123,6	3	126,6
	18	51,49126761	11,83290879	120,2	3	123,2
	19	51,49071417	11,83336331	116,2	3	119,2
	20	51,49033507	11,8336959	115,2	3	118,2
	21	51,48992371	11,83406388	115,6	3	118,6
	22	51,48932762	11,83462415	103,2	3	106,2
	23	51,48880496	11,83513635	100,4	3	103,4
	24	51,48826826	11,83568089	99,1	3	102,1
	25	51,48770208	11,83627366	97,3	3	100,3
	26	51,48705856	11,83697807	95,5	3	98,5
	27	51,4866216	11,83746522	95,4	3	98,4
	28	51,48609382	11,83807139	96,1	3	99,1
	29	51,48542572	11,83884387	98,4	3	101,4

Tabelle 3: Koordinaten der zu untersuchenden Beobachtungspunkte

Beobachtungspunkte	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]	
Gebäude Ortschaft	1	51,49712723	11,82533101	115,1	7,7	122,8
	2	51,49700184	11,82539376	114,9	1,7	116,6
	3	51,48559998	11,83317033	94	4,7	98,7
	4	51,48515616	11,83482367	97	7,7	104,7
	5	51,48675877	11,82480669	99,7	4,7	104,4
	6	51,48624435	11,82535922	96,6	1,7	98,3
	7	51,48732059	11,82820744	96	4,7	100,7
	8	51,4874917	11,82945116	92,8	4,7	97,5
Kleingärten	9	51,4907362	11,83756907	120,8	1,7	122,5
	10	51,49083808	11,83834959	124,3	1,7	126
	11	51,49080635	11,83963705	125,6	1,7	127,3
	12	51,49101569	11,84268011	128	1,7	129,7
	13	51,49092551	11,84339358	127,1	1,7	128,8
	14	51,49076184	11,84512285	121,1	1,7	122,8
	15	51,49089813	11,84669496	127	1,7	128,7
	16	51,49096155	11,84760984	127,7	1,7	129,4
	17	51,49106843	11,84879868	124,4	1,7	126,1
	18	51,49147258	11,85035972	119,8	1,7	121,5

6.3 Topologie des Geländes

Um die Topologie des Geländes (starker Abfall zwischen PV-Anlage und Kleingärten) wiederzugeben, wurde die in der Abbildung 15 dargestellte Sichtunterbrechung gezeichnet. Die genauen Koordinaten sind in der Tabelle 4 angegeben.

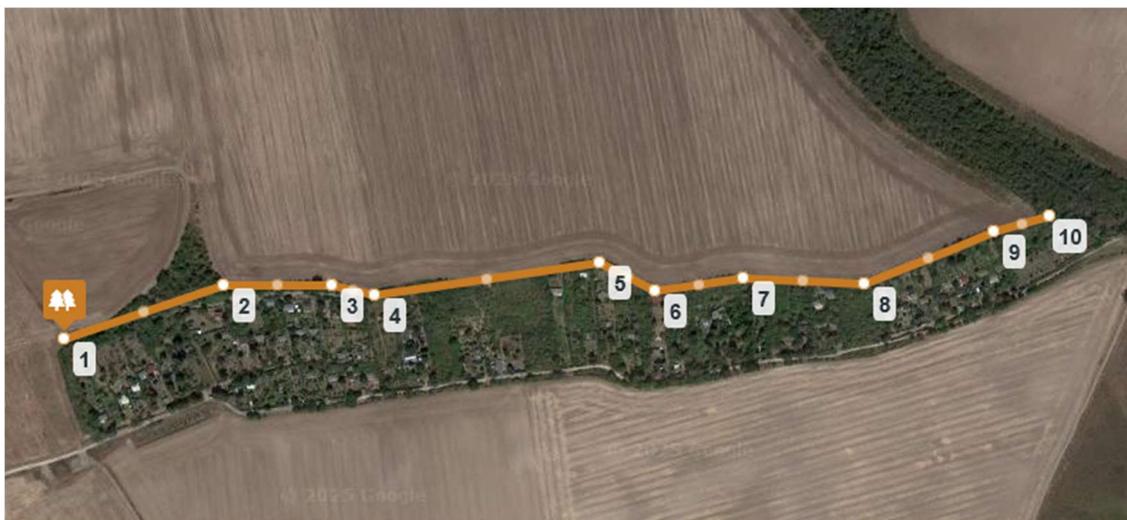


Abbildung 15: Sichtunterbrechung Topologie des Geländes (Quelle: ForgeSolar)

Tabelle 4: Koordinaten der Sichtunterbrechung

Sichtunterbrechung	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]
Sichtunterbrechung	1	51,49041843	11,83535012	121,3
	2	51,49091276	11,83774265	124,8
	3	51,4909662	11,83908375	125,3
	4	51,49087268	11,83985623	125,3
	5	51,49091944	11,84170159	125,9
	6	51,49117329	11,84331091	129,6
	7	51,49091276	11,84417458	127,4
	8	51,49104637	11,84547277	128,5
	9	51,49096286	11,84750589	128
	10	51,49160416	11,84998425	129,4

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 5 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 5: Simulationsergebnisse nach Filterung der Ergebnisse

Immissionsort		Potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten
A143 Fahrtrichtung Norden		0	0
A143 Fahrtrichtung Süden		0	0
Gebäude Ortschaft	Beobachtungspunkt 1	0	0
	Beobachtungspunkt 2	0	0
	Beobachtungspunkt 3	0	0
	Beobachtungspunkt 4	0	0
	Beobachtungspunkt 5	0	0
	Beobachtungspunkt 6	0	0
	Beobachtungspunkt 7	0	0
	Beobachtungspunkt 8	0	0
Kleingärten	Beobachtungspunkt 9	0	0
	Beobachtungspunkt 10	0	0
	Beobachtungspunkt 11	2	4
	Beobachtungspunkt 12	14	13
	Beobachtungspunkt 13	1	2
	Beobachtungspunkt 14	0	0
	Beobachtungspunkt 15	0	0
	Beobachtungspunkt 16	0	0
	Beobachtungspunkt 17	0	0
	Beobachtungspunkt 18	0	0

A143

Es treten keine Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer auf der geplanten A143 auf.

Gebäude Ortschaft (Beobachtungspunkte 1-8)

Es treffen keine relevanten Reflexionen auf die untersuchten Gebäude der Ortschaft Bennstedt.

Kleingärten (Beobachtungspunkte 9-18)

Am höchsten sind die möglichen täglichen und jährlichen Reflexionsdauern hier für Beobachtungspunkt 12, die anderen Beobachtungspunkte weisen keine oder nur wesentlich geringere mögliche Reflexionsdauern auf und werden daher nicht separat betrachtet.

Die Ergebnisse der Simulation für den Beobachtungspunkt 12 sind in Abbildung 16 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 26.05. bis zum 20.07. von 5:17 Uhr bis 5:33 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 63° - 66° auf. Weiter tritt potenzielle Blendung vom 03.05. bis zum 08.08. von 18:37 Uhr bis 19:10 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 287° - 297° auf. Es werden potenzielle tägliche Blenddauern bis 13 Minuten und potenzielle jährliche Blenddauern bis 14 Stunden erreicht.

Es wird festgestellt, dass die täglichen und jährlichen potenzielle Blenddauern deutlich unterhalb der Grenzwerte gemäß LAI-Hinweisen liegen. Zudem befinden sich Bäume und Sträucher zwischen der PVA und den Kleingärten, die im Sommerhalbjahr und damit im Zeitraum möglicher Reflexionen als effektive Sichtunterbrechung einzustufen sind. Eine erhebliche Beeinträchtigung wird daher ausgeschlossen.

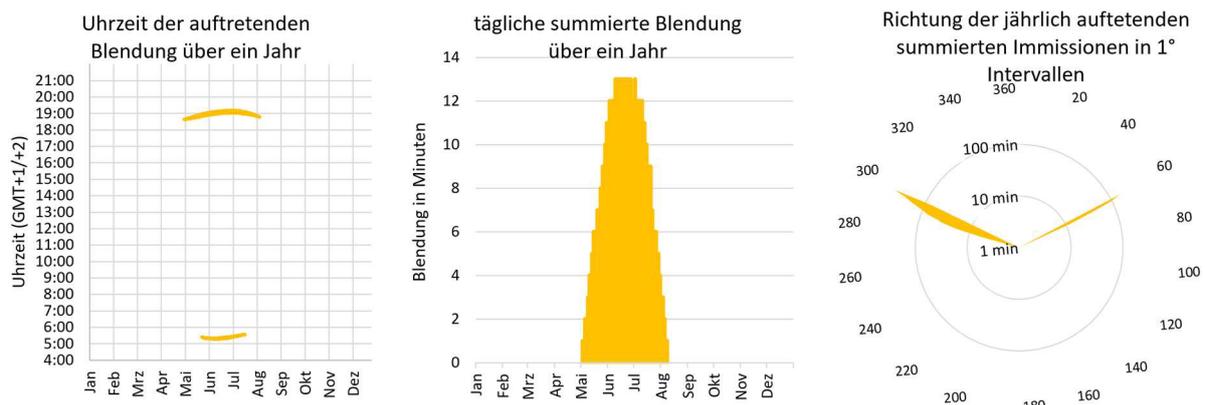


Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf Beobachtungspunkt 12

8 Zusammenfassung

Es wurde die potenzielle Blendung durch Reflexion der Sonne an PV-Modulen der geplanten PV-Anlage Bennstedt für den Verkehr der geplanten anliegenden Bundesautobahn 143 (A143), die Gebäude der Ortschaft Bennstedt, sowie die Kleingartenanlage im Süden der PVA untersucht.

Das Gutachten kommt zu dem Schluss, dass es auf Basis der Simulationen durch die Modulflächen der PVA zu keinen Reflexionen auf die Gebäude der Ortschaft Bennstedt kommen kann.

Zudem wurde ermittelt, dass es zu Reflexionen auf die Kleingartenanlage im Süden der PVA kommen kann. Die maximalen jährlichen und täglichen Blenddauern liegen jedoch unter den Grenzwerten nach den LAI-Hinweisen. Somit kann eine erhebliche Beeinträchtigung durch Blendung ausgeschlossen werden und es werden keine Blendschutzmaßnahmen für notwendig erachtet.

Weiter wird festgestellt, dass es zu keinen Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten auf der A143 kommen kann. Eine Gefährdung der Verkehrssicherheit durch Reflexionen an den Modulflächen wird damit ausgeschlossen.

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 Windnergieranlagen (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: Modulfläche der geplanten PVA in Blau, Streckenverlauf der geplanten A143 in Weiß und Umgebung (Quelle: Google Earth).....	3
Abbildung 2: Vermessungsdaten des Geländes (Quelle: Auftraggeber)	4
Abbildung 3: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)	5
Abbildung 4: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)	5
Abbildung 5: Reflexion eines Lichtstrahls.....	6
Abbildung 6: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1].....	6
Abbildung 7: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung	7
Abbildung 8: 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 9: links: Module mit satiniertes Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]	8
Abbildung 10 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]	8
Abbildung 11: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]	9
Abbildung 12: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [11]	12
Abbildung 13: Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar (1/2).....	13
Abbildung 14: Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar (2/2).....	14
Abbildung 15: Sichtunterbrechung Topologie des Geländes (Quelle: ForgeSolar)	18
Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf Beobachtungspunkt 12.....	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.

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.