

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

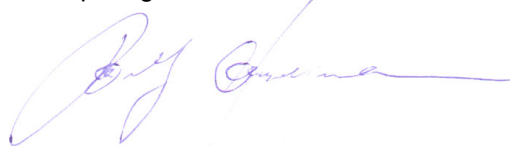
Fachgutachten zur Bewertung der Blendwirkung durch Reflexion an PV-Modulen (Blendgutachten) für den Solarpark Klein Rheide

Anlage: Solarpark Klein Rheide
54.444841°, 9.476047°
24864, Klein Rheide

in Auftrag gegeben von: Wattmanufactur GmbH & Co.KG
Osterhof. Gotteskoogdeich 32
25899 Galmsbüll

Projektnummer: A-GmbH25/0041

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

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

Bearbeiter: Dany Aubin Dongmezo Mouaffo

Berlin, 30.09.2025

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Dany Aubin Dongmezo Mouaffo', written over a faint, illegible printed name.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Beschreibung der Umgebung	3
3	Beschreibung der PV-Anlage.....	5
4	Grundlagen der Optik.....	7
	4.1 Geometrische Reflexionssituation.....	7
	4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen	8
	4.3 Blendung.....	10
5	Methodik der Untersuchung mit ForgeSolar	11
	5.1 Bewertungsbasis	11
	5.2 Simulationstool und Modellierung	12
	5.3 Simulationsausgabe und -bewertung	13
6	Simulation mit ForgeSolar	14
	6.1 PV-Anlage.....	15
	6.2 Immissionsorte.....	17
7	Ergebnisse mit ForgeSolar.....	21
	7.1 Schutzwürdige Immissionsräume.....	22
	7.2 Landesstr. 39.....	22
	7.3 Landeanflug von Nordosten	24
8	Zusammenfassung.....	25
9	Literaturverzeichnis	26
10	Abbildungsverzeichnis.....	27
11	Gewährleistung	28
12	Vorbehaltsklausel für die Veröffentlichung des Gutachtens	28

1 Einleitung

Im folgenden Gutachten wird die durch Reflexion direkter Sonneneinstrahlung verursachte Lichtemission der geplanten PV-Anlage (PVA) Klein Rheide 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 befindet sich südlich des Ortsteils Klein Rheide im Landkreis Rendsburg-Eckernförde in Schleswig-Holstein. Das Projektgebiet umfasst neun Teilflächen und ist auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen geplant. Im Norden grenzt die Anlage an ein Wohngebiet, wodurch eine besondere Rücksichtnahme auf das Ortsbild und die landschaftliche Einbindung erforderlich ist. Östlich verläuft die Landesstraße 39, die als Abgrenzung zur Anlage dient. Die Umgebung ist vor allem durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt. Die südlich gelegenen Teilflächen 8 und 9 befinden sich in einer Entfernung von etwa 3 Kilometern zum Nato-Flugplatz ETNS. Die nördlich gelegenen Teilflächen 1 bis 7 liegen rund 1,7 Kilometer vom Fliegerhorst entfernt. Daher sind mögliche Auswirkungen auf die Flugsicherheit, insbesondere hinsichtlich Blendwirkungen, zu berücksichtigen. Eine Übersicht über die nähere Umgebung der PV-Anlage wird in Abbildung 1 gegeben. Ein Ortstermin fand nicht statt.



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

3 Beschreibung der PV-Anlage

Die PVA ist mit einer DC-Leistung von 52.261,76 kWp geplant. Vorgesehen ist eine Süd-Ausrichtung mit 167° Azimut und einem Neigungswinkel von 15° . Die Belegungspläne sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt. Als Unterkonstruktion kommt ein 2-Pfeiler-System zum Einsatz mit drei im Hochformat ausgerichteten Modulen über die Tischbreite. Die Modulunterkante ist auf 0,8 m Höhe und die Moduloberkante auf 2,69 m geplant. Die Unterkonstruktion ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

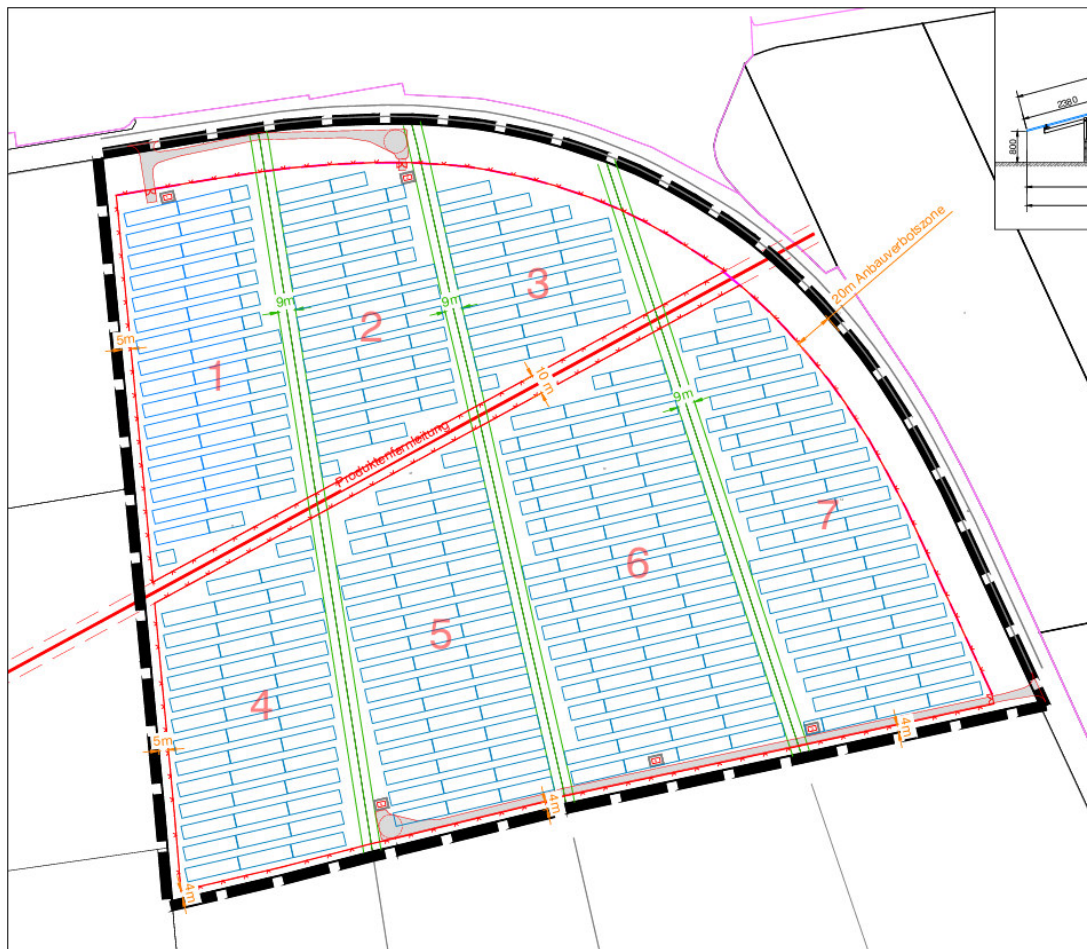


Abbildung 2: Modulbelegungsplan Teilfläche 1 bis 7 (Quelle: Auftraggeber)

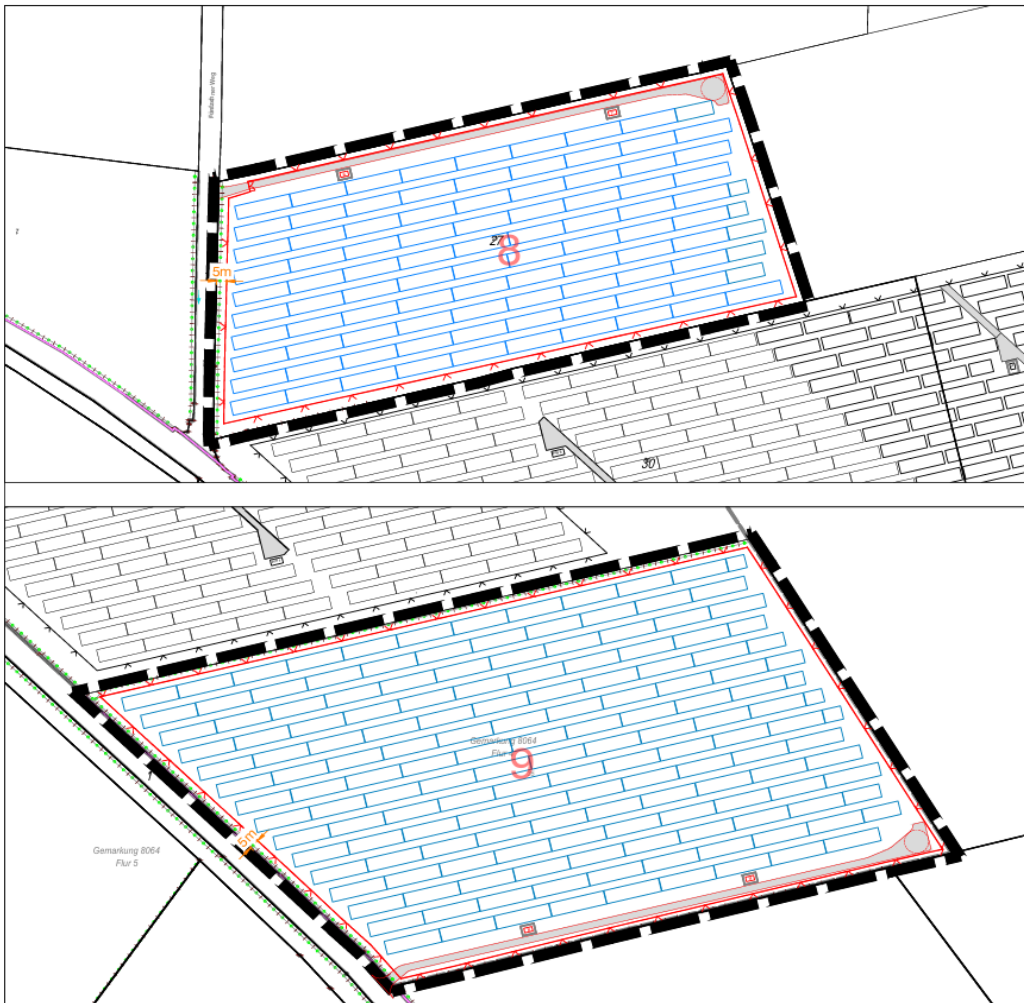


Abbildung 3: Modulbelegungsplan Teilfläche 8 und 9 (Quelle: Auftraggeber)

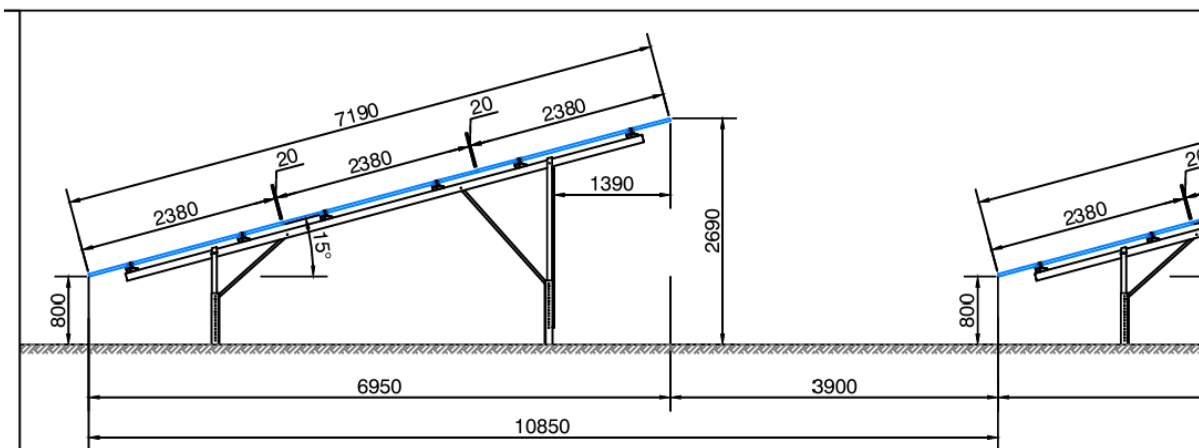


Abbildung 4: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)

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 ($\alpha = \beta$).

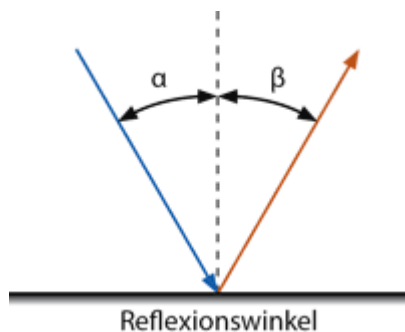


Abbildung 5: Reflexion eines Lichtstrahls

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 Lambertschen Gesetz zu sehen.

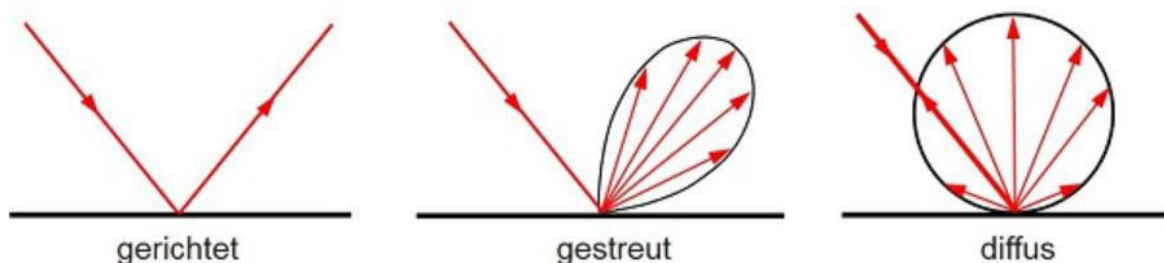


Abbildung 6: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1]

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).

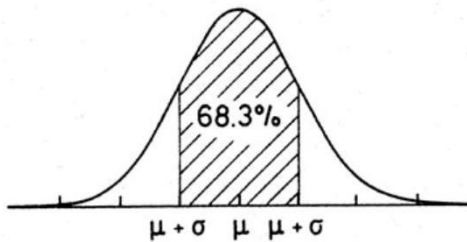


Abbildung 7: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

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.

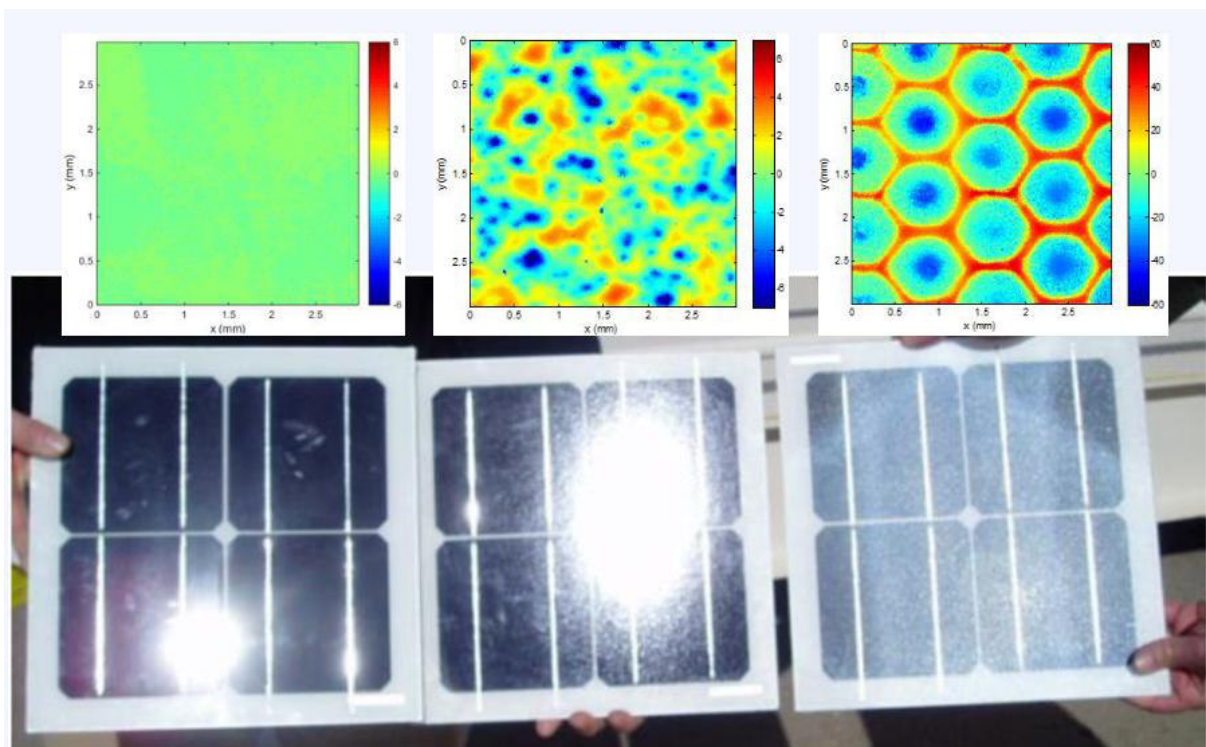


Abbildung 8: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [2]

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.

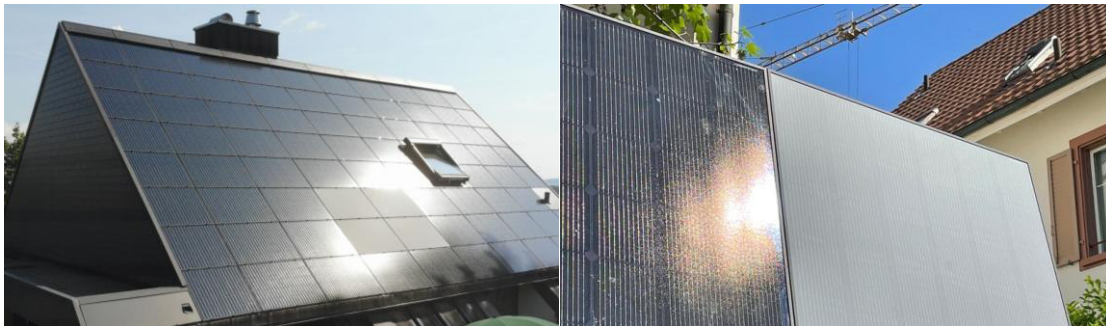


Abbildung 9: links: Module mit satinierter Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]

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.

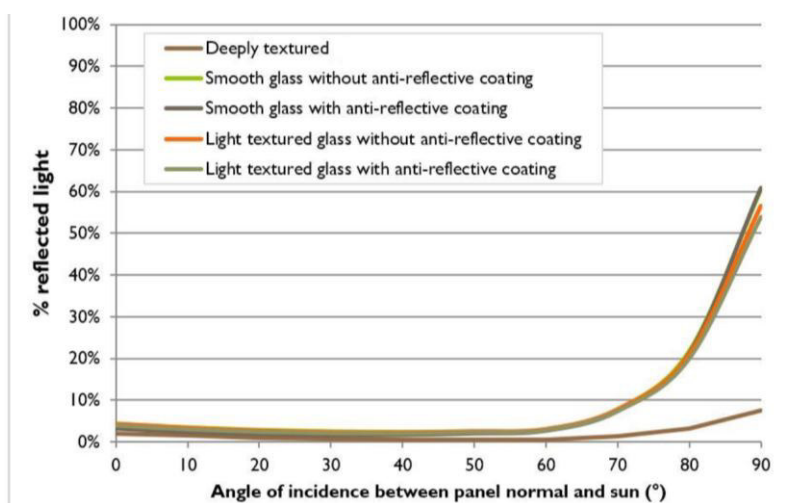


Abbildung 10 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]

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.

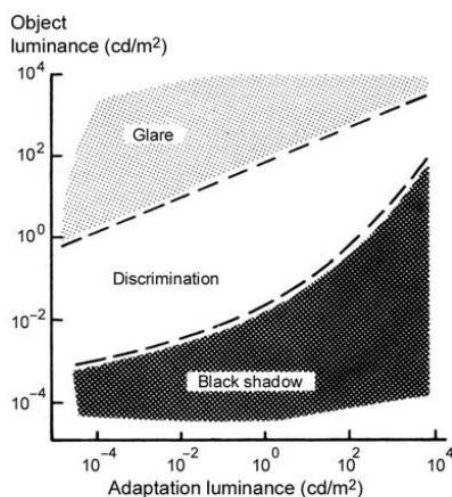


Abbildung 11: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]

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 [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 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.

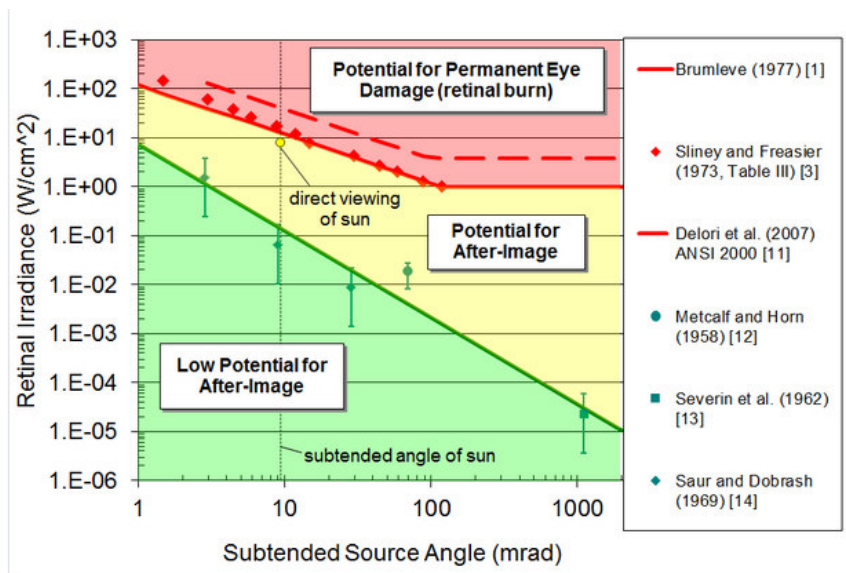


Abbildung 12: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [12]

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 13 und Abbildung 14 und ist eine Übersicht über die angelegte Simulation dargestellt.



Abbildung 13: PV-Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar



Abbildung 14: Landeanflüge 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 167° Azimut und 15° Neigungswinkel simuliert. Die mittlere Modulhöhe ergibt sich zu 1,75 m. Als maximale Bestrahlungsstärke auf die horizontale Fläche werden 1000 W/m^2 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]
PV-Feld 1-7	1	54,44599576	9,47210994	20,2	1,8	21,9
	2	54,44609402	9,4731788	19,6	1,8	21,3
	3	54,44618994	9,474434074	20,2	1,8	22
	4	54,44618643	9,474672791	20,3	1,8	22
	5	54,44616654	9,474977222	20,7	1,8	22,4
	6	54,44613769	9,475189116	20,4	1,8	22,2
	7	54,44610338	9,475481477	20,7	1,8	22,4
	8	54,44605074	9,475771155	20,5	1,8	22,2
	9	54,44598563	9,476050105	20,3	1,8	22
	10	54,4458242	9,476503398	20,8	1,8	22,5
	11	54,44560352	9,476943281	20,9	1,8	22,7
	12	54,4453103	9,477399256	20,4	1,8	22,1
	13	54,44509975	9,477671501	20,8	1,8	22,6
	14	54,44487126	9,477895465	20,9	1,8	22,6
	15	54,44440492	9,478338029	21,2	1,8	23
	16	54,4440922	9,478575405	21,1	1,8	22,8
	17	54,44379819	9,47881278	20,2	1,8	22
	18	54,44344102	9,476025965	20	1,8	21,7
	19	54,44312284	9,473826554	20,2	1,8	22
	20	54,44293879	9,472624924	20,4	1,8	22,2
	21	54,44393058	9,472454449	20,6	1,8	22,3
	22	54,44491611	9,472289338	21,4	1,8	23,1
PV-Feld 8	1	54,43586292	9,469123261	18,3	1,8	20
	2	54,43604076	9,470383899	18	1,8	19,7
	3	54,43620924	9,471596258	18,2	1,8	20
	4	54,43634964	9,472760336	18,6	1,8	20,4
	5	54,43587228	9,473033922	19	1,8	20,8
	6	54,43545419	9,473232405	18,8	1,8	20,6
	7	54,43517339	9,471258299	18,3	1,8	20,1
	8	54,43501426	9,470083492	17,6	1,8	19,3
	9	54,43488634	9,469042795	18,4	1,8	20,2
	10	54,43541363	9,469074981	18,5	1,8	20,3
PV-Feld 9	1	54,43121212	9,475680092	18,8	1,8	20,5
	2	54,43143366	9,477461079	18,5	1,8	20,2

3	54,43161777	9,478721717	18,3	1,8	20
4	54,43181123	9,48008428	17,3	1,8	19
5	54,4313461	9,480578143	18,1	1,8	19,9
6	54,43080003	9,481136042	18,2	1,8	20
7	54,43060345	9,481313068	18,2	1,8	19,9
8	54,43035381	9,479730565	19	1,8	20,8
9	54,43019779	9,478684503	19	1,8	20,7
10	54,43003552	9,47751506	18	1,8	19,7
11	54,43034757	9,477037627	18,2	1,8	19,9
12	54,43070642	9,476452905	19,2	1,8	21

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 Landesstr. (L39), der Kröpperweg, die Hauptstraße, das Groß Rheide Feld, die Landesanflüge den Flugplatz sowie schutzwürdige Nachbarschaft untersucht. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers, sowie Satellitenbilder von Oktober 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 Höhen ü. NN, die für die Simulation angenommenen Untersuchungshöhen und die daraus resultierenden Gesamthöhen sind aus Tabelle 2 und

Tabelle 3 zu entnehmen.

Wie in Abbildung 15 dargestellt wird seitlich ein relevanter Sichtwinkel von +/- 50° zur Flugrichtung untersucht. Der Landewinkel ist 3° und die Höhe über dem Landepunkt (auf English: threshold crossing height) ist 15,2 m. Die exakten Koordinaten, die Höhen ü. NN, die für die Simulation angenommenen Untersuchungshöhen und die daraus resultierenden Gesamthöhen sind aus Tabelle 4 zu entnehmen.

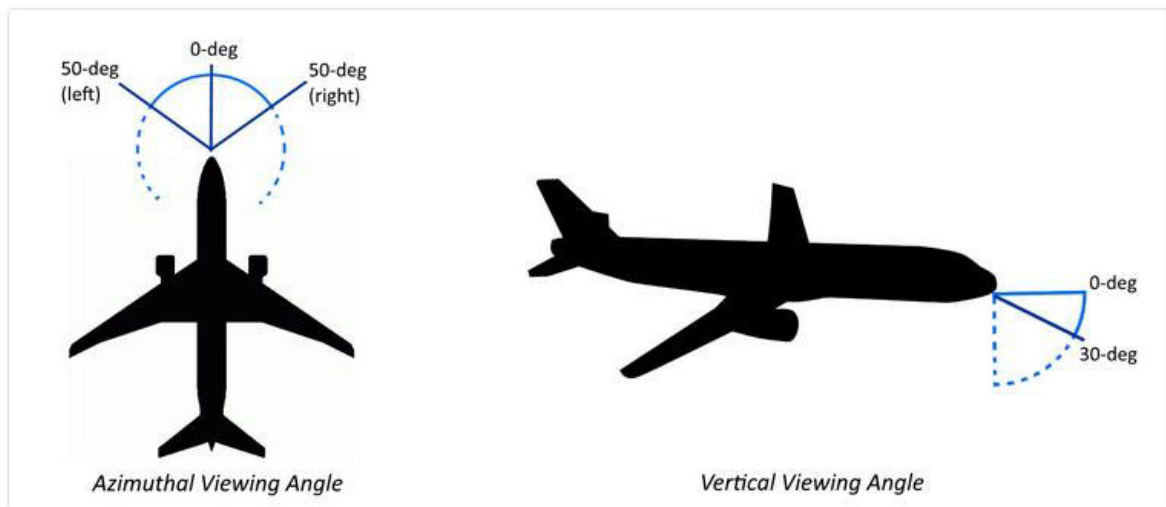


Abbildung 15: Betrachtete Sichtwinkel für die Simulation (Quelle: ForgeSolar)

Tabelle 2: Koordinaten der zu untersuchenden Verkehrsstrecken

Verkehrsstrecken	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
Gross Rheide Feld	1	54,43273398	9,462418888	17,8	3	20,8
	2	54,43307721	9,462461803	17,4	3	20,4
	3	54,43353276	9,462451075	16,5	3	19,5
	4	54,43375741	9,462526176	15,9	3	18,9
	5	54,43428784	9,462890957	15,7	3	18,7
	6	54,43509283	9,463448856	17,4	3	20,4
	7	54,43556083	9,463759993	19	3	22
	8	54,4359682	9,464006756	18,6	3	21,6
	9	54,43624276	9,464210604	18,2	3	21,2
Hauptstraße	1	54,44681814	9,476831963	19,5	3	22,5
	2	54,44662787	9,476778319	18,8	3	21,8
	3	54,44643448	9,476601293	18,7	3	21,7
	4	54,44632531	9,476461818	18,7	3	21,7
	5	54,44623797	9,476327707	18,4	3	21,4

Kröpper Weg	1	54,43980585	9,454312957	16,3	3	19,3
	2	54,43925677	9,456480182	17,1	3	20,1
	3	54,43834579	9,459055102	18,2	3	21,2
	4	54,43747223	9,461243785	17,3	3	20,3
	5	54,43639897	9,463818705	18,8	3	21,8
	6	54,43561273	9,466028846	17,4	3	20,4
	7	54,43388632	9,470191634	18,7	3	21,7
	8	54,43253839	9,472680724	17,5	3	20,5
	9	54,43170215	9,474118388	18,7	3	21,7
	10	54,43070977	9,47591021	19,6	3	22,6
	11	54,43001704	9,477058196	17,1	3	20,1
	12	54,42913081	9,478249096	19	3	22
	13	54,42778896	9,480191016	18,1	3	21,1
	14	54,42684652	9,481596493	17,5	3	20,5
	15	54,42575426	9,483227276	17,1	3	20,1
	16	54,42514258	9,484267973	16,6	3	19,6
	17	54,42427024	9,485610125	16,7	3	19,7
	18	54,42371471	9,486532805	16,8	3	19,8
	19	54,42330275	9,48721945	16,6	3	19,6
L39	1	54,4447362	9,457977338	16,6	3	19,6
	2	54,44502942	9,459785147	17,8	3	20,8
	3	54,4452968	9,461502822	17,6	3	20,6
	4	54,44544965	9,462602527	17,6	3	20,6
	5	54,44563992	9,46391681	17,5	3	20,5
	6	54,44582708	9,465633424	17,9	3	20,9
	7	54,44593002	9,467054994	18,4	3	21,4
	8	54,44611405	9,4692728	19,1	3	22,1
	9	54,44639166	9,472588011	18,5	3	21,5
	10	54,44650084	9,474191972	18,7	3	21,7
	11	54,44632928	9,475801297	19	3	22
	12	54,44607038	9,476718613	18,7	3	21,7
	13	54,44557754	9,477678843	18,8	3	21,8
	14	54,44516579	9,478215285	19,1	3	22,1
	15	54,44489129	9,47845132	19,5	3	22,5
	16	54,44454504	9,478751727	19,1	3	22,1
	17	54,44408026	9,479127236	20,3	3	23,3
	18	54,44367785	9,479427644	19,2	3	22,2
	19	54,44225798	9,48048036	19,1	3	22,1
	20	54,44066075	9,481703448	19,4	3	22,4
	21	54,43953766	9,482529568	19	3	22
	22	54,43823899	9,483645367	18,8	3	21,8
	23	54,43660356	9,484857726	18,1	3	21,1



	24	54,43488479	9,486188101	18,8	3	21,8
	25	54,4331644	9,48758285	19,3	3	22,3
	26	54,43162298	9,488741564	19,6	3	22,6
	27	54,43007942	9,489964652	19,6	3	22,6
	28	54,42826951	9,491316485	18,1	3	21,1
	29	54,42727091	9,492131876	18,2	3	21,2
	30	54,42578544	9,493283391	17,2	3	20,2

Tabelle 3: Koordinaten der zu untersuchenden Beobachtungspunkte

Beobachtungspunkte	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
1	54,44692	9,476518797	20,2	1,7	21,9
2	54,44667681	9,472272168	18,2	1,7	19,9
3	54,44661148	9,471798481	19	1,7	20,7
4	54,44700566	9,475929093	19,7	1,7	21,4
5	54,44717029	9,477640249	21,6	1,7	23,3
Tower	54,4564158	9,520734701	21,7	18	39,7
7	54,44716731	9,477252332	19,8	1,7	21,5

Tabelle 4: Koordinaten der zu untersuchenden Landesanflüge

Immissionsort	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
FP 1	1	54,46673	9,530254	19,6	15,2	34,9
	2	54,48616	9,567139	5,9	197,6	203,5
FP 2	1	54,46012	9,530098	21,3	15,2	36,5
	2	54,46813	9,577951	20,6	184,7	205,2
FP 3	1	54,45197	9,50244	19,4	15,2	34,6
	2	54,43244	9,46572	18,3	185	203,3
FP 4	1	54,45594	9,504676	18,6	15,2	33,9
	2	54,44805	9,456776	16,5	186,1	202,6

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 für schutzwürdige Immissionsorte 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. Im Straßen- und Bahnverkehr werden erst bei sehr tiefen Sonnenständen (Höhe $\leq 5^\circ$) die Reflexionen, die weniger als 10° von der Sonnenposition entfernt sind, gefiltert, weil dann eine Sonnenblende nicht mehr effektiv zum Einsatz kommen kann.

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 und 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.

Tabelle 5: Simulationsergebnisse für schutzwürdigen Immissionsorte nach Filterung der Ergebnisse

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
Tower	0	0
7	0	0

Tabelle 6: Simulationsergebnisse für die Straßen und Landeanflüge nach Filterung der Ergebnisse

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten
Landeanflug Süd- West	0	0
Landeanflug Süd- West	0	0
Landeanflug Nord- Ost	11	28
Landeanflug Nord- Ost	0	0
L 39	38	15
Kröpfer Weg	0	0
Hauptstraße	0	0
Gross Rheide Feld	0	0

7.1 Schutzwürdige Immissionsräume

Für keinen der umliegenden untersuchten schutzwürdigen Räume werden potenzielle Blenddauern ermittelt, welche die vorgeschlagenen Grenzwerte der LAI-Hinweise überschreiten. Es ist entsprechend auf Basis der LAI-Hinweise von keiner erheblichen Beeinträchtigung der Nachbarschaft durch Reflexionen der Modulflächen auszugehen. Für den Tower und die Piste des Flugplatzes NATO werden keine Reflexionen festgestellt.

7.2 Landesstr. 39

Die Ergebnisse der Simulation für diesen Immissionsort sind in Abbildung 3 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 27.03. bis zum 16.09. zwischen 18:53 - 19:58 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 267 - 293° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 15 Minuten erreicht und über das gesamte Jahr eine potenzielle Dauer von 37,7 Stunden.

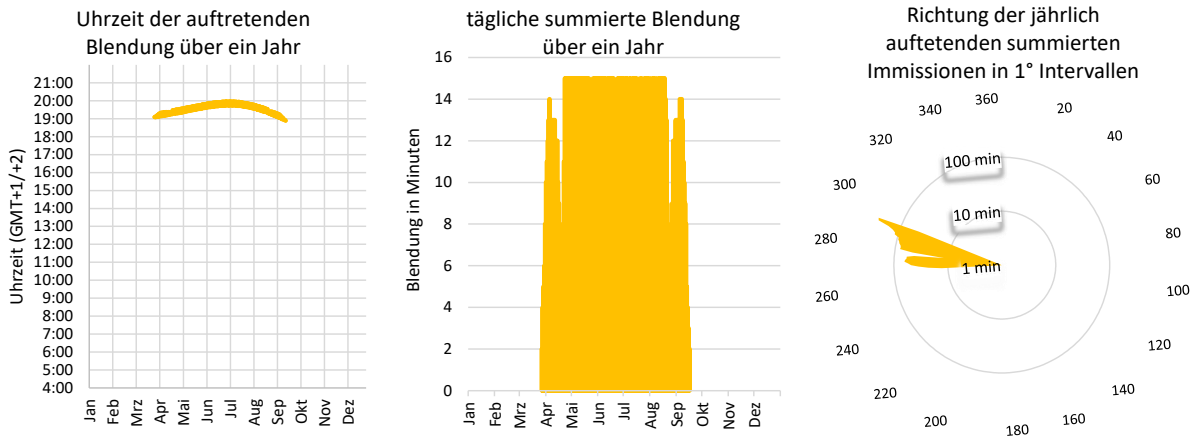


Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die L39

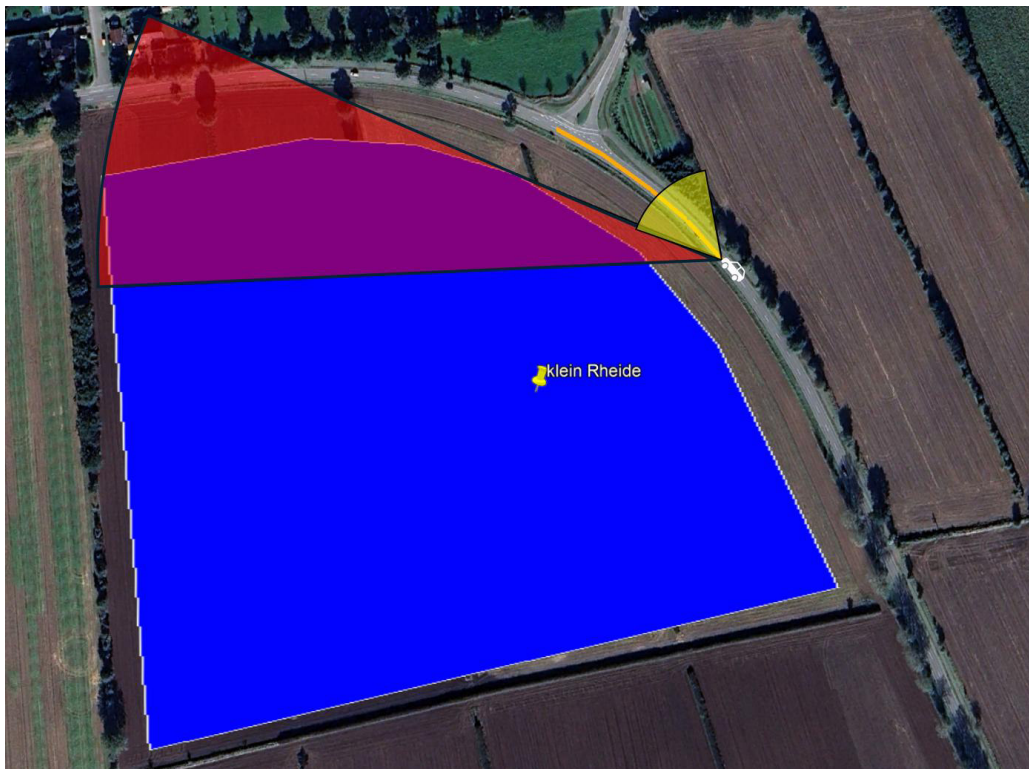


Abbildung 17: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange

Die Landesstr.39 verläuft mit 300-318° in Südost-Richtung. Für die Fahrer wird ein relevanter Sichtwinkel von +/- 30° in Fahrtrichtung angesetzt, sodass nur ca. 3° am Rand des Sichtfeldes von den potenziellen Reflexionen betroffen sind.

Für diese Straße mit guter Sichtbarkeit des Gegenverkehrs wird von keiner Gefährdung der Verkehrssicherheit ausgegangen. Es werden keine Blendschutzmaßnahmen für notwendig erachtet.

7.3 Landeanflug von Nordosten (FP3)

Die Ergebnisse der Simulation für diesen Immissionsort sind in Abbildung 18 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 03.03. bis zum 19.03. und vom 23.09. bis zum 09.10. zwischen 6:50 - 8:09 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 92 - 100° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 28 Minuten erreicht und über das gesamte Jahr eine potenzielle Dauer von 11,3 Stunden.

Bei Blick auf die Landebahn ist nur von einer geringfügigen Blendwirkung durch die Reflexionen auszugehen. Die Reflexionen verhindern zu keinem Zeitpunkt das Einsehen der Landebahn für den Piloten. Auf den letzten 2,6 km der Anflugstrecke treffen keine Reflexionen mehr auf den Piloten. Die Reflexionen stellen damit aus Sicht des Gutachters keine Gefährdung der Flugsicherheit dar.

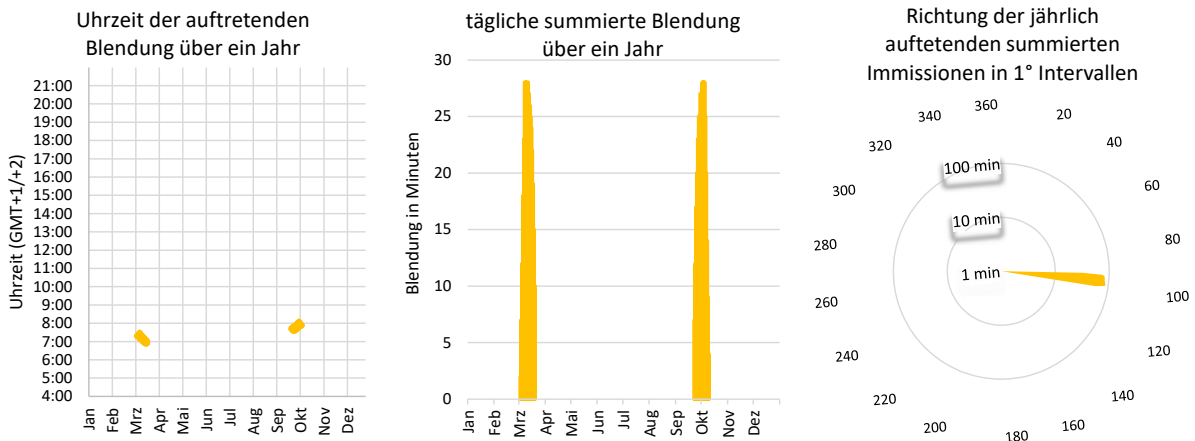


Abbildung 18: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung Nordosten

8 Zusammenfassung

Es wurde die potenzielle Blendung durch Reflexionen der Sonne an den PV-Modulen der geplanten PV-Anlage Klein Rheide für den Verkehr auf der anliegenden Landesstraße 39, der Hauptstraße sowie dem Groß-Rheide-Feld untersucht. Außerdem wurde eine potenzielle Blendwirkung für den Tower, die Piste und die Landeanflüge des Fliegerhorsts untersucht.

Das Gutachten kommt zu dem Schluss, dass es auf Basis der Strahlengeometrie zu keinen Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer auf der Landesstraße 39, dem Kröpper Weg, der Hauptstraße sowie dem Groß-Rheide-Feld kommen kann. Eine Gefährdung der Verkehrssicherheit durch Reflexionen an den Modulflächen wird damit ausgeschlossen.

Weiterhin werden für Piloten auf der Piste des Fliegerhorsts sowie für Fluglotsen des zugehörigen Towers keine Reflexionen der Sonne an den Modulflächen ermittelt. Außerdem beim Landeanflug aus Richtung Osten kann es in einem Abstand von über 2 km zur Piste zu Reflexionen im Sichtfeld des Piloten kommen. Diese Reflexionen treten am Morgen zwischen 6:50 und 8:09 Uhr bei Immissionswinkeln zwischen 92 und 100° auf. Die Landebahn bleibt aus allen Anflugrichtungen zu jeder Zeit für die Piloten einsehbar. Die Reflexionen werden daher nicht als kritisch für die Flugsicherheit eingestuft.

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] 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>.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modulflächen der geplanten PVA in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth).....	4
Abbildung 2: Modulbelegungsplan Teilfläche 1 bis 7 (Quelle: Auftraggeber)	5
Abbildung 3: Modulbelegungsplan Teilfläche 8 und 9 (Quelle: Auftraggeber).....	6
Abbildung 4:Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)	6
Abbildung 5: Reflexion eines Lichtstrahls.....	7
Abbildung 6: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1].....	7
Abbildung 7: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung	8
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]	8
Abbildung 9: links: Module mit satinierter Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]	9
Abbildung 10 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]	9
Abbildung 11: Wahrnehmungsbereiche von Objekhelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]	10
Abbildung 12: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [12]	13
Abbildung 13: PV-Anlage und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar	14
Abbildung 14: Landeanflüge in der Simulationssoftware Forgesolar	15
Abbildung 15: Betrachtete Sichtwinkel für die Simulation (Quelle: ForgeSolar)	18
Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die L39	23
Abbildung 17: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange	23
Abbildung 18: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung Nordosten	24

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.