



Berlin Brandenburg

DGS Landesverband Berlin Brandenburg e.V.

Erich-Steinfurth-Str. 8

10243 Berlin

Tel. +49 (0)30 29 38 12 80

E-Mail solarservices@dgs-berlin.de

Web www.dgs-berlin.de

Fachgutachten zur Bewertung der Blendwirkung durch Reflexion an PV-Modulen (Blendgutachten) für die PVA Binsfeld

Anlage: PVA Binsfeld
49.963698°, 6.695324°
54518, Binsfeld

in Auftrag gegeben von: Claus Bayer & Christoph Bayer
Bahnhofstraße 7a
54518 Binsfeld

Projektnummer: A-LV24/0264

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

Bearbeiter: Markus Stich, M. Sc.

Berlin, 09.02.2026

Handelsregister:
Amtsgericht
Charlottenburg
HRB 90823 B

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

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

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Untersuchungsziel und Bewertungsgrundlagen	4
3	Methodik der Untersuchung	5
4	Projektbeschreibung	6
	4.1 Beschreibung der Umgebung	6
	4.2 Beschreibung der PV-Anlage	7
5	Auswertung	8
	5.1 Air Base Spangdahlem	8
	5.2 B50	9
	5.3 Ortschaft Binsfeld	10
6	Literaturverzeichnis	11
7	Abbildungsverzeichnis	13
8	Gewährleistung	14
9	Vorbehaltsklausel für die Veröffentlichung des Gutachtens	14
10	Anhang	15

1 Zusammenfassung

Es wurde die potenzielle Blendung durch Reflexion der Sonne an PV-Modulen der geplanten PV-Anlage Binsfeld (siehe Kapitel 4.2) für den Verkehr der B50, der Dudeldorfer Straße, der schutzwürdigen Immissionsorte der Ortschaft Binsfeld, sowie für den Tower, das Gelände und den Landeanflug auf die Air Base Spangdahlem untersucht.

Das Gutachten kommt auf Basis der Strahlengeometrie zu dem Schluss, dass es zu keinen relevanten Reflexionen im Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten auf der B50 und der Dudeldorfer Straße kommen kann. Es ist entsprechend von keiner relevanten Blendwirkung und damit von keiner Gefährdung der Verkehrssicherheit auszugehen.

Auch auf das Gelände der Air Base Spangdahlem, insbesondere den Tower und die Pisten, sowie Piloten beim Landeanflug sind keine Reflexionen durch die Modulflächen möglich. Die PV-Anlage stellt damit keine Gefährdung für die Flugsicherheit dar.

Für die anliegende Wohnbebauung der Ortschaft Binsfeld werden die Grenzwerte für die potenzielle Blenddauer, wie sie durch die Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (kurz: LAI) vorgeschlagen werden, unterschritten. Es ist entsprechend auf Basis der LAI-Hinweise von keiner relevanten Blendwirkung für die Anwohner auszugehen.

Es sind keine Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

2 Untersuchungsziel und Bewertungsgrundlagen

Im folgenden Gutachten wird die durch Reflexion direkter Sonneneinstrahlung verursachte Lichtemission der geplanten PV-Anlage (PVA) Binsfeld und die damit einhergehende potenzielle Beeinträchtigung umliegender definierter Immissionsorte (siehe Kapitel 4) untersucht. Sofern potenzielle Lichtimmissionen zu einer Gefährdung oder erheblichen Beeinträchtigung der Umgebung führen können, werden geeignete Maßnahmen zur Vermeidung entsprechender Auswirkungen dargestellt.

Die Beurteilung der Immissionswirkung erfolgt unter Berücksichtigung der fachlichen Literatur und der maßgeblichen rechtlichen Dokumente. Die Grundlagen der fachlichen Bewertung sind in Kapitel 10A dargestellt. Eine Übersicht der bestehenden Regulatorik zum Thema Lichtimmissionen ist in Kapitel 10B aufgeführt.

3 Methodik der Untersuchung

Die Ermittlung der potenziellen Reflexionszeiten und Richtungen erfolgt auf Basis von Reflexionsdiagrammen. Ein Reflexionsdiagramm stellt die Richtung der an einer Modulfläche ideal reflektierten Strahlung dar. Maßgeblich hierfür ist der vom Standort abhängige Sonnenverlauf, sowie die Ausrichtung der Modulfläche. In diesem Gutachten werden die Reflexionsrichtungen mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten über den Tagesverlauf sowie in Abständen von zwei Wochen über das Jahr hinweg dargestellt. Der Sonnenstand wird auf Basis von [1] berechnet.

Zur Bewertung der Blendung im Straßenverkehr werden nur Reflexionen im Bereich des Blickwinkels von $\pm 30^\circ$ berücksichtigt, ausgehend von der jeweiligen Fahrtrichtung. Zur Bewertung des Bahnverkehrs werden die Reflexionen im Bereich des Blickwinkels von $\pm 20^\circ$ berücksichtigt. In Verkehrssituationen, in welchen ein erweitertes Blickfeld relevant ist, werden entsprechend größere Blickwinkel berücksichtigt. Bei einfachen, nicht konzentrierenden Reflexionen außerhalb dieses Sichtfelds ist von keinen relevanten Blendwirkungen für die Erfüllung der Fahraufgaben auszugehen.

Die Immissionshöhe im Straßenverkehr wird in der Regel auf eine Höhe von 2,7 m festgelegt, was der maximalen 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 1,0 m über der Fahrbahn festgelegt, um in diesem Fall einen PKW abzubilden. Die Immissionshöhe für Bahntrassen wird typischerweise auf 3 m über der Trasse festgelegt. Werden Reflexionen im relevanten Sichtfeld festgestellt, so erfolgt die Berechnung der Blendwirkung auf Basis der Strahlengeometrie und den physiologischen Grundlagen des Sehapparats, wie sie detaillierter in Kapitel 10A beschrieben werden.

Bei der Untersuchung schutzwürdiger Immissionsorte (z. B. Wohngebäude) werden exemplarisch diejenigen Gebäude, Fenster und Aufenthaltsbereiche betrachtet, die aufgrund ihrer Lage die längsten potenziellen Blendzeiträume erwarten lassen (Worst-Case-Ansatz). Vor diesem Hintergrund ist nicht davon auszugehen, dass andere umliegende Immissionsorte, die nicht im Detail aufgeführt werden, höhere potenzielle Immissionsdauern aufweisen.

Reflexionen, welche aus der gleichen Richtung wie die direkte Sonnenstrahlung kommen, werden in Übereinstimmung mit der beschriebenen Methodik der LAI-Hinweise [2] bei Untersuchung schutzwürdiger Immissionsorte nicht betrachtet. Die Differenz der Richtungsvektoren von Reflexionsstrahl und Sonneneinstrahlung darf hierzu 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. Im Straßen- und Bahnverkehr werden die Reflexionen erst bei sehr tiefen Sonnenständen (Höhe $\leq 5^\circ$) gefiltert, weil dann eine Sonnenblende nicht mehr effektiv zum Einsatz kommen kann [3].

4 Projektbeschreibung

4.1 Beschreibung der Umgebung

Die geplante PVA liegt westlich der Ortschaft Binsfeld in der gleichnamigen Gemeinde im Landkreis Bernkastel-Wittlich in Rheinland-Pfalz. Südlich des Solarparks liegt die B50, östlich grenzen zwei Lagerplätze an, im Norden die Dudeldorfer Straße und im Nordosten die Air Base Spangdahlem. Die PVA ist auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen geplant. Das Gelände ist eben. Eine Übersicht über die nähere Umgebung der PV-Anlage wird in Abbildung 1 gegeben. Ein Ortstermin wurde nicht durchgeführt.

Als relevante zu untersuchende Immissionsorte werden die genannten umliegenden Straßen untersucht, die umliegenden schutzwürdigen Immissionsorte (nach [4]), sowie der Tower und der Landeanflug auf die Air Base Spangdahlem. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers, sowie Satellitenbilder.

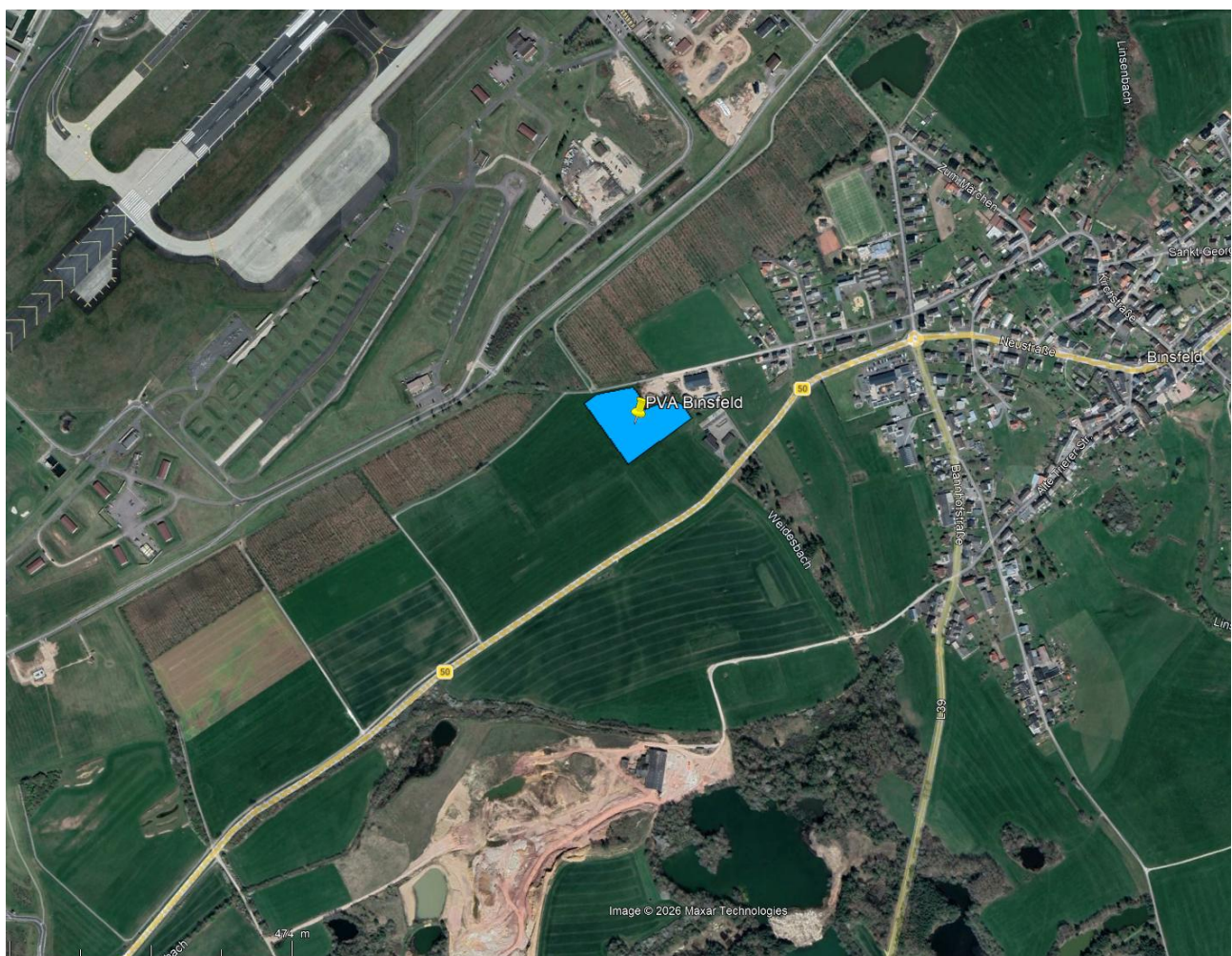


Abbildung 1: Modulflächen der geplanten PVA in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth, Maxar Technologies)

4.2 Beschreibung der PV-Anlage

Die PVA ist auf einer Fläche von ca. 1,2 ha und mit einer DC-Leistung von 1672 kWp geplant. Vorgesehen ist eine Südost-Ausrichtung mit 144° Azimut und einem Neigungswinkel von 20°. Etwaige kleinere Abweichungen der Azimut-Ausrichtung gegenüber den in den Planungsdaten des Auftraggebers aufgeführten Werten sind auf das verwendete Referenzsystem zurückzuführen. Für die Analyse wird ein geodätisches Referenzsystem verwendet.

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 3,29 m geplant. Die Unterkonstruktion ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

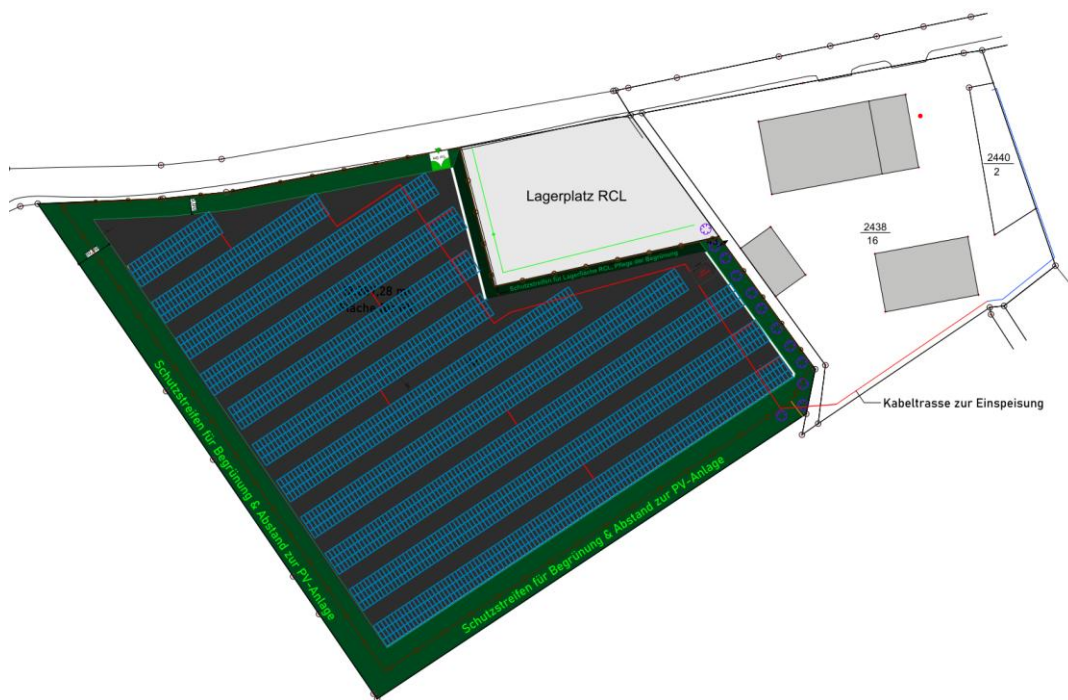


Abbildung 2: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)

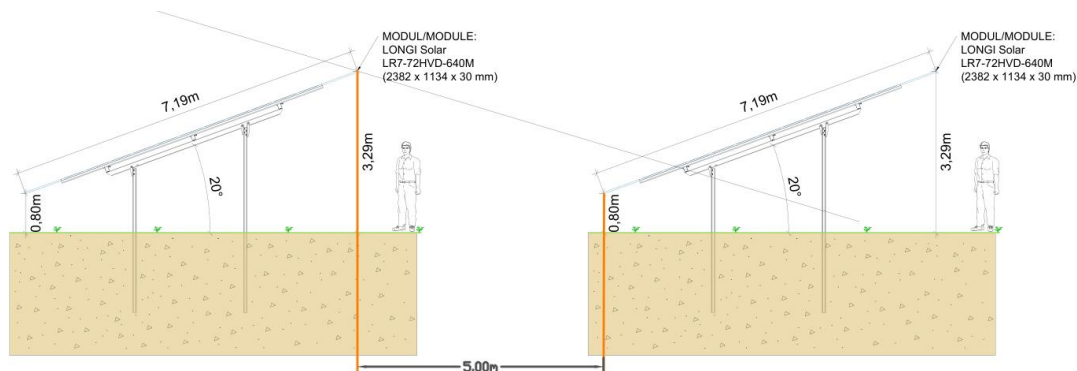


Abbildung 3: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)

5 Auswertung

Auf Basis der Geokoordinaten und der Modulausrichtung wird das Reflexionsdiagramm für die Modulflächen erstellt, zu sehen in Abbildung 4. In diesem ist die Richtung der möglichen Reflexionen der Sonne an der Modulfläche zu sehen. Dargestellt sind die sich ergebenden Reflexionsrichtungen in 5 Minuten Abständen über den Tag und in zwei Wochen Abständen über das Jahr. Reflexionen mit einem Höhenwinkel größer 0° gehen in Richtung Himmel, Reflexionen mit einem Azimut von 90° gehen in Richtung Osten.

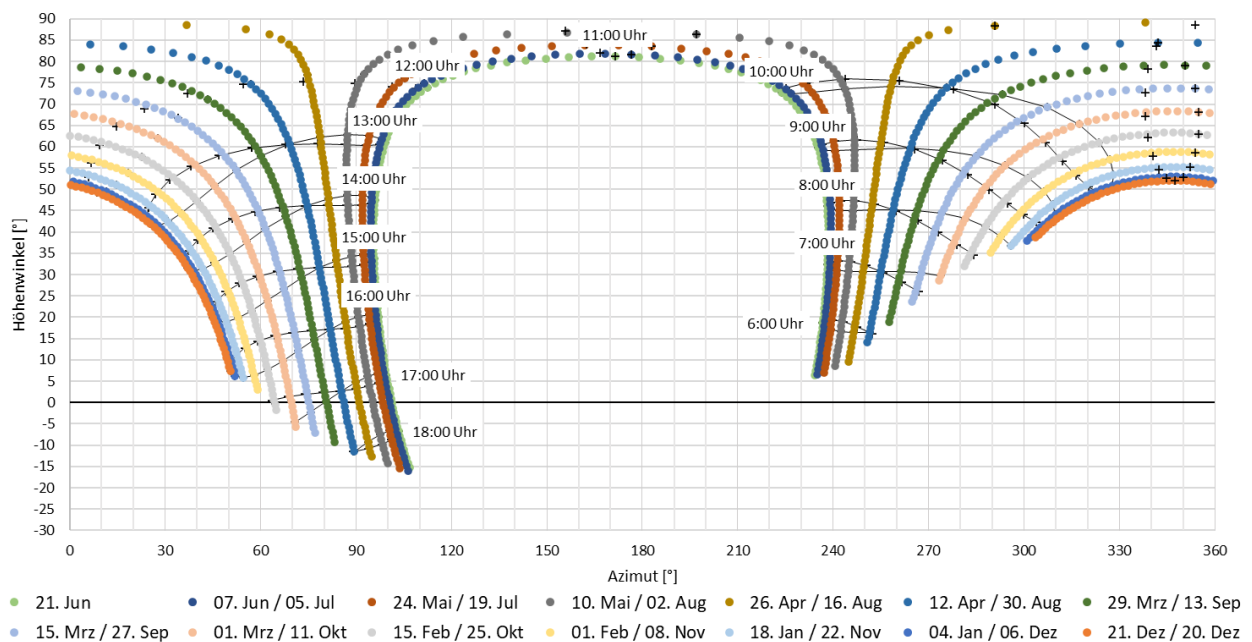


Abbildung 4: Reflexionsdiagramm der Modulfläche: 144° Südost-Ausrichtung, 20° Neigung, (UTC +1)

Gemäß des Reflexionsdiagramms treten an der Modulfläche horizontnahe Reflexionen mit einem Höhenwinkel bis 5° in Richtung Osten von 58° - 103° zwischen 16:00 - 17:00 Uhr von Februar bis November auf. Das entspricht Immissionswinkeln zwischen 238° - 283° .

5.1 Air Base Spangdahlem

Die Air Base liegt von den Modulflächen in Azimut-Richtung 270° - 34° . Es treten in diesen Richtungen keine horizontnahen Reflexionen auf. Eine Beeinträchtigung durch Reflexionen auf dem Gelände der Air Base (z. B. beim Rollen auf den Pisten), oder im Besonderen im Tower, ist damit ausgeschlossen.

Die Piste verläuft mit $44,6^\circ$ / $224,6^\circ$ Azimut. Auch in diesen Richtungen treten keine horizontnahen Reflexionen auf. Entsprechend können beim Landeanflug keine Reflexionen für die Piloten auftreten.

Beim Überfliegen der PV-Anlage aus Richtung Osten, sind kurzzeitig direkte Reflexionen auf die Piloten möglich. Solche Reflexionen stellen jedoch aus Sicht der EASA keine Gefährdung der Luftsicherheit dar [5].

5.2 B50

Für die B50 sind in Fahrtrichtung Westen vereinzelt Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten möglich, wobei jedoch fast alle Sichtwinkel auf die Modulfläche durch bereits bestehende Strukturen/Gebäude verdeckt werden. Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten können daher lediglich über wenige Meter und damit weit unterhalb einer Dauer von einer Sekunde auftreten. Es ist durch die Reflexionen entsprechend von keiner relevanten Blendwirkung und damit von keiner Gefährdung der Verkehrssicherheit auszugehen. Die bestehenden sichtunterbrechenden Strukturen sind in Abbildung 5 in Gelb und Grün dargestellt.

Im Streckenabschnitt südlich der Modulfläche sind Reflexionen auf die B50 möglich, diese liegen jedoch mit Differenzwinkeln von wenigstens 41° außerhalb des relevanten Sichtfelds und es ist durch diese von keiner relevanten Blendwirkung und damit von keiner Gefährdung der Verkehrssicherheit auszugehen.



Abbildung 5: Betroffener Streckenabschnitt mit Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer in Orange, bestehende Strukturen in Gelb und Grün, mögliche Immissionen in Rot (Quelle: Google Earth, Maxar Technologies)

5.3 Ortschaft Binsfeld

Horizontnahe Reflexionen in Richtung der Ortschaft Binsfeld sind lediglich durch den nördlichen Anlagenteil möglich, da lediglich hier eine Sichtverbindung zu Teilen der Modulfläche besteht. Je nach Immissionsort liegen die möglichen Immissionswinkel zwischen 238 und 255° Azimut. Über das gesamte Jahr sind direkte horizontnahe Reflexionen aus diesen Richtungen mit einer Gesamtdauer von bis 24 Stunden möglich, bei einer Maximaldauer von 25 Minuten pro Tag. Es handelt sich um die potenzielle Immissionsdauer für das gesamte von Reflexionen betroffene Gebiet. Die Dauer für die einzelnen Immissionsorte in diesem Gebiet liegen dabei um ein Vielfaches niedriger. Die Grenzwerte, welche die LAI-Hinweise vorgeschlagen, werden damit unterschritten und es ist entsprechend von keiner erheblichen Beeinträchtigung der Anwohner auszugehen.

Von der Dudeldorfer Straße sind die Modulflächen, aufgrund der bestehenden Strukturen (Gebäude und Gehölze), nicht einzusehen.

Die Reflexionssituation ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Bestehende Strukturen in Gelb und Grün, mögliche Immissionen in Richtung der Ortschaft in Rot
(Quelle: Google Earth, Maxar Technologies)

6 Literaturverzeichnis

- [1] I. Reda und A. Andreas, „Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications,“ Golden, 2008.
- [2] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), „Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windkraftanlagen (WKA – Schattenwurfhinweise), Aktualisierung 2019, Stand 23.01.2020,“ Deutschland, 2020.
- [3] Fernstraßen-Bundesamt (FBA) and Autobahn GmbH des Bundes and Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) and Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr and Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg and Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr and Landesbetrieb für Straßenbau - Saarland and Straßenbauverwaltung Schleswig-Holstein, „Eckpunktepapier Photovoltaik: Blendwirkungen und Blendgutachten,“ 2025.
- [4] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), „Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen, redaktionelle Überarbeitung mit Formelkorrektur, Stand 03.2018,“ 2018.
- [5] EASA, „CS-ADR-DSN Issue 6,“ 2022.
- [6] J. Trempler, Optische Eigenschaften, München: Carl Hanser Verlag, 2015.
- [7] J. Yellowhair und C. K. Ho, „Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts,“ 2015.
- [8] C. Bucher, *Reflexionen an Photovoltaikanlagen*, 2021.
- [9] P. Warthmann, *Sandstrahl-Atelier löst Blendproblem bei Photovoltaikanlage*, 2021.
- [10] P. R. Boyce, Human Factors in Lighting, 3 Hrsg., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [11] J. J. Vos, „Reflections on glare,“ *Lighting Research & Technology*, Bd. 35, p. 163–175, June 2003.
- [12] H.-D. Reidenbach, K. Dollinger, G. Ott, M. Janßen und M. Brose, Blendung durch optische Strahlungsquellen, 1 Hrsg., Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2008, p. 407.
- [13] H.-W. Bodmann und E. A. Voit, „Versuche zur Beschreibung der Hellempfindung,“ *Lichttechnik*, Bd. 14, p. 394–400, 1962.

- [14] S. J. Anderson und I. E. Holliday, „Night driving: effects of glare from vehicle headlights on motion perception,“ *Ophthalmic and Physiological Optics*, Bd. 15, pp. 545-551, 1995.
- [15] J. W. A. M. Alferdinck, A. Toet, N. van der Leden und L. Zonneveldt, „Glare from sound barriers. Phase 2 and 3: Experiments and modelling,“ Soesterberg, 2008.
- [16] A. Stockman, M. Langendörfer, H. E. Smithson und L. T. Sharpe, „Human cone light adaptation: from behavioral measurements to molecular mechanisms,“ *Journal of Vision*, Bd. 6, p. 1194–1213, 2006.
- [17] N. Gaspelin, E. Ruthruff und M.-C. Lien, „The problem of latent attentional capture: Easy visual search conceals capture by task-irrelevant abrupt onsets,“ *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Bd. 42, p. 1104–1120, August 2016.
- [18] Federal Aviation Administration (FAA), *Interim Policy, FAA Review of Solar Energy System Projects on Federally Obligated Airports*, 2013.
- [19] ForgeSolar / Sims Industries, LLC, *ForgeSolar Help – Guidance and methodology for PV glare analysis*, 2025.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modulflächen der geplanten PVA in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth, Maxar Technologies)	6
Abbildung 2: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)	7
Abbildung 3: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)	7
Abbildung 4: Reflexionsdiagramm der Modulfläche: 144° Südost-Ausrichtung, 20° Neigung, (UTC +1)	8
Abbildung 5: Betroffener Streckenabschnitt mit Reflexionen im relevanten Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer in Orange, bestehende Strukturen in Gelb und Grün, mögliche Immissionen in Rot (Quelle: Google Earth, Maxar Technologies)	9
Abbildung 6: Bestehende Strukturen in Gelb und Grün, mögliche Immissionen in Richtung der Ortschaft in Rot (Quelle: Google Earth, Maxar Technologies)	10
Abbildung 7: Reflexion eines Lichtstrahls	15
Abbildung 8: ideale, gerichtete Reflexion, reale Reflexion mit Aufweitung, ideale diffuse Reflexion [6]	15
Abbildung 9: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung	16
Abbildung 10: 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 [7]	16
Abbildung 11: links: Module mit satinierte Folie [8], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [9]	17
Abbildung 12 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [7]	17
Abbildung 13: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges, adaptiert nach [10]	18

8 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.

9 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.

10 Anhang

A Fachliche Bewertungsgrundlagen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Berechnung von Reflexionen erläutert.

A.1 Reflexionen an Oberflächen

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 ($\alpha = \beta$).

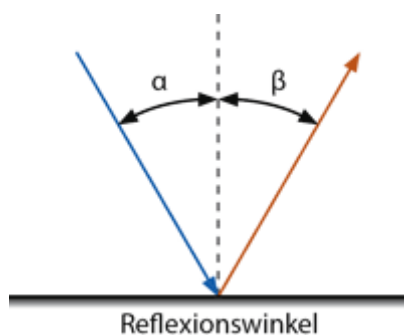


Abbildung 7: Reflexion eines Lichtstrahls

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 8 ist schematisch eine ideal gerichtete Reflexion an einer völlig glatten Oberfläche, eine reale auftretende Streuung an einer unebenen Oberfläche und eine ideal gestreute Reflexion nach dem Lambertschen Gesetz zu sehen.

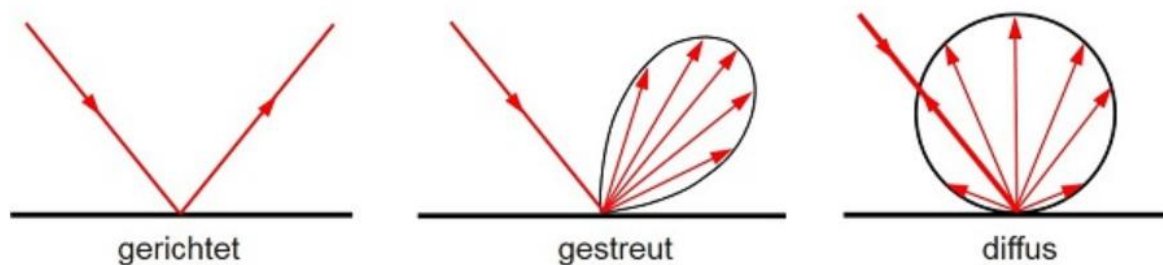


Abbildung 8: ideale, gerichtete Reflexion, reale Reflexion mit Aufweitung, ideale diffuse Reflexion [6]

Bei nicht idealen Reflexionen kommt es damit zu sogenannter Bündelaufweitung, einer Streuung um den idealen Reflexionswinkel. Mit steigendem Differenzwinkel zwischen idealem Reflexionswinkel und Streuwinkel nimmt die Intensität der reflektierten Strahlung in der Regel 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 9).

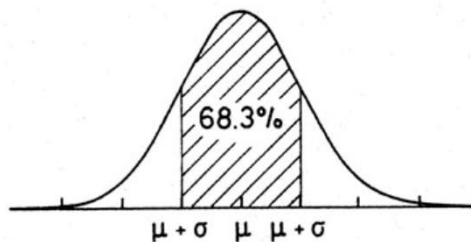


Abbildung 9: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

A.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen

Entscheidend für die Reflexionseigenschaften eines PV-Moduls ist die Oberflächenstruktur des Glases. In Abbildung 10 sind Messungen der Oberflächenstruktur und Bilder der auftretenden Reflexion für drei unterschiedlich stark texturierte Frontgläser zu sehen.

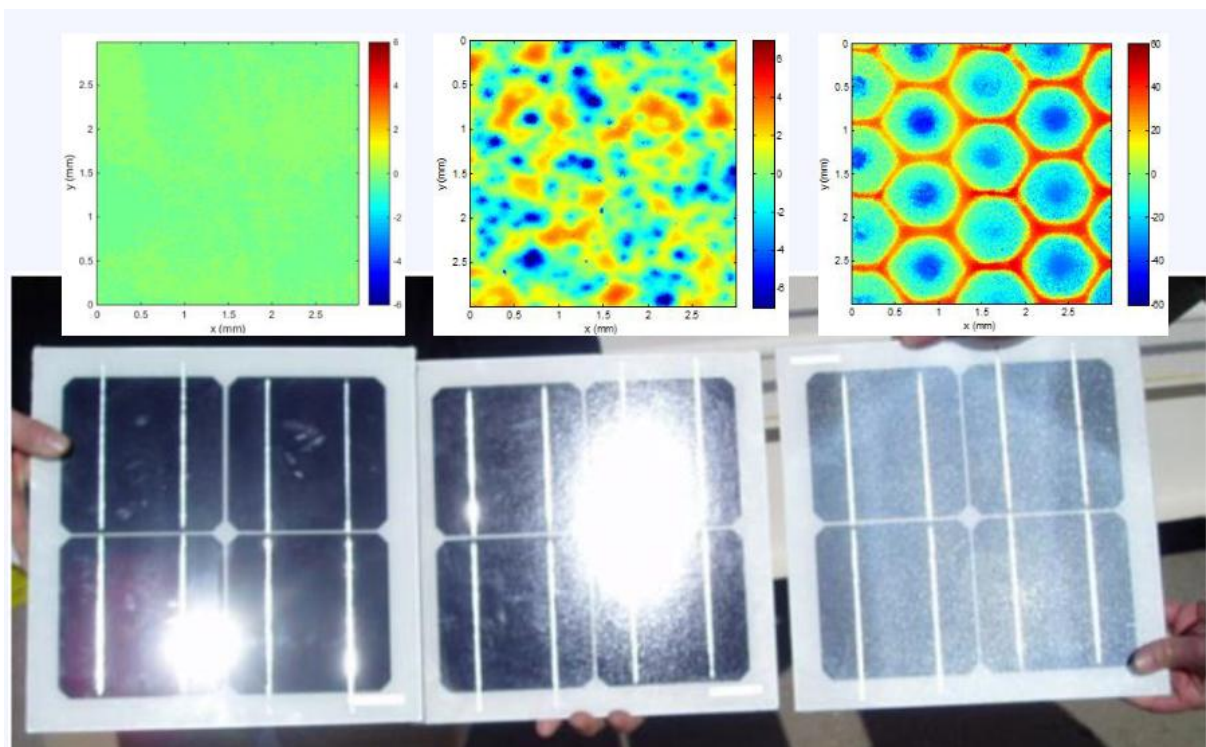


Abbildung 10: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [7]

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 [7]. 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 11.

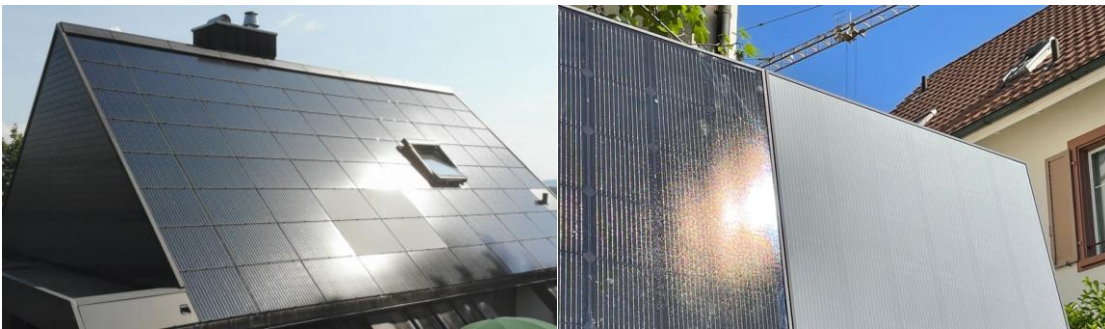


Abbildung 11: links: Module mit satinierter Folie [8], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [9]

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

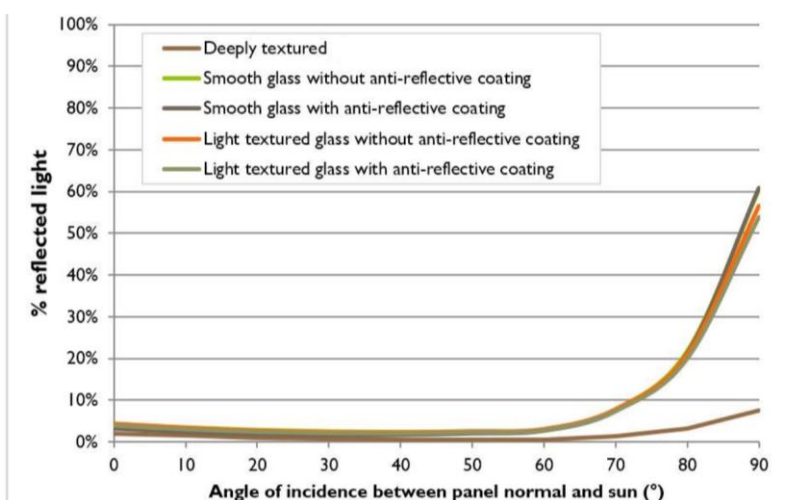


Abbildung 12 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [7]

A.3 Blendung

Blendung wird hier definiert als eine Störung der Wahrnehmung durch eine Lichtquelle. Hierfür ist zum einen die gewichtete, mittlere Helligkeit des Sichtfeldes relevant, welche zu einer entsprechenden Adaption des Auges führt, zum anderen die Helligkeiten und Kontraste der Objekte, welche wahrgenommen werden sollen.

Eine Beeinträchtigung der Sicht liegt vor, wenn die Helligkeit der Blendquelle eine Anhebung der adaptiven Helligkeit zur Folge hat, welche dazu führt, dass die Sehaufgabe schlechter erfüllt werden kann. Es wird hierfür oft der Begriff Relativblendung verwendet, welcher in Abbildung 13 vereinfacht dargestellt wird: Erhöht sich die adaptive Helligkeit, erhöht sich auch der minimale Helligkeitskontrast, den ein Objekt zur Umgebung haben muss, um gut erkennbar zu sein. Die Anpassungsfähigkeit des menschlichen Sehens endet bei einer Helligkeit zwischen $10^4 - 10^5 \text{ cd/m}^2$, eine Überschreitung dieser Helligkeiten wird als Absolutblendung bezeichnet.

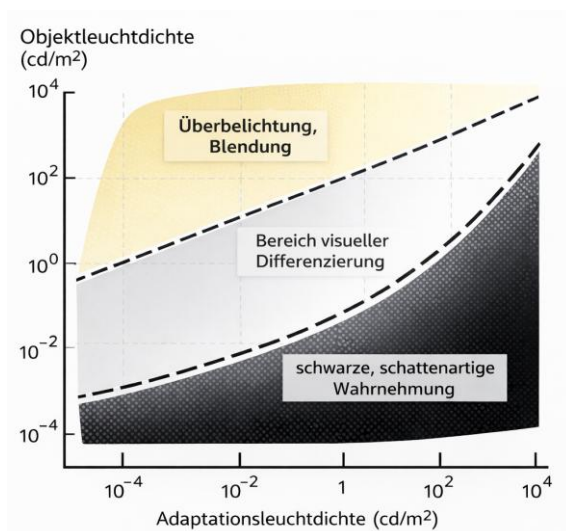


Abbildung 13: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges, adaptiert nach [10]

In der Literatur wird zwischen der psychologischen und der physiologischen Blendung unterschieden. Erstere beschreibt wie unangenehm eine Blendquelle empfunden wird, die Datenerhebung erfolgt hier generell über Befragung der Testpersonen. Letztere beschreibt die messbaren Auswirkungen der Blendung auf das visuelle System und dessen Funktion und wird über direkte Messungen am Auge, oder indirekte Messungen anhand von Leistungen in Testaufgaben ermittelt.

Wann eine Lichtquelle als unangenehm oder blendend empfunden wird, also eine psychologische Blendung auftritt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, insbesondere von der subjektiven Wahrnehmungssituation (Tätigkeit, Gefühlslage, etc.), in der sich die betrachtende Person befindet. In der Literatur werden entsprechend auch je nach Umgebung verschiedene Berechnungsmethoden vorgeschlagen [10].

A.4 Mechanismus der physiologischen Blendung

Der Funktionsmechanismus, durch welchen es zu einer physiologischen Blendwirkung kommt, ist ausreichend untersucht. Ursächlich ist die Streuung von Licht an Strukturen des visuellen Apparates (Hornhaut, Regenbogenhaut, Glaskörper). Ein Teil des gestreuten Lichts trifft auf den zentralen Sehbereich der Netzhaut (Fovea) und führt zur Erhöhung der Beleuchtung dieser Sinneszellen. Dieser zentrale Bereich der Netzhaut ist mit einer sehr viel höheren Dichte an Zapfen versehen und für das eigentliche Erkennen verantwortlich. Die Zapfen passen sich bei zusätzlichem Licht an eine höhere Helligkeit an und sind damit nicht mehr ideal zur Erfüllung der eigentlichen Sehaufgabe adaptiert [11].

Diese zusätzliche Helligkeit (durch Streuung) wird in der Literatur als Schleierleuchtdichte bezeichnet und modelliert. Die internationale Beleuchtungskommission (CIE, franz. Commission Internationale de l'Éclairage) hat für die Berechnung eine empirisch validierte Formel veröffentlicht. Mit in der Formel berücksichtigt sind Alter und Augenfarbe (p_i) der Person, welche ebenfalls einen relevanten Einfluss auf die Streuung und damit die Intensität der Schleierleuchtdichte haben.

$$L_{eq,verall.} = E_B \cdot \left\{ \frac{10}{\Theta^3} + \left[\frac{5}{\Theta^2} + 0,1 \cdot \frac{p_i}{\Theta} \right] \cdot \left\langle 1 + \left(\frac{Alter}{62,5} \right)^4 \right\rangle + 0,0025 \cdot p_i \right\}$$

Die Position der Blendquelle (Theta) im Sichtfeld der Person ist demnach im hohen Maße relevant für deren Blendwirkung. Zu einer Absolutblendung kann es in der Regel nur bei einer Blickrichtung direkt in die Blendquelle oder in deren unmittelbare Nähe kommen, eine Relativblendung ist jedoch auch bei größeren Differenzwinkeln möglich.

Für die Beschreibung der physiologischen Blendwirkung eignet sich die Angabe der relativen Kontrastschwellerhöhung ΔK_{rel} , welche als Faktor angibt, wieviel stärker der minimale Kontrast eines Objekts zu seiner Umgebung unter Anwesenheit einer Blendquelle sein muss, damit das Objekt gleich gut erfasst werden kann. L_0 ist hierbei die ursprüngliche Adaptionshelligkeit der Sehfunktion und L_V die zusätzliche Helligkeit, auch Schleierleuchtdichte L_{eq} genannt, welche durch die Blendquelle verursacht wird [12].

$$\Delta K_{rel} = \frac{L_0 + L_V}{L_0}$$

In anderer Form ist die Kontrastschwellerhöhung als TI-Wert (Threshold Increment) bekannt. Abweichende Formeln für den TI-Wert versuchen die ursprüngliche Adaptionshelligkeit L_0 beispielsweise anhand der durchschnittlichen Straßenhelligkeit herzuleiten und damit die Berechnung zu standardisieren.

$$TI = \frac{L_V}{L_0} * 100\%$$

Eine effektive Blendwirkung tritt dann auf, wenn ein Objekt schlechter, langsamer oder nicht mehr erkannt wird. Bei welchen TI-Werten es zu solchen Effekten kommt, hängt in hohem Maße von der Schwierigkeit der Sehaufgabe ab, aber auch von der Umgebungshelligkeit. Untersuchungen von [13] zeigen eine Zunahme der

relativen Kontrastempfindlichkeit um mehr als den Faktor 10 beim Tagessehen gegenüber dem Nachtsehen, hinzu kommen noch Farbkontraste, welche bei Tageslicht eine deutlich stärkere Rolle spielen. Die Erkennung von Objekten ist so am Tag deutlich leichter als bei Nacht und die Sehaufgabe entsprechend deutlich einfacher.

Unter anderem durch Anderson et al. [14] gibt detailliertere Untersuchungen für die Blendwirkung von Scheinwerfern von entgegenkommendem Verkehr bei Nacht, sowie auch für die Straßenbeleuchtung. Die CIE empfiehlt beispielsweise für Straßenbeleuchtung TI-Grenzwerte je nach Verkehrssituation zwischen 10% bis 20%. Eine Übernahme dieser Werte für das Tagessehen ist jedoch unter Anbetracht des deutlich besseren Sehvermögens und der damit deutlich einfacheren Sehaufgabe unter Tageslichtbedingungen nicht sinnvoll.

Untersuchungen in einem Fahrsimulator durch [15] stellten unter Tageslichtbedingungen erste messbare Effekte für eine verminderte Fahrleistung erst ab einer relativen Kontrastanhebung mit einem TI von ca. 100% fest. Es wurde hier jedoch lediglich das Halten der Spur als Fahraufgabe untersucht. Auch in [12] wird ein TI von 100% für eine relevante physiologische Blendung genannt. Unter Anbetracht der eingeschränkten Studienlage lässt sich als konservative Annahme zumindest feststellen, dass bei einer Unterschreitung des TI-Grenzwerts von 20%, wie er für nächtliche Straßenbeleuchtung definiert wird, auch bei Tageslicht keine relevante Blendwirkung für Verkehrsteilnehmer gegeben ist.

Die zeitliche Dimension von Blendung ergibt sich im Wesentlichen aus der Geschwindigkeit der Hell- und Dunkel-Adaption der Zapfen. Untersuchungen durch Stockman et al. [16] ermitteln in Versuchen zwei unterschiedliche neuronale Mechanismen, einen schnellen mit einer Zeitkonstante im Bereich mehrere hundert Millisekunden und einen langsameren im Bereich von 1-2 Sekunden. Eine Blendwirkung tritt entsprechend sehr schnell ein und klingt ebenso schnell wieder ab. Diese schnelle Adaption funktioniert dagegen nicht mehr bei Exposition mit sehr hohen Helligkeiten über einen längeren Zeitraum, durch welche es zum Ausbleichen eines großen Teils der Photopigmente kommen kann. In solchen Fällen können bis zur Regeneration der Pigmente über mehrere Minuten dunkle Flecken wahrgenommen werden.

Hinsichtlich der Zuwendungsreizes durch Reflexionen ist bekannt, dass solche plötzlichen Lichtsignale durchaus einen Zuwendungsreiz auslösen. Die Zeit, welche der Blick auf den Reiz fokussiert bleibt, korreliert stark mit der Schwierigkeit den Reiz zu identifizieren. Reflexionen werden sehr schnell als solche erkannt und binden die Aufmerksamkeit daher nur sehr kurz [17]. Die Analyse der Blendwirkung fokussiert sich daher auf die Blendwirkung bei Ausführung der Sehaufgabe.

B Rechtliche Beurteilungsgrundlagen

B.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz

Rechtliche Grundlage für die Beurteilung ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz. In diesem heißt es:

§ 5 Pflichten der Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen

(1) Genehmigungsbedürftige Anlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass zur Gewährleistung eines hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt

1. schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können;
2. Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen getroffen wird, insbesondere durch die dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen;

§ 22 Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen

(1) Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass

1. schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind,
2. nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden und
3. die beim Betrieb der Anlagen entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können.

B.2 Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI)

Für die Beurteilung, wann von erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft auszugehen ist, stützt sich das Gutachten auf die rechtlich nicht verbindlichen, aber dennoch maßgeblichen *Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI)* [4].

Gemäß den LAI-Hinweisen werden folgende Orte als schutzwürdige Räume definiert und sind demnach auf potenzielle Blendung zu untersuchen:

- 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

Ist einer dieser Räume von Blendung betroffen, wird überprüft, ob es zu einer erheblichen Belästigung im Sinne der LAI-Hinweise kommt. Die LAI-Hinweise leiten Bewertungsgrößen aus einem Hinweispapier für Windenergieanlagen [2] ab und definieren diese Bewertungsgrößen wie folgt:

*In Anlehnung an [7] kann eine erhebliche Belästigung im Sinne des BImSchG durch die maximal mögliche astronomische Blenddauer unter Berücksichtigung aller umliegenden Photovoltaikanlagen vorliegen, wenn diese **mindestens** 30 Minuten am Tag oder 30 Stunden pro Kalenderjahr beträgt.*

Liegt die Blenddauer unterhalb dieser Grenzwerte, wird die Blendung als allgemein hinnehmbar bewertet. Liegen die Blenddauern oberhalb dieser Werte, wird eine Einschätzung zur voraussichtlichen Beeinträchtigung gegeben, sowie gegebenenfalls Maßnahmen vorgestellt, mit welchen die Grenzwerte nicht überschritten werden. Die LAI-Hinweise geben die Methodik vor, nach welcher die potenziellen Blendzeiten zu bestimmen sind, welche auch im Gutachten für die Ermittlung potenzieller Blendung auf schutzwürdige Immissionsorte angewandt wird.

B.3 Eckpunktepapier Photovoltaik

Die Beurteilung für Bundesfernstraßen richtet sich nach dem *Eckpunktepapier Photovoltaik: Blendwirkungen und Blendgutachten des Fernstraßen-Bundesamt (FBA) [3]*. Reflexionen im Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer von wenigstens $\pm 30^\circ$ zur Fahrtrichtung (je nach Verkehrssituation zu erweitern) sind demnach als potenziell sichtbeeinträchtigend anzusetzen. Eine relevante Blendwirkung für den Verkehr ist auszuschließen.

Im Rahmen einer Begutachtung kann jedoch nachgewiesen werden, dass keine relevanten Blendwirkungen vorliegen. Der Nachweis erfolgt mittels entsprechender Berechnungen. Die Diskussion der Ergebnisse ist anschließend detailliert und unter Angabe entsprechender Quellen darzulegen.

Eine Reflexion kann als nicht erheblich beeinträchtigend eingestuft werden, wenn einer der nachfolgenden Punkte erfüllt ist:

- *Die reflektierende Fläche weist eine geringe Leuchtdichte von $\leq 30.000 \text{ cd/m}^2$ auf.*
- *Die reflektierende Quelle für die fahrzeugführende Person erscheint nur sehr klein (z. B. aufgrund der Entfernung).*
 - *Wenn die vertikale Größe der Blendquelle im Sichtfeld und außerhalb des zentralen Sehbereichs ($\pm 10^\circ$) des Betrachtenden $\leq 0,30^\circ$ beträgt, ist anzunehmen, dass keine erheblichen Blendwirkungen möglich sind.*
- *Die Sonne überlagert die Blendwirkung der PV-Anlage.*
 - *Dabei ist zu beachten, dass Sonnenblendungen in der Regel durch eine Blende im Fahrzeug reduziert werden können.*
 - *Erst bei sehr tiefen Sonnenständen (Höhe $\leq 5^\circ$) kann argumentiert werden, dass die Sonnenblendung die Blendwirkung der PV-Anlage dominiert.*

- *Die Reflexionen treten innerhalb des relevanten Sehbereichs ($\pm 30^\circ$ ggf. Erweiterung wg. der verkehrlichen Situation – siehe oben) auf, aber auf Grund ihres Winkelabstands zur Hauptblickrichtung und ihrer Intensität führen sie zu keiner relevanten Blendwirkung.*
- *Weitere Aspekte sind möglich, jedoch plausibel und fundiert darzulegen*

C Certification Specifications and Guidance Material for Aerodromes Design

Für Blendung im Flugverkehr folgt das Gutachten der Beurteilung der *European Aviation Safety Agency 2022 - Certification Specifications and Guidance Material for Aerodromes Design (CS-ADR-DSN)* [5].

In dieser wird festgestellt, dass eine Blendung der Fluglotsen im Tower sowie der Piloten beim Landeanflug und auf dem Flugfeld mit einem inakzeptablen Risiko verbunden ist. Als Grenzwert für die Erheblichkeit wird eine Leuchtdichte über 20.000 cd/m² definiert.

Entsprechend wird eine potenzielle Blendung beim bloßen Überfliegen einer nicht konzentrierenden Solaranlage, außerhalb des Landeanflugs, als unkritisch eingestuft.