Gesellschaft für Solarenergie Berlin mbH
Unternehmen des DGS Landesverbandes Berlin Brandenburg e.V.

DGS Gesellschaft für Solarenergie Berlin mbH
Erich-Steinfurth-Str. 8
10243 Berlin

Phone +49 (030) 29 38 12 60
Fax +49 (030) 29 38 12 61
Email dgs@dgs-berlin.de
Web www.dgs-berlin.de

Fachgutachten zur Bewertung der Blendwirkung durch Reflexion an PV-Modulen (Blendgutachten) für die PV-Anlage Bad Schönborn - Philippsee

Anlage:	PV-Anlage Philippsee 49°12'26.67"N, 8°37'22.96"E 76669 Bad Schönborn
in Auftrag gegeben von:	O&L Nexentury GmbH Maximilianstraße 2 a 82319 Starnberg
Gutachter:	Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn
Bearbeiter:	B. Sc. Markus Stich

Berlin, 12.01.2023

Gesellschaft für Solarenergie Berlin mbH
Unternehmen des DGS Landesverbandes Berlin Brandenburg e.V.

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 ... 10
6 Ergebnisse ... 11
7 Schlussbemerkung ... 13
8 Literaturverzeichnis ... 14
9 Abbildungsverzeichnis ... 15

Gesellschaft für Solarenergie Berlin mbH
Unternehmen des DGS Landesverbandes Berlin Brandenburg e.V.

1 Einleitung

Im folgenden Gutachten wird die durch Reflexion direkter Sonneneinstrahlung verursachte Lichtemission der geplanten PV-Anlage Philippsee und die damit einhergehende potenzielle Beeinträchtigung der Umgebung untersucht und nach den *Hinweisen zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen* (kurz: LAI) der *Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz* bewertet. Hierbei werden zunächst relevante Immissionsorte ausgemacht, die einer näheren Betrachtung bedürfen. Es werden Zeitraum und Immissionswinkel potenzieller Blendung ermittelt und bei Bedarf Blendschutzmaßnahmen erarbeitet, um eine solche zu verhindern.

2 Beschreibung der Umgebung

Die PV-Anlage als schwimmende Plattform auf dem Philippsee in Bad Schönborn geplant. Es handelt sich um einen Baggersee. Am nördlichen Ufer befindet sich das Kieswerk Philipp & Co. KG, dessen Elektrizitätsbedarf weitestgehend durch die Anlage gedeckt werden soll. Östlich des Baggersees führt die Kreisstraße K3575 in Nord-Süd-Richtung. Im Süden der Anlage befindet sich das Strandbad Philippsee. Eine Übersicht über die Umgebung der PV-Anlage wird in Abbildung 1 gegeben.

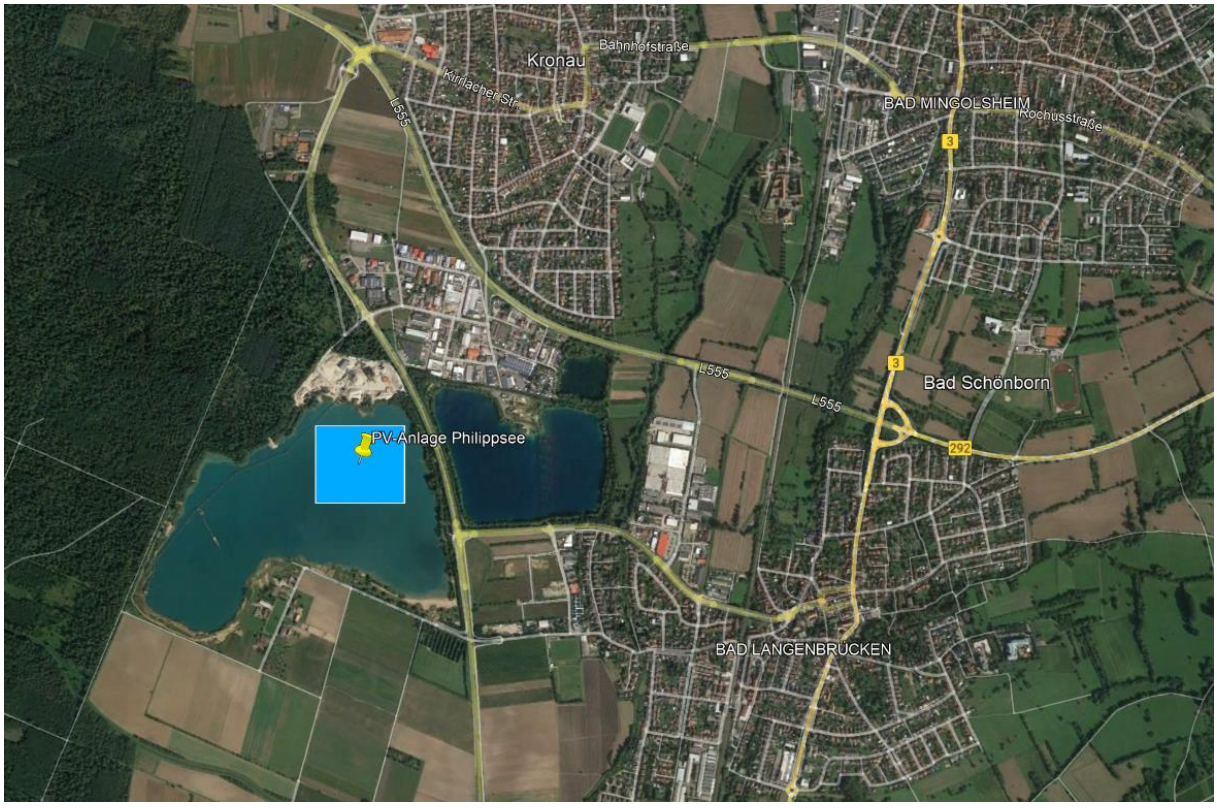


Abbildung 1: Geplante PV-Anlage Philippsee und Umgebung (Quelle: Google Earth)

Gesellschaft für Solarenergie Berlin mbH
Unternehmen des DGS Landesverbandes Berlin Brandenburg e.V.

3 Beschreibung der PV – Anlage

Der Solarpark wird mit einer Nennleistung von rund 15 MWp auf einer Fläche von ca. 9,3 Hektar geplant. Eine Darstellung des Belegungsplans ist in Abbildung 2 gegeben. Geplant ist eine Ost-West-Ausrichtung mit 90° / 270° mit 13°-Neigungswinkel. Als Unterkonstruktion dient eine Satteldachstruktur mit zwei vertikal ausgerichteten PV-Modulen, welche auf den HDPE-Schwimmkörpern installiert wird. Eine Darstellung der Unterkonstruktion ist in Abbildung 3 gegeben. Es werden voraussichtlich 540 Wp-Module mit einer Länge von 2,256 m verwendet. Die Höhe der Unterkonstruktion liegt somit bei 0,51 m, hinzu kommt die Höhe der Schwimmkörperkonstruktion. Die maximale Höhe der Moduloberkante wird auf 1,5 m angegeben.

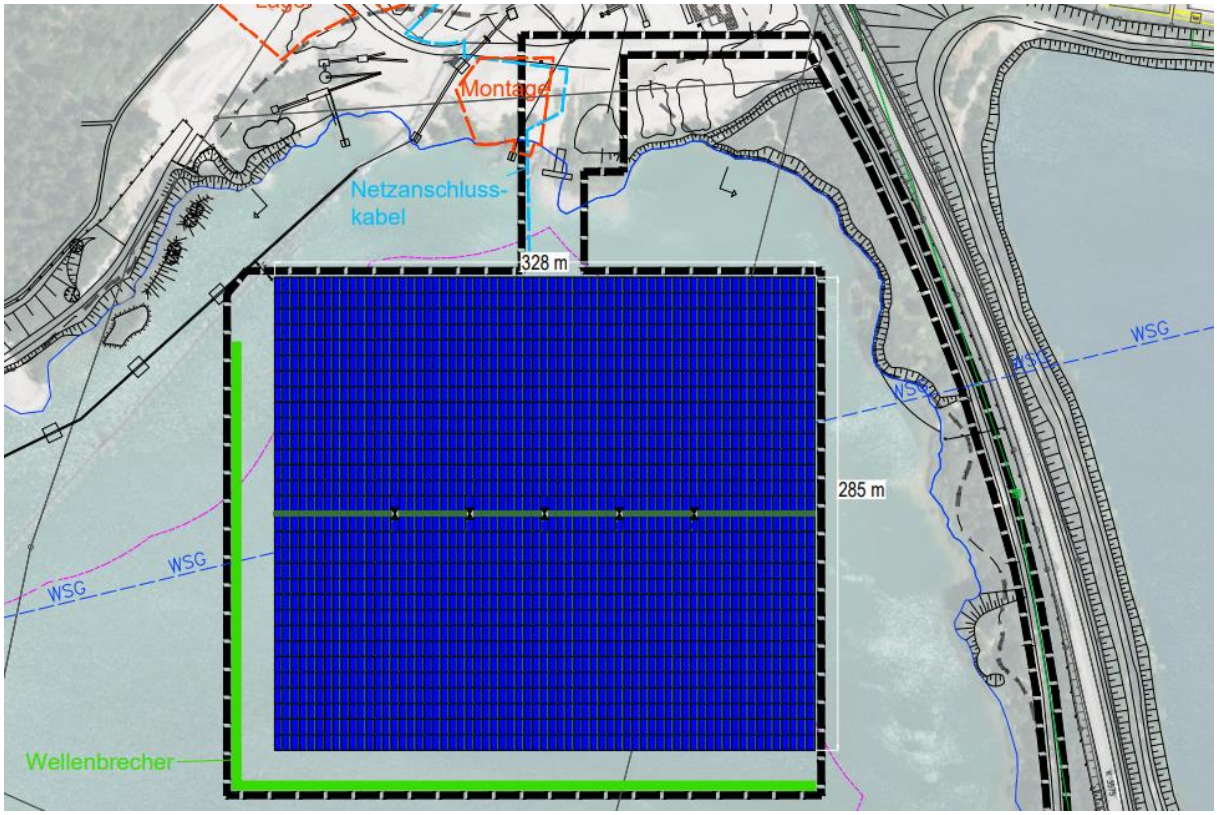


Abbildung 2: Belegungsplan der PV-Anlage (Quelle: Auftraggeber)

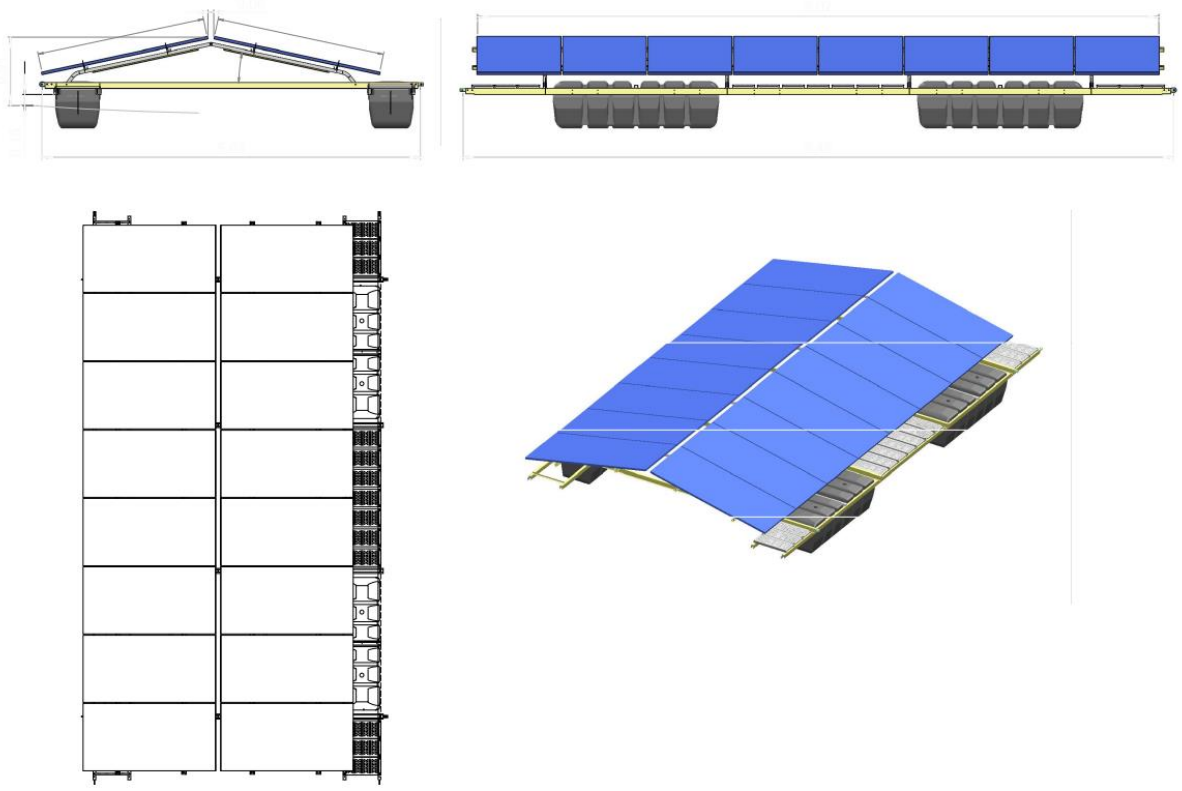


Abbildung 3: Unterkonstruktion und Schwimmkörper (Quelle: Auftraggeber)

4 Grundlagen der Optik

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Berechnung der Reflexion erläutert.

4.1 Geometrische Reflexionssituation

Nach dem Reflexionsgesetz ist der Winkel des einfallenden Lichtstrahls bezogen auf die Flächennormale (Senkrechte, Lot zur Fläche) gleich dem Winkel des reflektierten Strahls zur Normalen ($\alpha = \beta$).

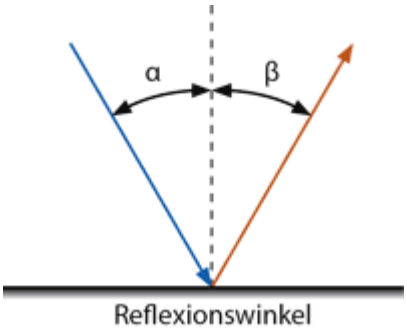


Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls

Das Reflexionsgesetz gilt grundsätzlich bei der Reflexion von Lichtstrahlen unabhängig davon, ob es sich bei der reflektierenden Fläche um eine ebene oder raue Oberfläche handelt. Im Fall einer rauen Oberfläche ändert sich jedoch der Einfallswinkel mit dem konkreten Einfallsort, sodass es zu einer Aufweitung des reflektierten Strahls kommt. Generell gilt, je rauer die Oberfläche, desto diffuser die Reflexion. In Abbildung 5 ist in a) die ideal gerichtete Reflexion an einer völlig glatten Oberfläche, eine reale auftretende Streuung an einer unebenen Oberfläche und eine ideal gestreute Reflexion nach dem Lambertschen Gesetz zu sehen.

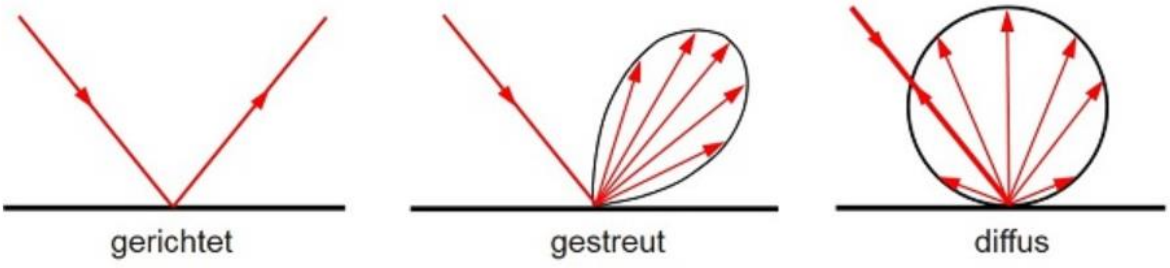


Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) Ideale diffuse Reflexion (Trempler 2015)

Bei realer Reflexion kommt zudem zu sogenannter Bündelaufweitung, einer Streuung um den idealen Reflexionswinkel. Mit steigendem Differenzwinkel zwischen idealem Reflexionswinkel und Streuungswinkel 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, in Abbildung 6.

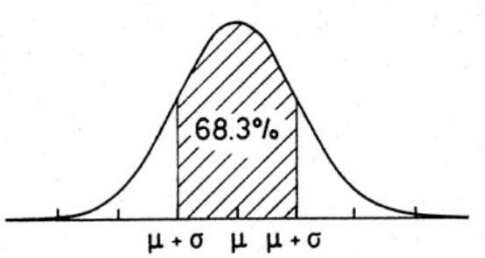


Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen

Entscheidend für die Reflexionseigenschaften eines PV-Moduls ist die Oberflächenstruktur des Glases. In Abbildung 7 sind Messungen der Oberflächenstruktur und Bilder der auftretenden Reflexion für drei unterschiedlich stark texturierten Frontgläser zu sehen.

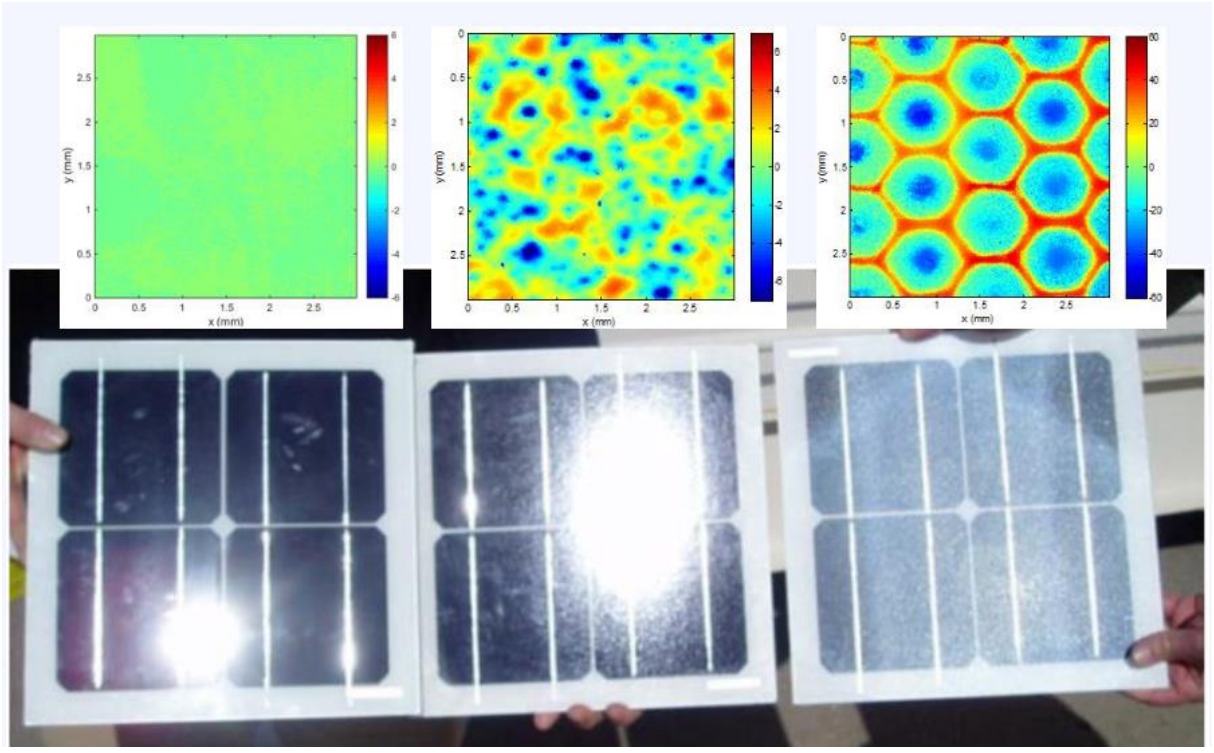


Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert (Yellowhair und Ho 2015)

In der Messdatenanalyse wurde für Floatglas ein Strahlweitung von 20mrad (1,16°), für leicht- bis mittelstark texturiertes Glas eine Aufweitung von 92-184 mrad (5,34-10,6°) und für tiefstrukturiertes Glas 1000 mrad (58°) gemessen (Yellowhair und Ho 2015). Während leicht bis mittelstark strukturiertes Glas bereits als Standardprodukt vertrieben wird, handelt es sich bei tief-strukturiertem 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 beinahe vollständig blendfreie Module herstellen, siehe Abbildung 8.

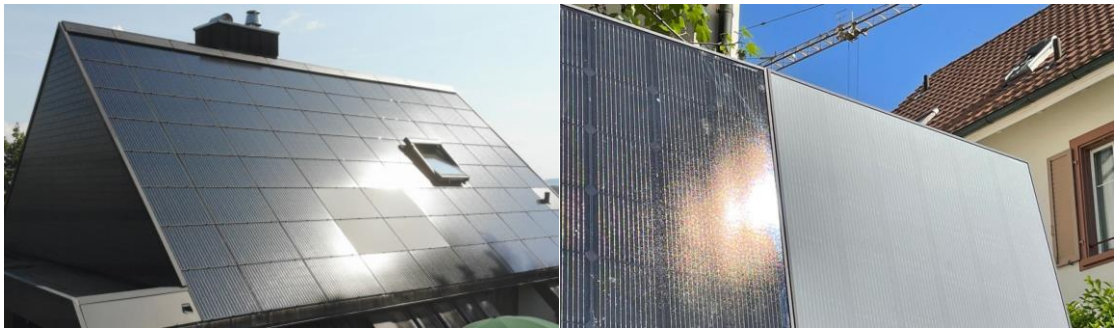


Abbildung 8: links: Module mit satinierter Folie (Bucher 2021), rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul (Warthmann 2021)

Solarmodule sind so konzipiert, dass sie einen möglichst hohen Anteil des Sonnenlichtes zu nutzen, das Frontglas also eine möglichst hohe Transmissionsgrad und möglichst niedrigen Reflexionsgrad aufweist. Die Transmission von Solargläser 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 Modularten stark an, zu sehen in Abbildung 9, Ausnahme sind hier nur tief texturierte Module.

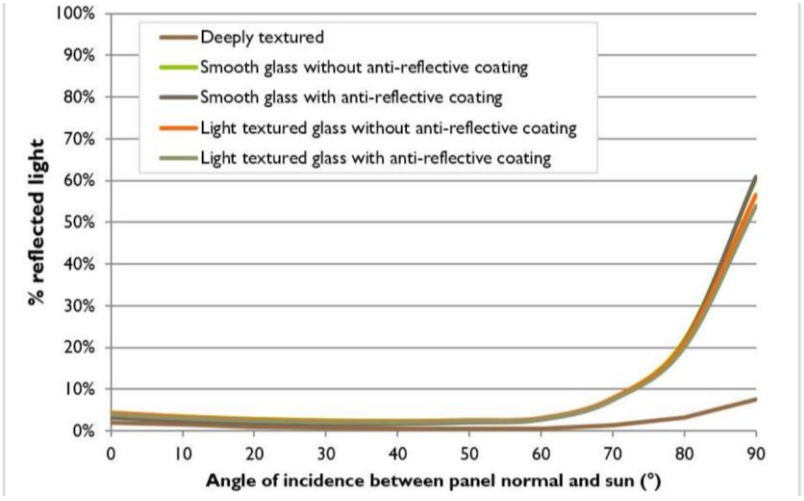


Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen (Yellowhair und Ho 2015)

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 welche das Auge fokussiert ist. Wenn die Helligkeit der Blendquelle (gewichtet mit deren Entfernung zum zentralen Sichtfeld), eine Anhebung der adaptiven Helligkeit zur Folge hat, welche dann dazu führt, dass das Ziel nicht mehr richtig wahrgenommen werden kann, liegt eine Beeinträchtigung der Sicht vor. Dies wird in Abbildung 10 verdeutlicht: Erhöht sich die Adaptive Helligkeit, erhöht sich auch die minimale Helligkeit, die ein Objekt haben muss, um gut erkennbar zu sein.

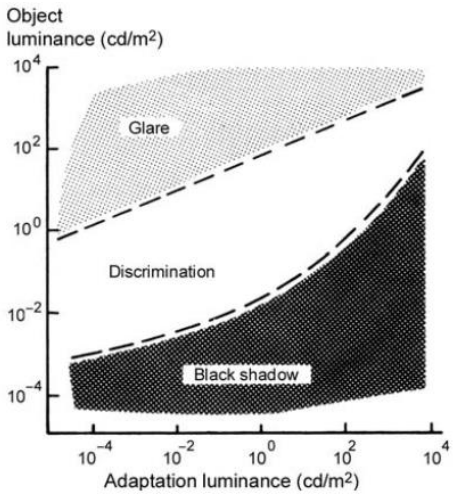


Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges (Boyce 2014)

Es wird zwischen Blendung unterschieden, welche eine Beeinträchtigung der Sicht zur Folge hat und einer Blendung welche „nur“ als unangenehm empfunden wird. Während eine Beeinträchtigung der Sicht in Verkehrssituationen gänzlich vermieden werden sollte, ist für ortsfeste Beobachter eine kurzeitige 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 (Boyce 2014).

5 Methodik der Untersuchung

Um die betroffenen örtlich aufgelösten Bereiche bestimmen zu können und eine quantitative Aussage über die Reflexionsimmissionen zu treffen, kann ein Simulationstool verwendet werden. Mit diesem kann minutengenau simuliert werden 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 (Ministerium für Umwelt 2012)

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 (Immisionsschutz 2002) 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.“* (Ministerium für Umwelt 2012)

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 (OVE, Österreichischer Verband für Elektrotechnik 2016). 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 potenzieller Blendung im Verkehrsbereich mit der Behörde und den Beteiligten eine Risikoanalyse zur Gefährdungsbeurteilung vorgenommen werden, um ggf. Blendschutzmaßnahmen vorzunehmen.

6 Ergebnisse

Auf Basis der GPS-Koordinaten und der Modulausrichtung werden die Reflexionsdiagramme für die Ost und Westausrichtung der Modulflächen erstellt, siehe Abbildung 11 und Abbildung 12. Es ergeben sich in Horizontnähe mögliche Blendwinkel zwischen 28°-95° für die Ostausrichtung und zwischen 265°-332° für die Westausrichtung. In Abbildung 13 sind die Bereiche potenzieller Blendung dargestellt, es ist ersichtlich, dass durch die Module in Westausrichtung keine Blendung der K3575 möglich ist.

Im nächsten Schritt werden die relevanten Immissionswinkel der Verkehrsteilnehmer auf der K3575 ermittelt. In Fahrtrichtung Süden liegt der relevante Immissionswinkel, in welchem es zu potenzieller Blendung kommen könnte zwischen 296°-7°. In Fahrtrichtung Norden liegt der relevante Immissionswinkel zwischen 128°-189°. Es kann demnach in keiner der beiden Fahrtrichtungen zu potenzieller Blendung kommen. In Abbildung 11 wurden die relevanten Sichtwinkel der Verkehrsteilnehmer in grün dargestellt.

Das Gutachten stellt zudem fest, dass sich bei der derzeitigen Bepflanzung entlang der Straße keine freien Sichtwinkel in Richtung der PV-Anlage ergeben. Hieraus folgt, dass auch bei anderen Ausrichtungen der PV-Module eine potenzielle Blendung des Verkehrs entlang der K3575 ausgeschlossen werden kann, insofern der Bewuchs mit Sichtunterbrechung zwischen PV-Anlage und der K3575 entlang der Straße bestehen bleibt.

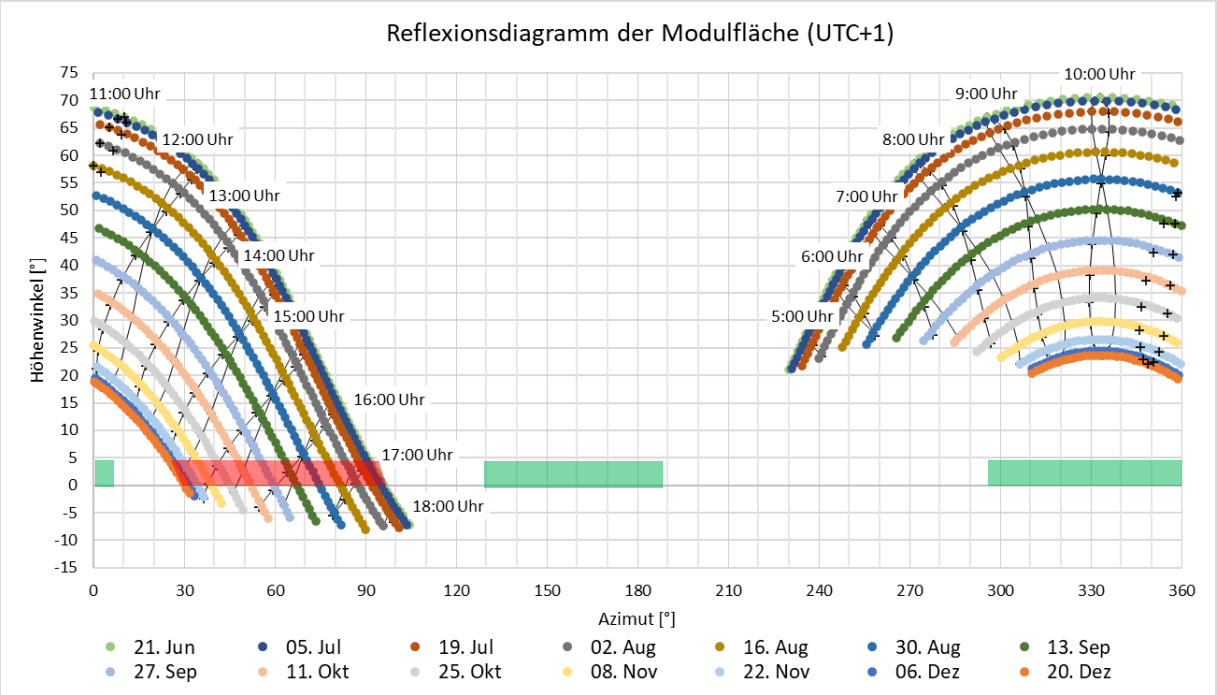


Abbildung 11: Reflexionsdiagramm für Modulflächen mit Ostausrichtung; von potenzieller Blendung betroffene Sichtwinkel in Horizontnähe in rot; relevante Sichtwinkel der Verkehrsteilnehmer der K3575 in grün

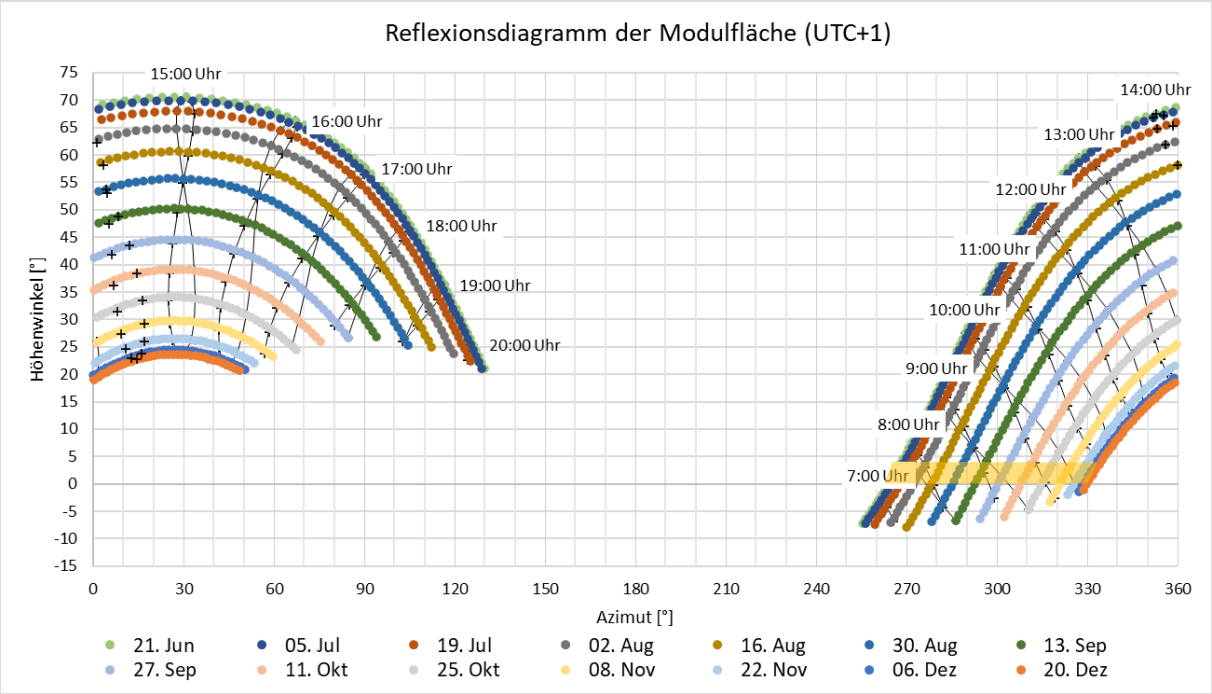


Abbildung 12: Reflexionsdiagramm für Modulflächen mit Westausrichtung; von potenzieller Blendung betroffene Sichtwinkel in Horizontnähe in gelb

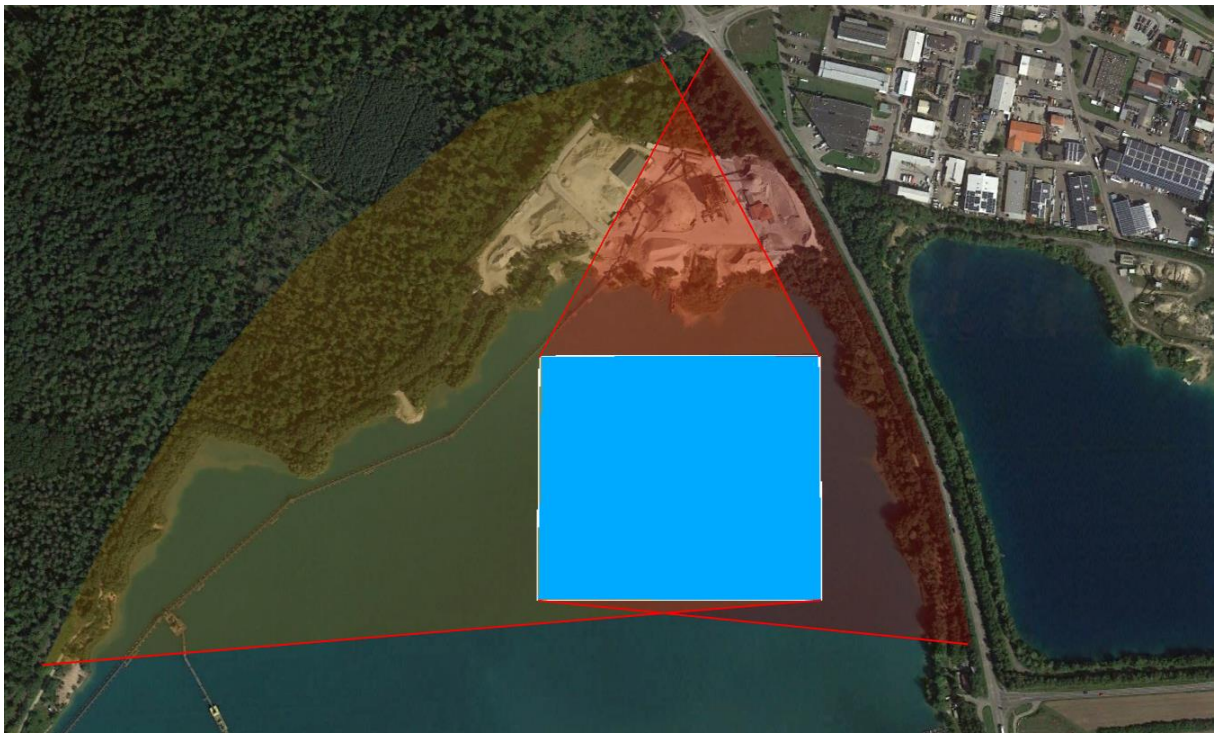


Abbildung 13: Modulfläche in blau; mögliche horizontale Reflexionswinkel für Ostausrichtung (rot) und Westausrichtung (gelb)

7 Schlussbemerkung

Es wurde die potenzielle Blendung des Verkehrs entlang der K3575 durch Reflexion der Sonne an PV-Modulen der geplanten PV-Anlage Philippsee untersucht. Das Gutachten kommt zum Schluss, dass es aufgrund der geometrischen Reflexionssituation in keiner der beiden Fahrtrichtungen zu potenzieller Blendung kommen kann. Das heißt, dass selbst wenn die PV-Anlage von der Straße einsehbar wäre, keine potenzielle Blendung von den PV-Modulen ausgehen würde. Zudem stellt das Gutachten fest, dass bei Bestehenbleiben des geschlossenen Bewuchses entlang der K3575 auch bei anderen Ausrichtungen der PV-Module eine potenzielle Blendung des Verkehrs entlang der K3575 ausgeschlossen werden kann.

8 Literaturverzeichnis

Boyce, Peter R. *Human Factors in Lightning.* Boca Raton: CRC Press, 2014.

Bucher, Christof. „bulletin.ch." *Reflexionen an Photovoltaikanlagen.* 24. September 2021. https://www.bulletin.ch/de/news-detail/reflexionen-an-photovoltaikanlagen.html.

Federal Aviation Administration. „Interim Policy, FAA Review of Solar Energy System Projects on Federally Obligated Airports." *Vol. 78, No. 205.* Federal Register, 23. October 2013.

ForgeSolar. *ForgeSolar.* 29. 07 2022. https://www.forgesolar.com/help/#ref-yel-2015.

Immisionsschutz, Länderausschuss für. „Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immission von Windnergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise), verabschiedet auf der 103. Sitzung." 2002.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg als Vorsitzland der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI). „Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmisonen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immisionsschutz (LAI)." 2012.

OVE, Österreichischer Verband für Elektrotechnik. „Blendung durch Photovoltaikanlagen." Wien, 1. 11 2016.

Schierz, Christoph. *Über die Blendbewertung von reflektierenden Sonnenlich bei Solaranlagen.* Ilmenau: TU Ilmenau, FG Lichttechnik, 2012.

Trempler, J. *Optische Eigenschaften.* München: Carl Hanser Verlag, 2015.

Warthmann, Peter. „gebaeudetechnik.ch." *Sandstrahl-Atelier löst Blendproblem.* 15. Oktober 2021. https://www.gebaeudetechnik.ch/gebaeudehuelle/photovoltaikanlage/sandstrahl-atelier-loest-blendproblem/.

Yellowhair, Julius Yellowhair, und Clifford K. Ho. „Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and GlintGlare Impacts." *Proceedings of the ASME 2015 9th International Conference on Energy Sustainability.* Albuquerque, New Mexico: Laboratories, Sandia National, 2015. 49481.

Zehndorfer Engineering GmbH . „Lichttechnisches Gutachten Reflexionen KIOTO HC Modul." Klagenfurt, 2022.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geplante PV-Anlage Philippsee und Umgebung (Quelle: Google Earth) 3
Abbildung 2: Belegungsplan der PV-Anlage (Quelle: Auftraggeber) 4
Abbildung 3: Unterkonstruktion und Schwimmkörper (Quelle: Auftraggeber) 5
Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls 6
Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) Ideale diffuse Reflexion (Trempler 2015) 6
Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung 7
Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert (Yellowhair und Ho 2015) 7
Abbildung 8: links: Module mit satinierter Folie (Bucher 2021), rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul (Warthmann 2021) 8
Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen (Yellowhair und Ho 2015) 8
Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges (Boyce 2014) 9
Abbildung 11: Reflexionsdiagramm für Modulflächen mit Ostausrichtung; von potenzieller Blendung betroffene Sichtwinkel in Horizontnähe in rot; relevante Sichtwinkel der Verkehrsteilnehmer der K3575 in grün 11
Abbildung 12: Reflexionsdiagramm für Modulflächen mit Westausrichtung; von potenzieller Blendung betroffene Sichtwinkel in Horizontnähe in gelb 12
Abbildung 13: Modulfläche in blau; mögliche horizontale Reflexionswinkel für Ostausrichtung (rot) und Westausrichtung (gelb) 12