



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.
International Solar Energy Society, German Section

DGS Landesverband Berlin Brandenburg e.V.
Erich-Steinfurth-Str. 8
10243 Berlin

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

Anlage: Solarpark Hanau Baufeld Nord
50°07'44.1"N, 8°56'17.7"O
63450, Hanau

in Auftrag gegeben von: Heraeus Site Operations GmbH & Co. KG
Heraeusstraße 12-14
63450 Hanau Deutschland

Projektnummer: A-LV23/0090

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

Bearbeiter: M. Eng. Joris Neumann

Berlin, 03.05.2024

Vereinsregister:
Amtsgericht
Berlin-Charlottenburg
VR 7591 B

Bankverbindung:
Bank für Sozialwirtschaft
BLZ 100 205 00
Konto 30 32 403

U-ID-Nr.: DE151155798
BIC: BFSWDE33BER
IBAN: DE74 1002 0500 0003 0324 03

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Beschreibung der Umgebung	3
3	Beschreibung der PV – Anlage	4
4	Grundlagen der Optik	5
	4.1 Geometrische Reflexionssituation	5
	4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen	6
	4.3 Blendung.....	8
5	Methodik der Untersuchung	9
	5.1 Bewertungsbasis	9
	5.2 Simulationstool und Modellierung	10
	5.3 Simulationsausgabe und -bewertung	11
6	Simulation.....	12
	6.1 PV - Anlage.....	12
	6.2 Immissionsorte.....	13
7	Ergebnisse	15
9	Schlussbemerkung.....	22
10	Literaturverzeichnis	23
11	Abbildungsverzeichnis.....	24

1 Einleitung

Im folgenden Gutachten wird die durch Reflexion direkter Sonneneinstrahlung verursachte Lichtemission des geplanten Solarparks Hanau 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.

Es werden hierzu zunächst relevante Bereiche ausgemacht, die einer näheren Betrachtung bedürfen. Wird für einen oder mehrere Bereiche potenzielle Blendung vermutet, kann dies anhand einer Simulation ausgeschlossen oder nachgewiesen werden. Abschließend werden die Ergebnisse bewertet und eingeordnet und bei Bedarf Blendschutzmaßnahmen empfohlen.

2 Beschreibung der Umgebung

Gelegen ist der geplante Solarpark in der Stadt Hanau im Landkreis Main-Kinzig-Kreis in Hessen. Die Flächen des Solarparks werden derzeit als Ackerland genutzt. Östlich und südlich des Solarparks verlaufen die L3193 und Bundesstraße B 43. Zudem verläuft eine zweigleisige Bahntrasse südlich des geplanten Solarparks. Eine Übersicht der Umgebung ist in Abbildung 1 gegeben.



Abbildung 1: Geplante PV-Fläche in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth)

3 Beschreibung der PV – Anlage

Die Anlagenplanung des Solarparks ist in Abbildung 2 zu sehen. Die geplante Photovoltaikanlage umfasst eine Fläche von ca. 2,0 ha. Es werden voraussichtlich ca. 6.700 einzelne Module im Baufeld Nord verbaut. Die Modulflächen des Solarparks sind mit 108° und 288° in östliche und westliche Richtung ausgerichtet mit Neigungswinkeln von 15°. Die Modulunterkante wird 0,8 m über dem Boden liegen, die Moduloberkante liegt bei bis zu ca. 2,6 m. Eine Darstellung der Unterkonstruktion ist in Abbildung 3 gegeben.

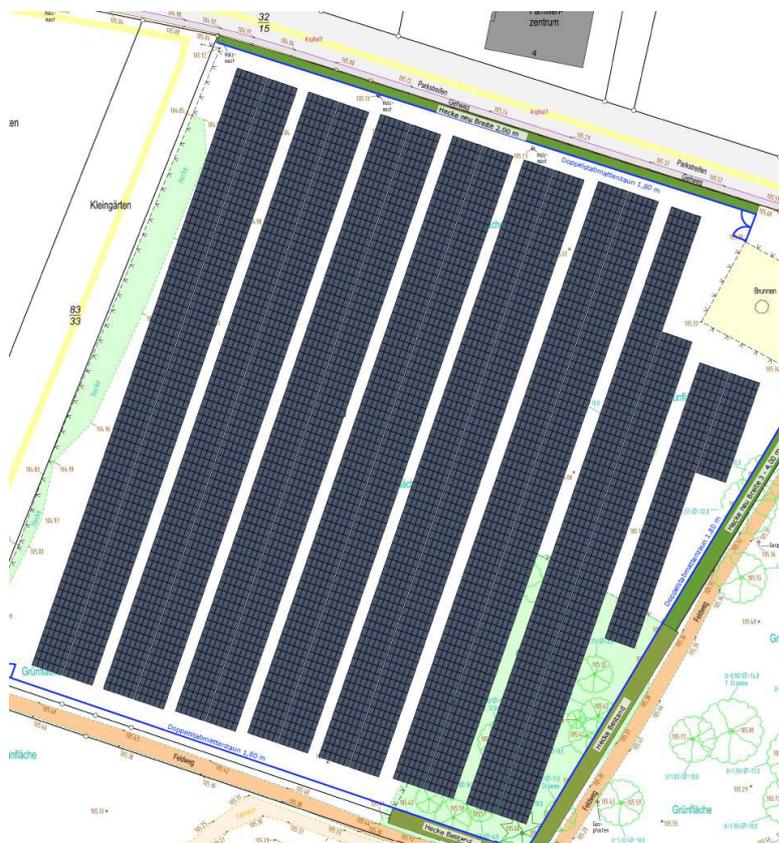


Abbildung 2: Anlagenplanung (Quelle: Auftraggeber)

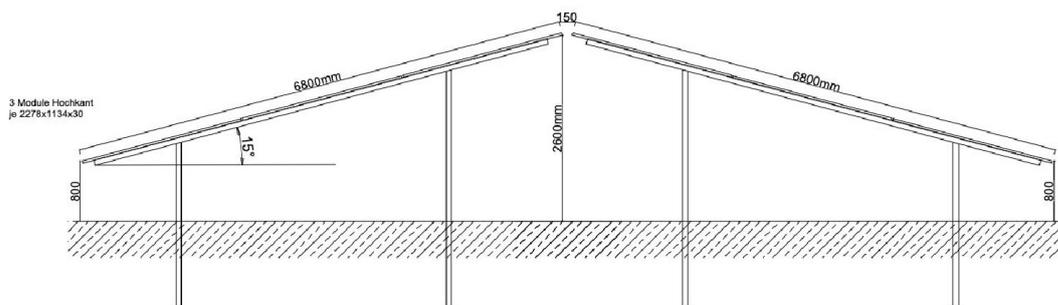


Abbildung 3: Unterkonstruktion der geplanten PV-Anlage (Quelle: Auftraggeber)

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 ($\alpha = \beta$).

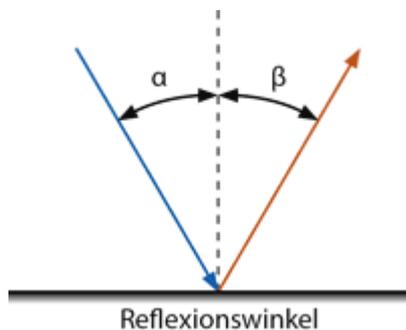


Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls

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 Lambertischen Gesetz zu sehen.

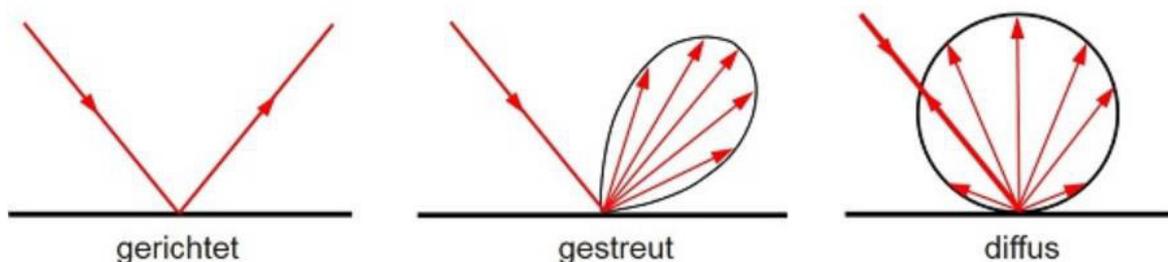


Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) Ideale diffuse Reflexion (Trempler 2015)

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

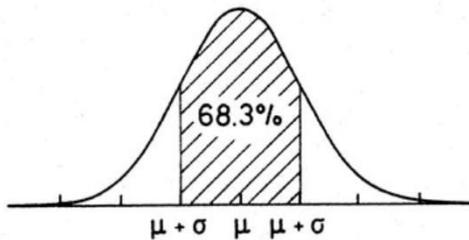


Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

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.

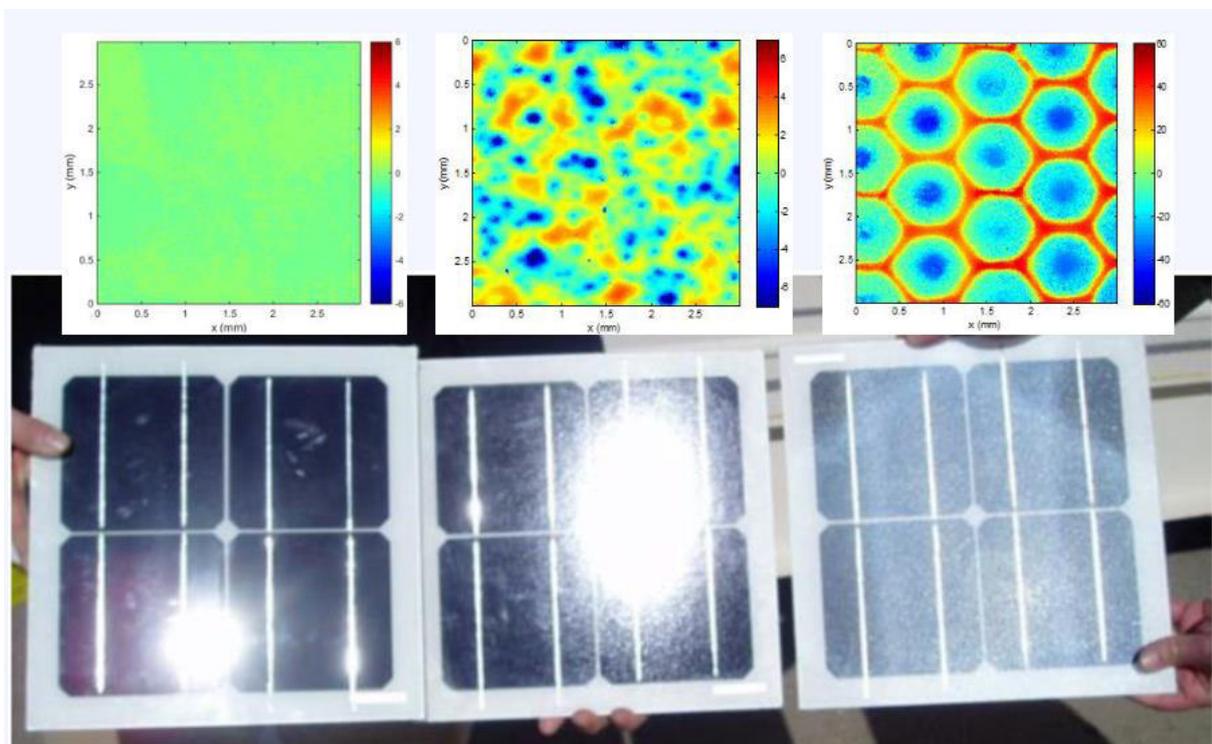


Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert (Yellowhair und Ho 2015)

In der Messdatenanalyse wurde für Floatglas ein Strahlweite von 20mrad ($1,16^\circ$), für leicht- bis mittelstark texturiertes Glas eine Aufweitung von 92-184 mrad ($5,34-10,6^\circ$) 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.

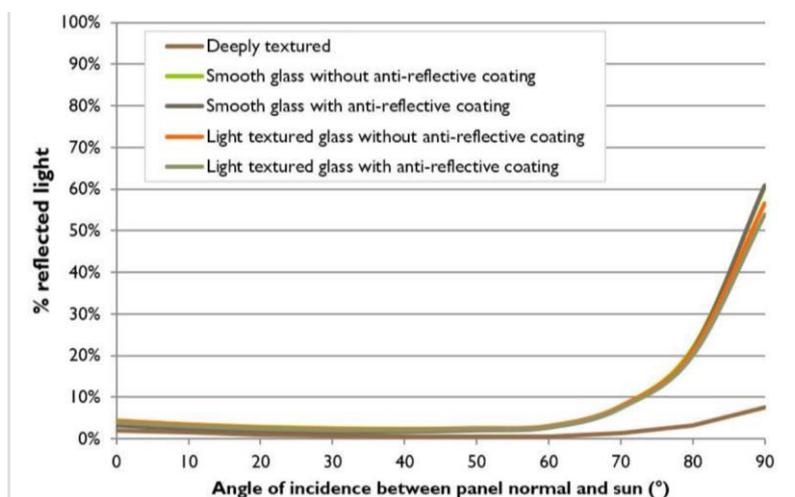


Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen (Yellowhair und Ho 2015)

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.

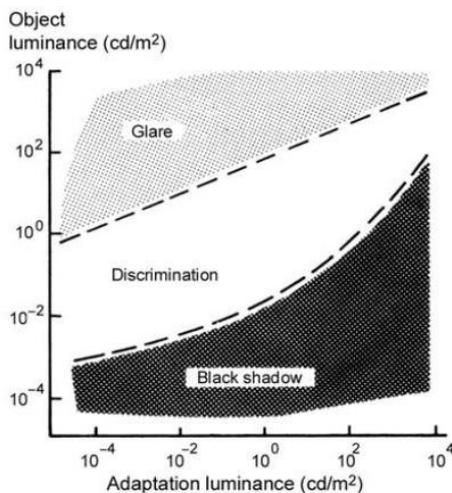


Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges (Boyce 2014)

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 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 (Boyce 2014).

5 Methodik der Untersuchung

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 (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 (Immissionsschutz 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 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 (Federal Aviation Administration 2013).

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 (Ministerium für Umwelt 2012) und die TU Ilmenau (Schierz 2012).
- 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 (OVE, Österreichischer Verband für Elektrotechnik 2016).
- 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 (ForgeSolar 2022).

5.3 Simulationsausgabe und -bewertung

Die Simulation wertet jede PV-Fläche und jeden Beobachtungspunkt bzw. Strecke einzeln aus. Es werden dabei folgende Werte für jede Minute, jeweils für die betreffende Position berechnet:

- Die Einstrahlungsstärke der Sonne in Abhängigkeit der Uhrzeit [W/m^2]
- Der berechnete Reflexionsgrad des PV-Fläche [-]
- Alle Strahlungsvektoren
- Der Raumwinkel des blendenden Bereichs der PV-Fläche aus Sicht des Beobachters [rad]
- Die Bestrahlungsstärke der Reflexion auf der Netzhaut [W/cm^2]
- Die Einstufung des Blendpotenzials auf Basis der Bestrahlungsstärke und der Größe der Blendquelle [grün/gelb/rot]
- Leuchtdichte der Blendung [cd/m^2]

Das Blendpotenzial wird gemäß Abbildung 11 in drei Bereiche unterteilt. Im grünen Bereich ist davon auszugehen, dass keine Beeinträchtigung der Sicht stattfindet, im gelben Bereich kann es dagegen zu Sichteinschränkungen kommen und im roten Bereich sogar zu dauerhaften Verbrennungen der Netzhaut. Je größer die Blendquelle (angegeben als Sichtwinkel in Milli-rad), desto größer ist auch deren Blendpotenzial.

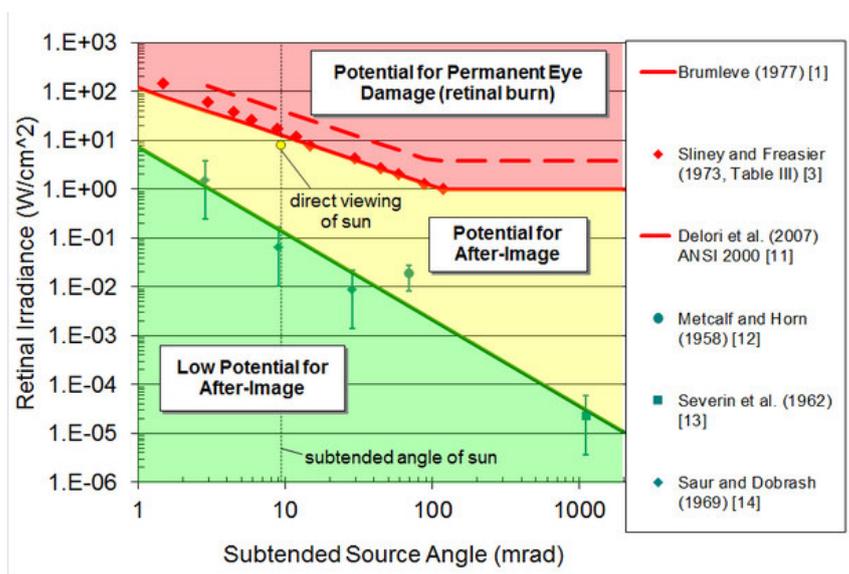


Abbildung 11: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung (ForgeSolar 2022)

6 Simulation

Dieses Kapitel stellt die Simulationsparameter dar. Es werden die Eingabedaten und Simulationsparameter für die PV-Flächen und die zu untersuchenden Immissionsorte aufgeführt. In Abbildung 12 ist eine Übersicht über die angelegte Simulation dargestellt.

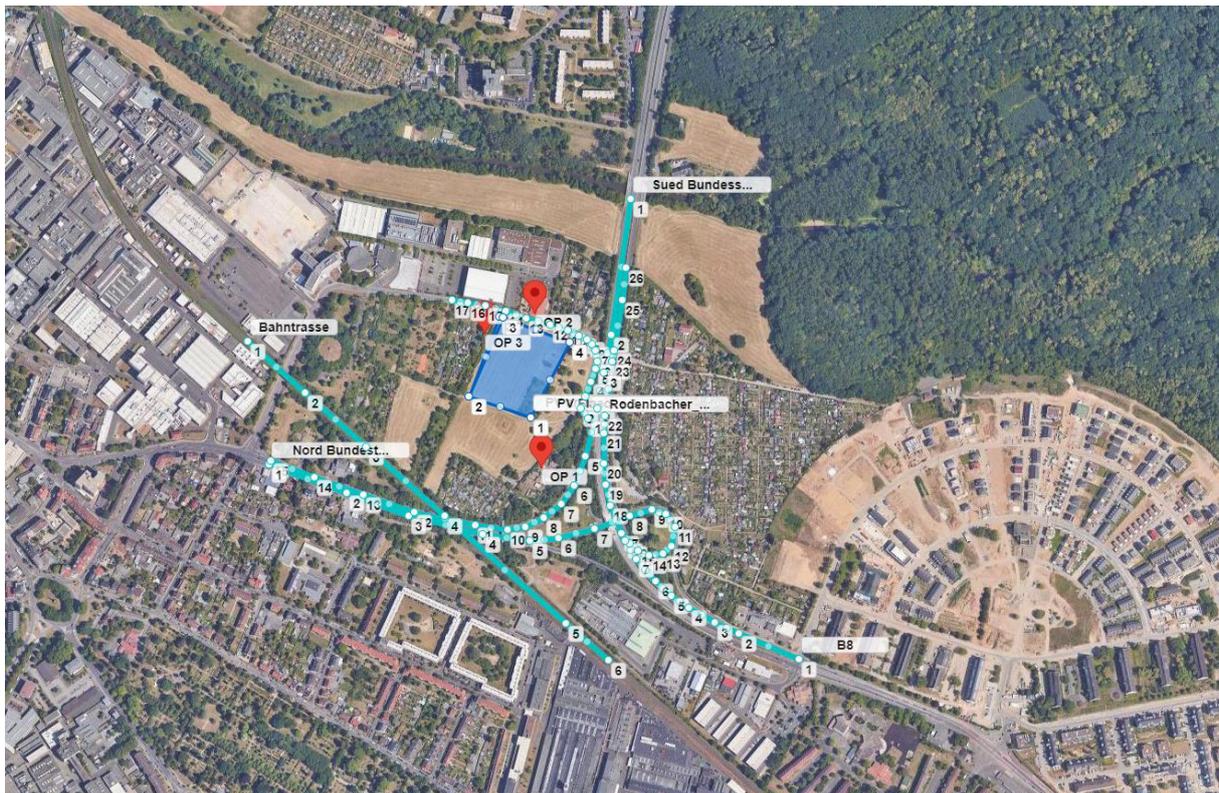


Abbildung 12: Anlage der PV-Flächen und Immissionsorte in der Simulation

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 Sattelitendaten. Als mittlere Modulhöhe ergeben sich 1,7 m. Die genauen Koordinaten der Eckpunkte der PV-Flächen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Koordinaten, Höhe ü. NN, Untersuchungshöhe und Gesamthöhe über NN der PV-Flächen

	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Modulhöhe [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
PV-Feld	1	50,12916	8,939481	106,3	1,7	107,7
	2	50,12952	8,937858	105,7	1,7	107,1
	3	50,13069	8,938648	105	1,7	106,4
	4	50,13027	8,940435	105,2	1,7	106,6

6.2 Immissionsorte

Als relevante Immissionsorte werden schutzwürdige Räume im umliegenden Gebiet untersucht, welche als OPs (*observation points*) bezeichnet werden, sowie umliegende, gegebenenfalls betroffene Verkehrswege. Als relevante Immissionsorte werden die Bahntrasse im Süden des Solarparks, L3193 und Bundesstraßen B43, der Rodenbacher Weg, sowie die Kleingartenanlage untersucht. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers, sowie Satellitenbilder. Die exakten Koordinaten, Höhe ü. NN, die für die Simulation angenommene Untersuchungshöhe und die daraus resultierende Gesamthöhe sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Koordinaten der zu untersuchenden Immissionsorte

Immissionsort	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Betrachtungshöhe [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
Kleingarten 1	1	50,12842	8,93961	106,7	1,7	108,4
Kleingarten 2	2	50,13042	8,938304	106,1	1,7	107,8
Familienzentrum	2	50,13071	8,93945	106,9	1,7	108,6
Bahntrasse	1	50,13031	8,932803	105,4	6,8	112,2
	2	50,12955	8,934134	107	6,8	113,8
	3	50,12874	8,93556	107,1	6,8	113,9
	4	50,1277	8,937379	105,6	6,8	112,4
	5	50,12609	8,940187	107,8	6,8	114,6
	6	50,12555	8,941177	107,9	6,8	114,7
L3193 Fahrtrichtung Nord-Ost	1	50,12847	8,933294	105,3	3	108,3
	2	50,12805	8,935102	104,7	3	107,7
	3	50,12771	8,93655	104,4	3	107,4
	4	50,12743	8,938251	103,1	3	106,1
	5	50,12733	8,939361	103,2	3	106,2
	6	50,12737	8,940021	103,6	3	106,6
	7	50,12751	8,940847	105,3	3	108,3
	8	50,12771	8,941663	105,4	3	108,4
	9	50,1278	8,942188	105,1	3	108,1
	10	50,12773	8,942515	105,5	3	108,5
	11	50,12754	8,94273	106,5	3	109,5
	12	50,12725	8,942633	107,7	3	110,7
	13	50,12714	8,942435	107,5	3	110,5
	14	50,12711	8,942124	107,8	3	110,8
	15	50,12718	8,941872	107,6	3	110,6
	16	50,12729	8,941679	107,5	3	110,5
	17	50,12744	8,941475	106,8	3	109,8
	18	50,12786	8,941225	105,8	3	108,8
	19	50,12817	8,94111	106,1	3	109,1
	20	50,12849	8,941065	109	3	112
	21	50,12895	8,941064	112,9	3	115,9
	22	50,1292	8,941096	111,5	3	114,5
	23	50,13001	8,94127	108,4	3	111,4
	24	50,13018	8,941301	107,7	3	110,7
	25	50,13093	8,941488	110	3	113
	26	50,13141	8,941587	112,5	3	115,5

L3193 Fahrtrichtung Süd-West	1	50,13244	8,941697	107,7	3	110,7
	2	50,13042	8,941241	107,4	3	110,4
	3	50,12985	8,941077	109	3	112
	4	50,12931	8,940908	110,6	3	113,6
	5	50,1286	8,940649	113,2	3	116,2
	6	50,12816	8,940391	111,4	3	114,4
	7	50,12788	8,940077	107,6	3	110,6
	8	50,12767	8,939664	106	3	109
	9	50,12754	8,939248	104,1	3	107,1
	10	50,1275	8,938835	103,7	3	106,7
	11	50,12756	8,938084	103,4	3	106,4
	12	50,12776	8,936676	103,8	3	106,8
	13	50,12802	8,93549	104,4	3	107,4
	14	50,12828	8,934358	104,9	3	107,9
	15	50,12853	8,933335	105,1	3	108,1
Rodenbacher Weg	1	50,12917	8,940711	108,3	3	111,3
	2	50,12931	8,940523	106,9	3	109,9
	3	50,12949	8,940646	108,3	3	111,3
	4	50,12971	8,940759	108,2	3	111,2
	5	50,1299	8,940882	108,3	3	111,3
	6	50,13002	8,940909	107,5	3	110,5
	7	50,13018	8,940872	106,7	3	109,7
	8	50,13028	8,94078	105,7	3	108,7
	9	50,13034	8,940689	105,7	3	108,7
	10	50,13041	8,940496	105,2	3	108,2
	11	50,13048	8,940239	105,5	3	108,5
	12	50,13056	8,939815	105,1	3	108,1
	13	50,13067	8,939262	105,2	3	108,2
	14	50,13077	8,938801	104,8	3	107,8
	15	50,13085	8,938329	105,2	3	108,2
	16	50,13089	8,937916	105,3	3	108,3
	17	50,13094	8,937551	105,2	3	108,2
Auffahrt Überführung Bundesstraße B8	1	50,12556	8,945595	107,3	3	110,3
	2	50,12594	8,9442	107	3	110
	3	50,12611	8,94364	106,7	3	109,7
	4	50,12633	8,943044	106,5	3	109,5
	5	50,12651	8,942631	106,8	3	109,8
	6	50,12672	8,942261	107,3	3	110,3
	7	50,12706	8,941824	107,2	3	110,2
	8	50,12733	8,941572	107,1	3	110,1

7 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Simulation bezüglich der potenziell auftretenden solaren Blendungen durch Reflexionen dargestellt. Die Simulationsergebnisse werden aufgrund der technischen Limitierung der Simulationssoftware einer weiteren Korrektur unterzogen. So ist gemäß LAI-Hinweisen keine Blendung gegeben, wenn die Richtung des Vektors der Lichtreflexion und die des Vektors der Sonnenstrahlung weniger als 10° auseinander liegen. Das bedeutet, dass die Sonne aus nahezu der gleichen Richtung scheint wie die Reflexion der Sonne an den PV-Modulen. Somit wird die Sonne, die eine höhere Lichtintensität aufweist als die Reflexion, als Hauptblendquelle wahrgenommen. Die Reflexion wird sozusagen von der Sonne überstrahlt und erscheint nicht als zusätzliche Blendung. Auch Sichtunterbrechungen werden durch die Simulation nicht ermittelt, sondern müssen nachträglich herausgefiltert werden. Die genaue Vorgehensweise hierbei wird in den folgenden Abschnitten erläutert. In Tabelle 3 sind die Werte nach genannten Korrekturen aufgeführt, kritische Werte welche den LAI-Grenzwert von 30 Stunden/Jahr bzw. 30 Minuten/Tag überschreiten oder als kritisch für den Verkehr eingestuft werden sind in Rot dargestellt. Die so simulierte Blenddauer stellt das Höchstmaß potenzieller Blendung dar, welche ohne Bewölkung auftritt.

Tabelle 3: Simulationsergebnisse: gesamte potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden
Kleingartenanlage 1	0
Kleingartenanlage 2	160,4
Familienzentrum	290,5
L3193 Fahrtrichtung Nord-Ost	0
L3193 Fahrtrichtung Süd-West	27,1
Bahntrasse	0
Rodenbacher Weg	131,4
Auffahrt Überführung Bundesstraße B8	0

Familienzentrum

Die Ergebnisse der Simulation für das Familienzentrum sind in Abbildung 13 dargestellt. Es kommt von Anfang August bis Anfang Mai zu potenzieller Blendung mit Immissionswinkeln zwischen 211° - 265° . Die potenzielle Blendung tritt zwischen 9:40 und 17:50 auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 100 Minuten erreicht.

Die Werte liegen oberhalb der Grenzwerte gemäß LAI-Hinweisen. Es werden Blendschutzmaßnahmen empfohlen.

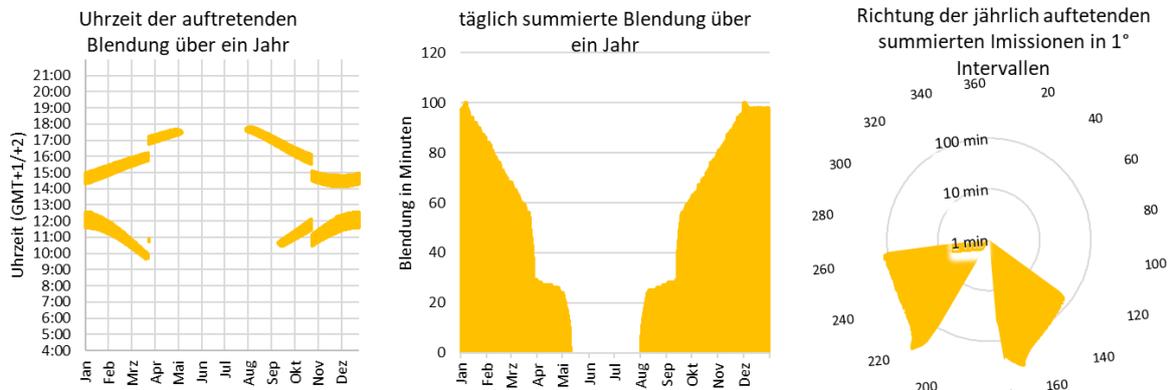


Abbildung 13: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf das Familienzentrum

Keingartenanlage 2

Die Ergebnisse der Simulation für die Kleingartenanlage 2 sind in Abbildung 14 dargestellt. Es kommt über das gesamte Jahr zu potenzieller Blendung mit Immissionswinkeln zwischen 92° - 172° . Die potenzielle Blendung tritt zwischen 8:45 und 12:10 auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 33 Minuten erreicht.

Die Werte liegen oberhalb der Grenzwerte gemäß LAI-Hinweisen. Aus Abbildung 15 ist zu entnehmen, dass über einen großen Bereich Bewuchs besteht, welcher eine Sichtunterbrechung darstellt.

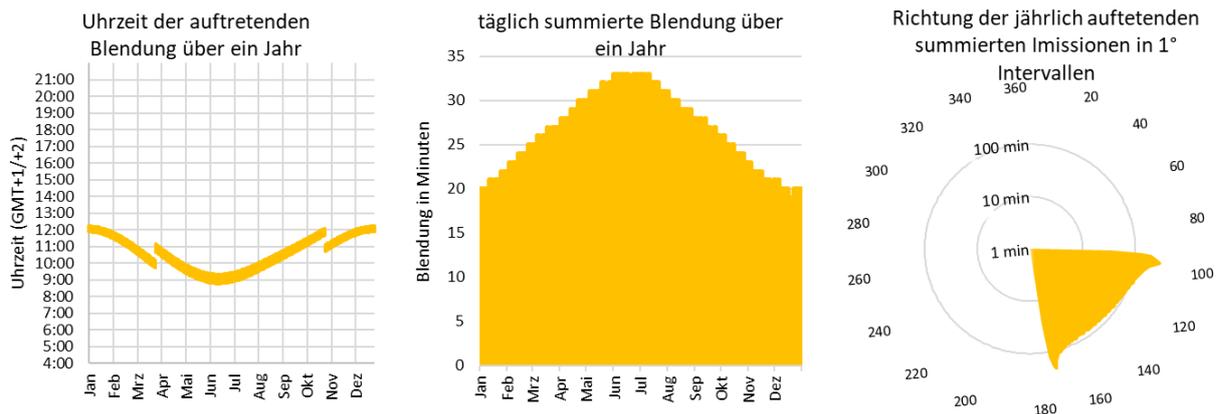


Abbildung 14: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Kleingartenanlage 2



Abbildung 15: Ansicht auf die Kleingartenanlage 2

L3193 Fahrtrichtung Süd-West

Die Ergebnisse der Simulation für die L3193 in Fahrtrichtung Süd sind in Abbildung 16 dargestellt. Es kommt von Anfang November bis Anfang Februar zu potenzieller Blendung mit Immissionswinkeln zwischen 214° - 223°. Die potenzielle Blendung tritt in den Nachmittagsstunden zwischen 14:25 - 15:25 auf.

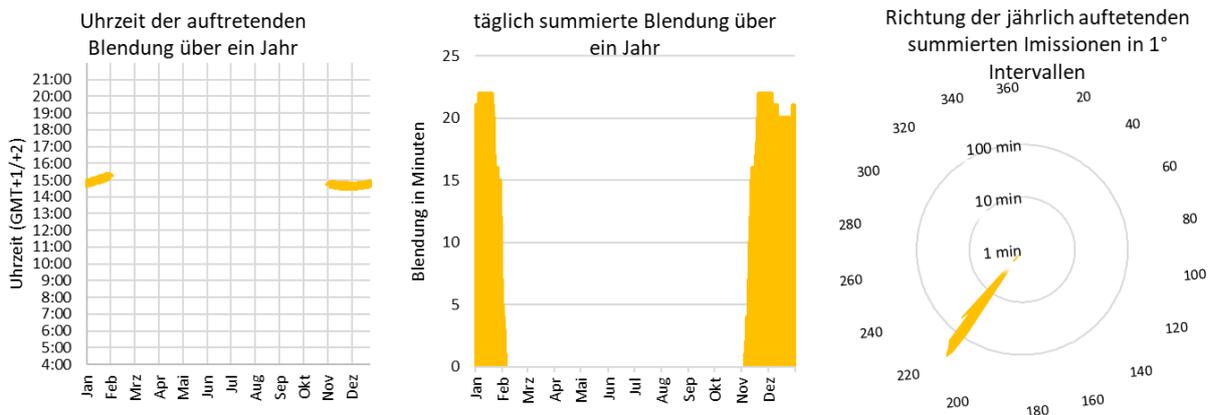


Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf der L3193 Fahrtrichtung Süd

In Abbildung 17 ist der, von potenziellen Blendungen betroffene Sichtbereich und Streckenabschnitt der Verkehrsteilnehmer auf der L3193, in Fahrtrichtung Süd dargestellt. Die potenzielle Blendung für die

Verkehrsteilnehmer auf der L3193 Richtung Süden tritt in den Wintermonaten in den Nachmittagsstunden auf. Zwischen geplantem Solarpark und Landstraße befindet sich Bewuchs und Bebauung. Die potenziellen Reflexionen treten in einem Winkel von über 20° zur Fahrtrichtung auf und in einer Entfernung von über 150 m. Außerdem handelt es sich um einen kurzen und geraden Streckenabschnitt. Das Gutachten kommt daher aus genannten Gründen zur Einschätzung, dass es zu keiner erhöhten Gefährdung des Straßenverkehrs durch die auftretenden Reflexionen kommt. Es werden durch den Auftraggeber jedoch ohnehin Blendschutzmaßnahmen geplant, um eine potenzielle Blendung gänzlich auszuschließen.



Abbildung 17: Von potenzieller Blendung betroffener Sichtbereich der Landstraße L3193 Fahrtrichtung Süd, PV-Fläche in Blau, betroffener Sichtbereich des Fahrers in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange und bestehende Sichtunterbrechung in Grün

Rodenbacher Weg

Die Ergebnisse der Simulation für den Rodenbacher Weg sind in Abbildung 16 dargestellt. Es kommt von Ende Februar bis Mitte Oktober zu potenzieller Blendung mit Immissionswinkeln zwischen 107° - 141° , sowie 231° - 274° . Die potenzielle Blendung tritt zwischen 9:30 - 16:25 auf.

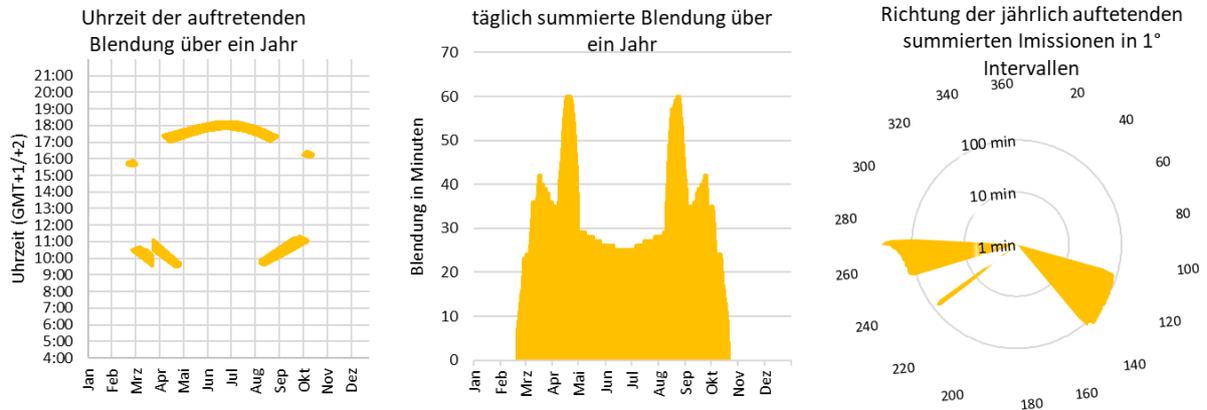


Abbildung 18: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf Rodenbacher Weg

In Abbildung 19 ist der, von potenziellen Blendungen betroffene Sichtbereich und Streckenabschnitt der Verkehrsteilnehmer auf dem Rodenbacher Weg dargestellt. Es werden durch den Auftraggeber Blendschutzmaßnahmen geplant, um eine potenzielle Blendung der Verkehrsteilnehmer gänzlich auszuschließen.



Abbildung 19: Von potenzieller Blendung betroffener Sichtbereich auf dem Rodenbacher Weg, PV-Fläche in Blau, betroffener Sichtbereich des Fahrers in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange

8 Blendschutzmaßnahmen

Zur Vermeidung der gemäß Simulation festgestellten potenziellen Blendung auf der L3193, dem Rodenbacher Weg und das Familienzentrum sind durch den Auftraggeber Blendschutzmaßnahmen geplant. Nachfolgend werden mögliche Maßnahmen beschrieben, welche geeignet sind, die ermittelte potenzielle Blendung zu verhindern. Es handelt sich lediglich um Vorschläge, auch andere Arten von Blendschutzmaßnahmen können zielführend sein.

Mittels einer Sichtunterbrechungen mit einer Oberkante von 3 m (Gelb) und 2,8 m (Pink), ab einer Höhe gemäß der Modulunterkante, also ab 0,8 m wird eine potenzielle Blendung auf die L3193, den Rodenbacher Weg und das Familienzentrum ausgeschlossen. Der Bereich für diese Sichtunterbrechung ist in Abbildung 20 in Gelb und Pink dargestellt.

Gemäß der Planungsunterlagen wird im gelb markierten Bereich eine Sichtunterbrechung in Form eines Sichtschutzaunes geplant mit 3 m Höhe, und im Pink markierten Bereich eine 2-reihige Heckenpflanzung. Die Hecken sollte gemäß den empfohlenen Sichtunterbrechungen eine Höhe von wenigstens 2,8 m erreichen. Die Maßnahmen stellen aus Sicht des Gutachters ausreichende Sichtunterbrechung dar. Mit Umsetzung dieser Maßnahmen wird eine Blendung der Verkehrsteilnehmer auf der L3193 und dem Rodenbacher Weg ausgeschlossen.

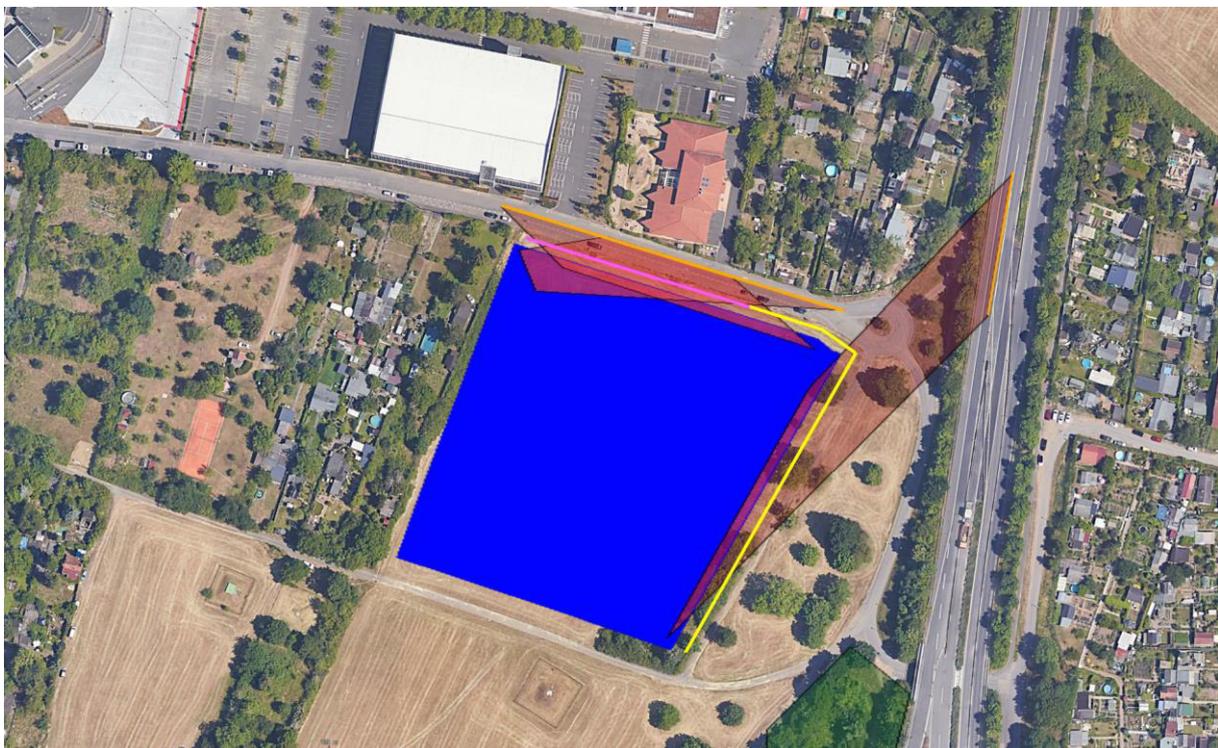


Abbildung 20: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange, empfohlene Sichtunterbrechung in Gelb und Pink

Potenzielle Reflexionen auf die Kleingartenanlage 2 im Westen der geplanten PV-Anlage können ausgeschlossen werden, wenn eine Sichtunterbrechung mit einer Oberkante von 2 m besteht. Des Weiteren kann eine Blendung ausgeschlossen werden, wenn die in Abbildung 21 rot markierte Tischhälfte nicht errichtet wird. Die östlich ausgerichtete Tischhälfte dient in diesem Fall als Sichtunterbrechung und weist mit 2,6 m eine ausreichende Höhe auf, um potenzielle Reflexionen auf die Kleingartenanlage 2 zu verhindern.

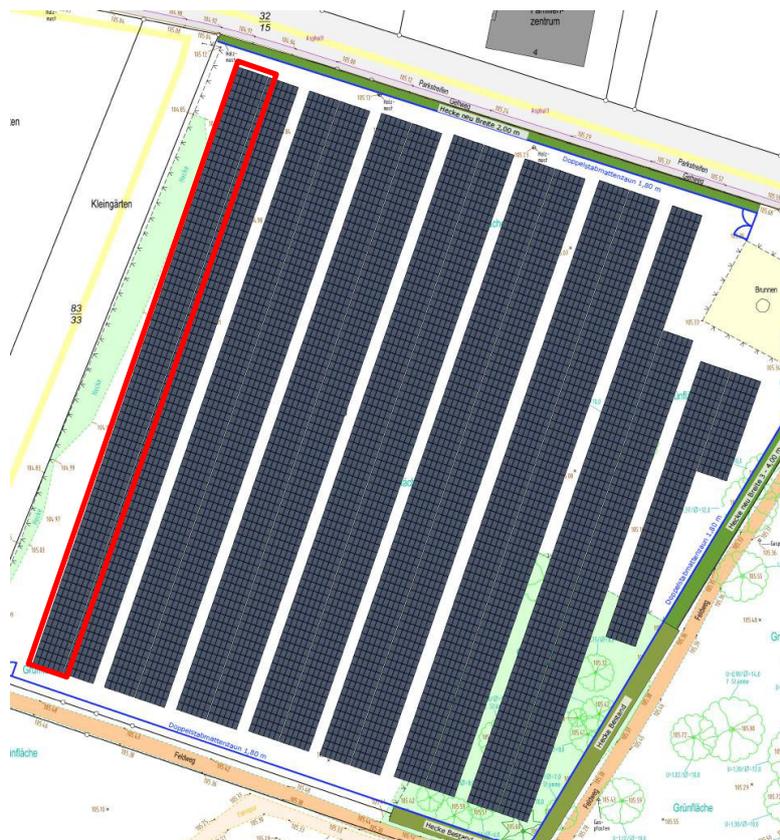


Abbildung 21: Wegzulassende Tischreihe im Westen der Anlage in Rot, um potenzielle Blendungen ohne zusätzliche Sichtunterbrechung zu vermeiden



9 Schlussbemerkung

Untersucht wurde die potenzielle Blendung durch direkte Reflexion der Sonnenstrahlen an den Modulflächen für den geplanten Solarpark Hanau. Für die Bahntrasse, die L3193 in Fahrtrichtung Nord-Ost, die Auffahrt Überführung B8 und die Kleingartenanlage 1 wird Blendung auf Basis der Simulationsergebnisse ausgeschlossen.

Für die L3193 in Fahrtrichtung Süd-West, den Rodenbacher Weg, die Kleingartenanlage 2 und das Familienzentrum wird in der Simulation potenzielle Blendung ermittelt. Es sind durch den Auftraggeber Blendschutzmaßnahmen in Form von Sichtunterbrechungen geplant, um potenzielle Blendungen auszuschließen.

Die geplanten Sichtunterbrechungen gemäß den Planungsunterlagen in Form eines Sichtschutzaunes und einer Heckenpflanzung stellen aus Sicht des Gutachters eine effektive Sichtunterbrechung dar. Mit Umsetzung der Maßnahmen wird eine Gefährdung des Straßenverkehrs, bzw. eine Beeinträchtigung der Anlieger, durch Reflexionen der geplanten PV-Flächen ausgeschlossen.

10 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>.
- Immissionsschutz, 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 Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI).“ 2012.
- OVE, Österreichischer Verband für Elektrotechnik. „Blendung durch Photovoltaikanlagen.“ Wien, 1. 11 2016.
- Schierz, Christoph. *Über die Blenbewertung von reflektierenden Sonnenlicht 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.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geplante PV-Fläche in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth).....	3
Abbildung 2: Anlagenplanung (Quelle: Auftraggeber).....	4
Abbildung 3: Unterkonstruktion der geplanten PV-Anlage (Quelle: Auftraggeber).....	4
Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls.....	5
Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) Ideale diffuse Reflexion (Trempler 2015).....	5
Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung.....	6
Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert (Yellowhair und Ho 2015).....	6
Abbildung 8: links: Module mit satiniertes Folie (Bucher 2021), rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul (Warthmann 2021).....	7
Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen (Yellowhair und Ho 2015).....	7
Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges (Boyce 2014).....	8
Abbildung 11: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung (ForgeSolar 2022).....	11
Abbildung 12: Anlage der PV-Flächen und Immissionsorte in der Simulation.....	12
Abbildung 13: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf das Familienzentrum.....	16
Abbildung 14: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Kleingartenanlage 2.....	16
Abbildung 15: Ansicht auf die Kleingartenanlage 2.....	17
Abbildung 16: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf der L3193 Fahrtrichtung Süd.....	17
Abbildung 17: Von potenzieller Blendung betroffener Sichtbereich der Landstraße L3193 Fahrtrichtung Süd, PV-Fläche in Blau, betroffener Sichtbereich des Fahrers in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange und bestehende Sichtunterbrechung in Grün.....	18
Abbildung 18: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf Rodenbacher Weg.....	19
Abbildung 19: Von potenzieller Blendung betroffener Sichtbereich auf dem Rodenbacher Weg, PV-Fläche in Blau, betroffener Sichtbereich des Fahrers in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange.....	19
Abbildung 20: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Verkehrsteilnehmer in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange, empfohlene Sichtunterbrechung in Gelb und Pink.....	20
Abbildung 21: Wegzulassende Tischreihe im Westen der Anlage in Rot, um potenzielle Blendungen ohne zusätzliche Sichtunterbrechung zu vermeiden.....	21