



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 Mark Zwuschen

Anlage: Solarpark Mark Zwuschen
49.428727°, 11.923170°
Freudenberg, 92272

in Auftrag gegeben von: Braun Energiekonzept GmbH
Axiener Straße 1
06925 Annaburg

Projektnummer: A-LV24/0071

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

Bearbeiter: M. Sc. Christoph Johann /M. Eng. Joris Neumann

Berlin, 13.03.2024

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	4
3	Beschreibung der PV – Anlage	5
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
	5.1 Bewertungsbasis	10
	5.2 Simulationstool und Modellierung	11
	5.3 Simulationsausgabe und -bewertung	12
6	Simulation.....	13
	6.1 PV - Anlage.....	13
	6.2 Immissionsorte.....	14
7	Ergebnisse	15
	7.1 Südausrichtung (185°).....	15
	7.2 Ost/West-Ausrichtung (95/275°).....	20
	8.1 Südausrichtung (185°).....	25
	8.2 Ost/West-Ausrichtung (95/275°).....	26
9	Schlussbemerkung.....	27
	9.1 Südausrichtung (185°).....	27
	9.2 Ost/West-Ausrichtung (95/275°).....	27
10	Literaturverzeichnis	28
11	Abbildungsverzeichnis.....	29



1 Einleitung

Im folgenden Gutachten wird die durch Reflexion direkter Sonneneinstrahlung verursachte Lichtemission des geplanten Solarparks Mark Zwuschen 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 dem Ortsteil Mark Zwuschen der Stadt Jessen (Elster) im Landkreis Wittenberg in Sachsen-Anhalt. Die Flächen des Solarparks liegen nördlich des Ortsteils an der Landesgrenze zu Brandenburg. Die Flächen des Solarparks werden derzeit als Ackerland genutzt. Eine Übersicht der Umgebung ist in Abbildung 1 gegeben.



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

3 Beschreibung der PV – Anlage

Der Modulbelegungsplan des Solarparks ist in Abbildung 2 zu sehen. Der Solarpark wird auf einer Fläche von ca. 4 ha errichtet. Die Modulflächen werden mit 185° in Richtung Süd ausgerichtet mit einem Neigungswinkel von 15° . Eine Darstellung der Unterkonstruktionen mit Höhenangaben ist in Abbildung 3 gegeben. Weiterhin kommt es zu einer Untersuchung einer Ost/West-Ausrichtung. Die Modulflächen werden bei dieser Belegung entlang des Geländes ausgerichtet 95° (Ost) und 275° (West). Der Modulneigungswinkel beträgt ebenfalls 15° . Die Höhe der Modulunter- bzw. oberkante entspricht ebenfalls Abbildung 3.



Abbildung 2: Modulbelegungsplan für die Südausrichtung (185°) (Quelle: Auftraggeber)

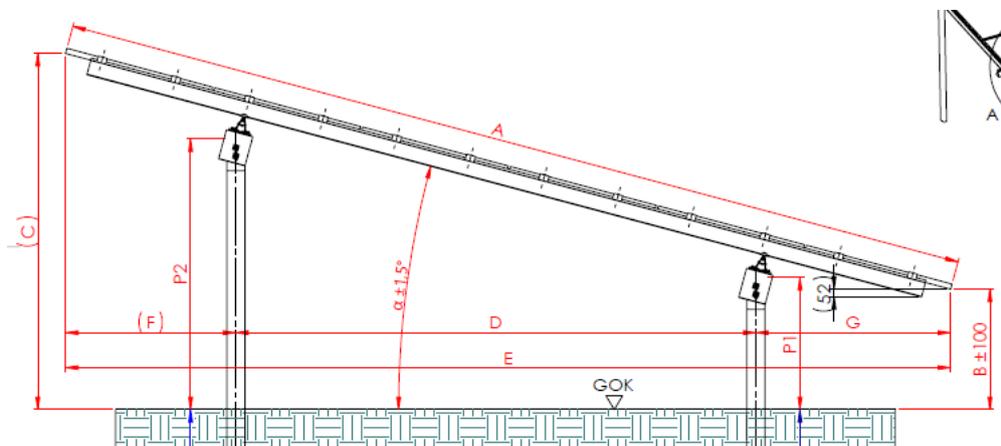


Abbildung 3: Unterkonstruktionen der geplanten PV-Anlage (Quelle: Auftraggeber)

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 ($\alpha = \beta$).

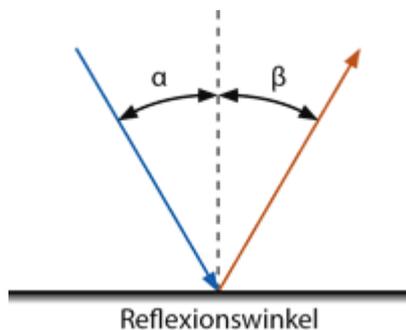


Abbildung 4: Reflexion eines Lichtstrahls

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.

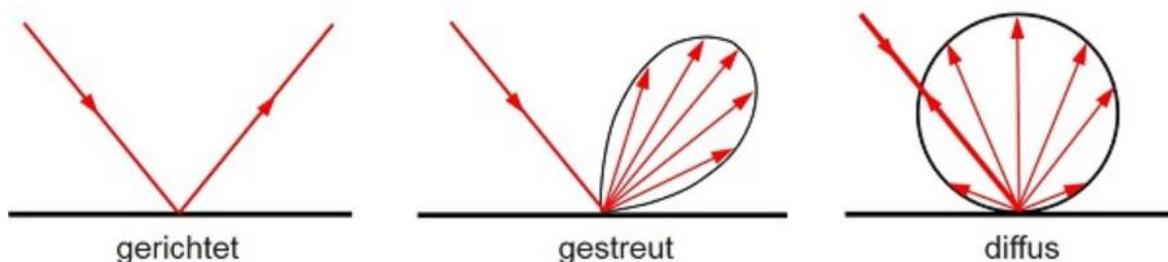


Abbildung 5: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) Ideale diffuse Reflexion (Trempler 2015)

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.

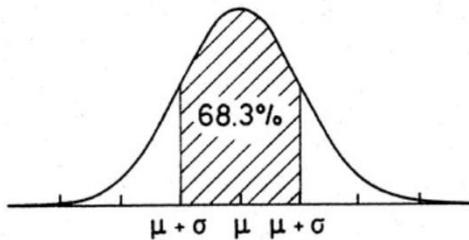


Abbildung 6: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

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.

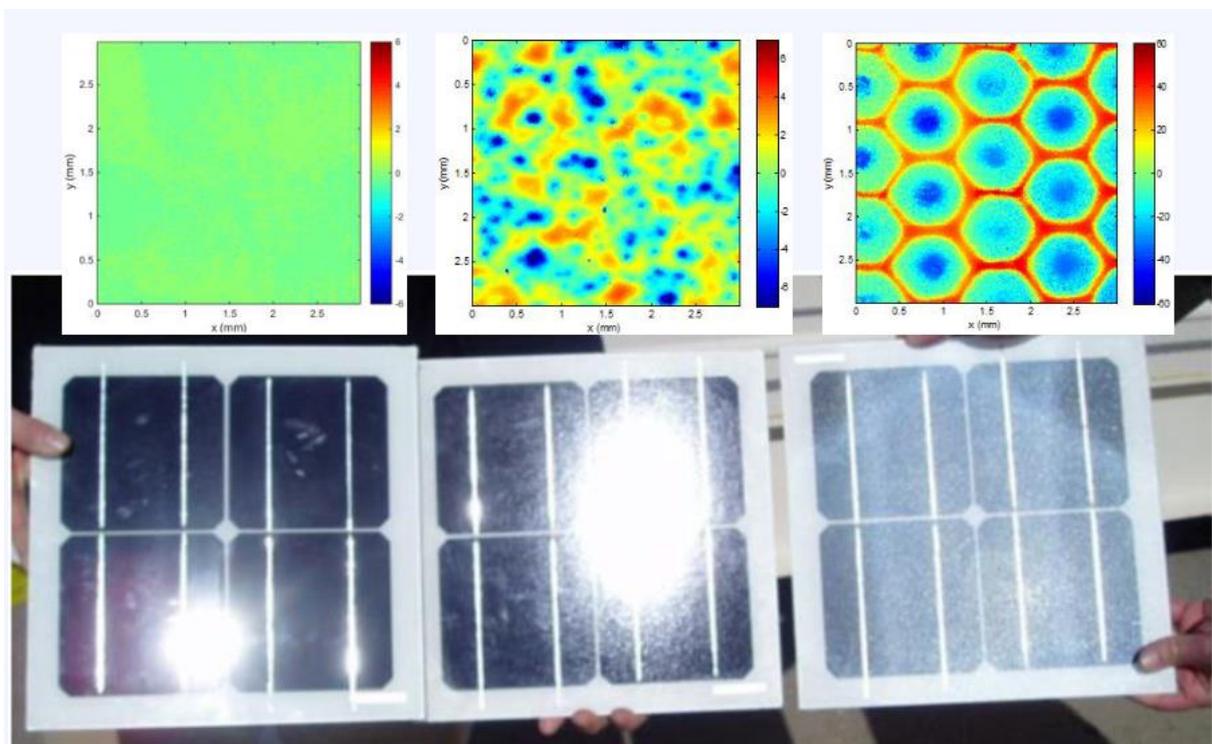


Abbildung 7: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert (Yellowhair und Ho 2015)

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 (Buchner 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.

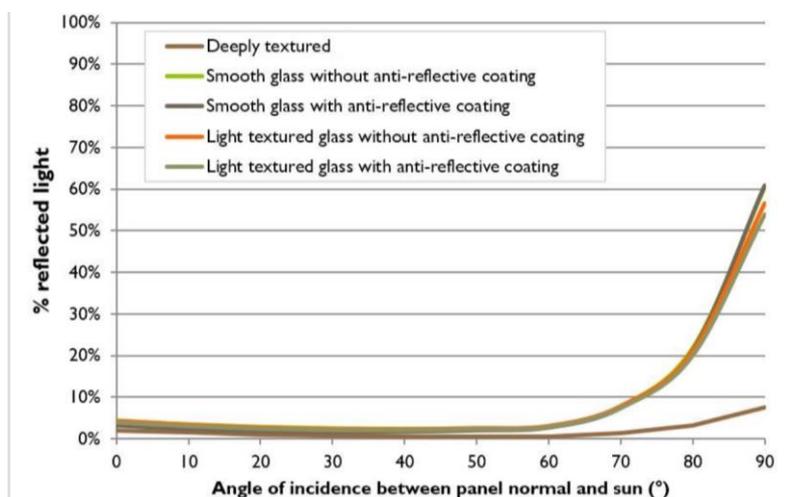


Abbildung 9 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen (Yellowhair und Ho 2015)

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.

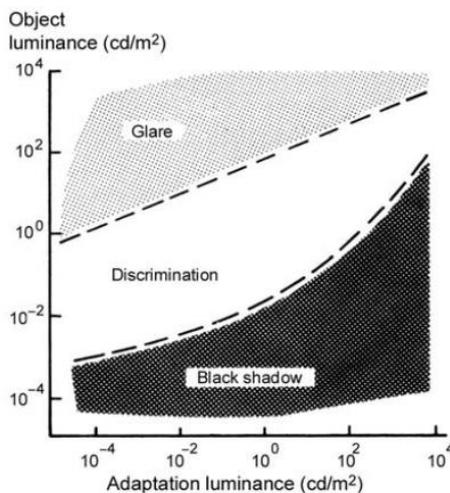


Abbildung 10: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges (Boyce 2014)

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/m²]
- 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/cm²]
- Die Einstufung des Blendpotenzials auf Basis der Bestrahlungsstärke und der Größe der Blendquelle [grün/gelb/rot]
- Leuchtdichte der Blendung [cd/m²]

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.

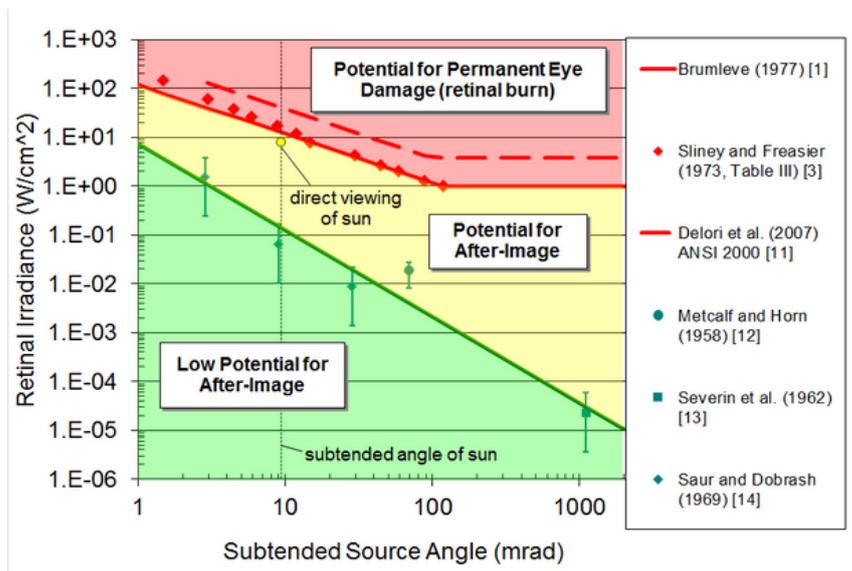


Abbildung 11: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung (ForgeSolar 2022)

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 Simulationssoftware ForgeSolar

6.1 PV - Anlage

Für die Simulation werden die Eingabedaten der PV-Anlage mit den Koordinaten und der Höhe über Normalhöhennull ermittelt. Die Nachstellung im Simulationsprogramm basiert auf den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Planungsunterlagen, sowie Satellitendaten. Die PV-Flächen werden mit 185° Azimut sowie 95°/275° und 15° Neigungswinkel simuliert. Die mittlere Modulhöhe ergibt sich zu 1,6 m. Die genauen Koordinaten der Eckpunkte der PV-Flächen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Koordinaten der PV-Flächen

PV-Fläche	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Modulhöhe [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
PV-Feld	1	51,91691	12,96206	93,5	1,6	95
	2	51,91698	12,96114	94	1,6	95,5
	3	51,91715	12,96118	94	1,6	95,5
	4	51,91721	12,9604	94,9	1,6	96,4
	5	51,91761	12,96048	94,5	1,6	96
	6	51,91766	12,95991	94,1	1,6	95,7
	7	51,91823	12,96009	94	1,6	95,6

	8	51,9184	12,96026	94	1,6	95,6
	9	51,91916	12,96042	94	1,6	95,6
	10	51,91902	12,96251	93	1,6	94,5

6.2 Immissionsorte

Als relevante Immissionsorte wird die angrenzende Wohnbebauung untersucht. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers. Die exakten Koordinaten, Höhe ü. NN, die für die Simulation angenommene Untersuchungshöhe und die daraus resultierende Gesamthöhe sind aus Tabelle 2 im Anhang zu entnehmen.

Tabelle 2: Koordinaten der zu untersuchenden Immissionsorte

Immissions-ort	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Gelände- höhe ü. NN [m]	Betrachtungs- höhe [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
Wohnbebauung 1	1	51,91717	12,96016	94,5	3,7	98,2
Wohnbebauung 2	2	51,91699	12,96006	94,1	3,7	97,8
Wohnbebauung 3	3	51,91696	12,96089	94,2	3,7	97,9
Wohnbebauung 4	4	51,91633	12,96118	93,6	3,7	97,3
Wohnbebauung 5	5	51,91626	12,96178	93,5	1,7	95,2
Wohnbebauung 6	6	51,9163	12,96285	93,9	3,7	97,6
Wohnbebauung 7	7	51,91653	12,96287	93,6	1,7	95,3
Wohnbebauung 8	8	51,91694	12,96297	93,9	1,7	95,6
Wohnbebauung 9	9	51,91728	12,96305	94	1,7	95,7
Wohnbebauung 10	10	51,91766	12,9633	93,4	1,7	95,1
Wohnbebauung 11	11	51,91777	12,96346	93,3	3,7	95

7 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden nachfolgend für die Süd- und die Ost/West-Ausrichtung dargestellt.

7.1 Südausrichtung (185°)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Simulation bezüglich der potenziell auftretenden solaren Blendungen durch Reflexionen dargestellt. Die Simulationsergebnisse werden aufgrund der technischen Limitierung der Simulationssoftware einer weiteren Korrektur unterzogen. So ist gemäß LAI-Hinweisen keine Blendung gegeben, wenn die Richtung des Vektors der Lichtreflexion und die des Vektors der Sonnenstrahlung weniger als 10° auseinander liegen. Das bedeutet, dass die Sonne aus nahezu der gleichen Richtung scheint wie die Reflexion der Sonne an den PV-Modulen. Somit wird die Sonne, die eine höhere Lichtintensität aufweist als die Reflexion, als Hauptblendquelle wahrgenommen. Die Reflexion wird sozusagen von der Sonne überstrahlt und erscheint nicht als zusätzliche Blendung. Auch Sichtunterbrechungen werden durch die Simulation nicht ermittelt und müssen nachträglich herausgefiltert werden. Die genaue Vorgehensweise hierbei wird in den folgenden Abschnitten erläutert. In Tabelle 3 sind die Werte nach genannten Korrekturen aufgeführt, kritische Werte, welche eine Beeinträchtigung darstellen 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 für die Süd-Ausrichtung

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden
Wohnbebauung 1	103,7
Wohnbebauung 2	43,5
Wohnbebauung 3	109,2
Wohnbebauung 4	0
Wohnbebauung 5	0
Wohnbebauung 6	0
Wohnbebauung 7	13,6
Wohnbebauung 8	21,7
Wohnbebauung 9	24,4
Wohnbebauung 10	20,7
Wohnbebauung 11	3,8

Für die Wohnbebauung 4 – 10 wurden keine grenzwertüberschreitende Häufigkeit in Stunden ermittelt. Somit werden die Simulationsergebnisse im Folgenden nicht detailliert ausgewertet. Für die Wohnbebauungen 1, 2, 3 und 11 wurden grenzwertüberschreitende Reflexionen ermittelt. Aus diesem Grund werden diese nachfolgende analysiert und bewertet.

Wohnbebauung 1

Die Ergebnisse der Simulation für die Wohnbebauung 1 sind in Abbildung 13 dargestellt. Es kommt von Mitte März bis Mitte September in den Morgenstunden zu potenzieller Blendung. Die Immissionswinkel liegen zwischen 67° - 93° Azimut und es werden tägliche Blenddauern von bis zu 46 Minuten ermittelt. Der betroffene Sichtbereich ist in Abbildung 14 dargestellt.

Die Werte liegen deutlich oberhalb der Grenzwerte gemäß LAI-Hinweisen. Es werden im nachfolgendem Kapitel Blendschutzmaßnahmen empfohlen.

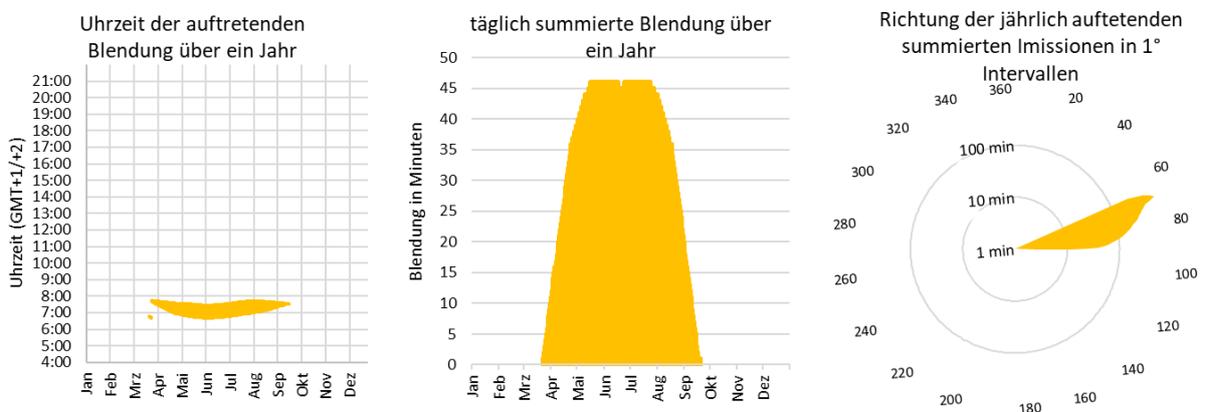


Abbildung 13: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 1

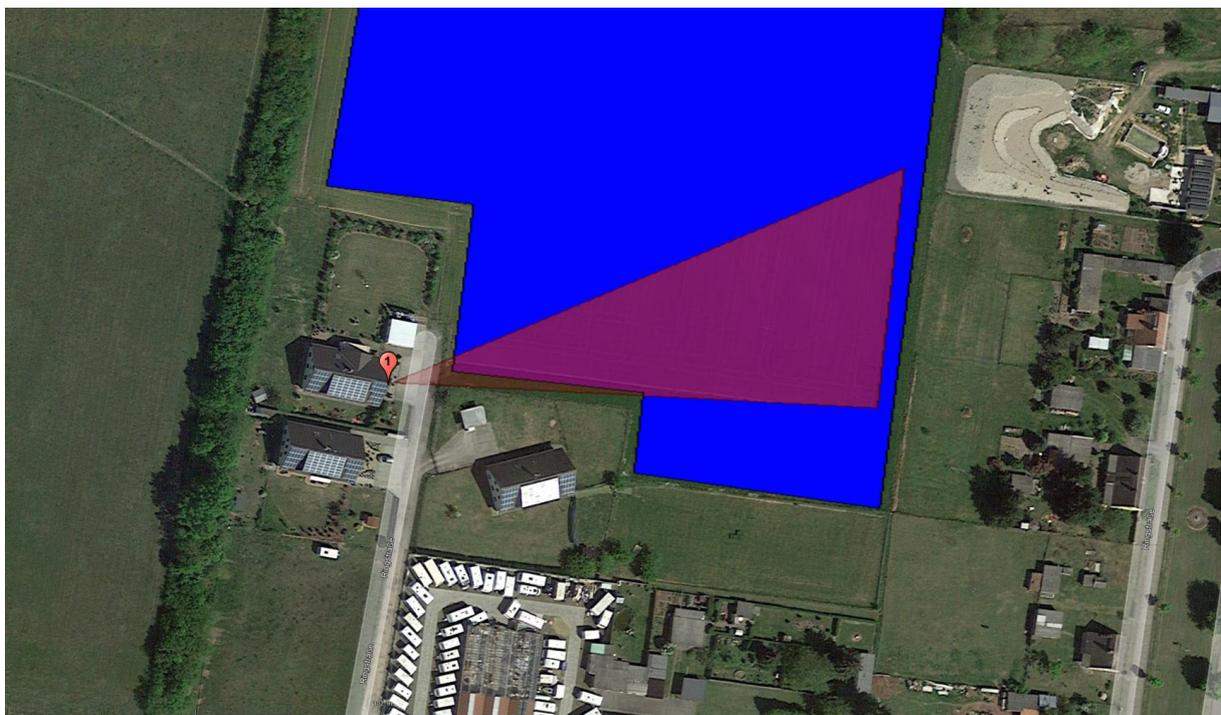


Abbildung 14: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 1 in Rot

Wohnbebauung 2

Die Ergebnisse der Simulation für die Wohnbebauung 2 sind in Abbildung 15 dargestellt. Es kommt von Mitte März bis Mitte September in den Morgenstunden zu potenzieller Blendung. Die Immissionswinkel liegen zwischen 67° - 91° Azimut und es werden tägliche Blenddauern von bis zu 20 Minuten ermittelt. Der betroffene Sichtbereich ist in Abbildung 16 dargestellt.

Die Werte liegen deutlich oberhalb der Grenzwerte gemäß LAI-Hinweisen. Es werden im nachfolgendem Kapitel Blendschutzmaßnahmen empfohlen.

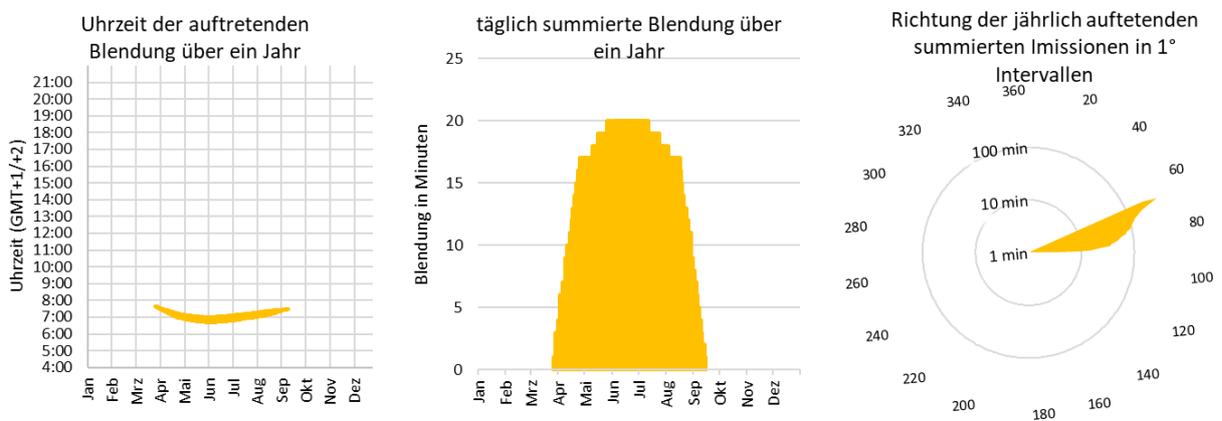


Abbildung 15: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 2



Abbildung 16: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 2 in Rot

Wohnbebauung 3

Die Ergebnisse der Simulation für die Wohnbebauung 3 sind in Abbildung 17 dargestellt. Es kommt von Mitte März bis Mitte September in den Morgenstunden zu potenzieller Blendung. Die Immissionswinkel liegen zwischen 67° - 94° Azimut und es werden tägliche Blenddauern von bis zu 43 Minuten ermittelt. Der betroffene Sichtbereich ist in Abbildung 18 dargestellt.

Die Werte liegen deutlich oberhalb der Grenzwerte gemäß LAI-Hinweisen. Es werden im nachfolgendem Kapitel Blendschutzmaßnahmen empfohlen.

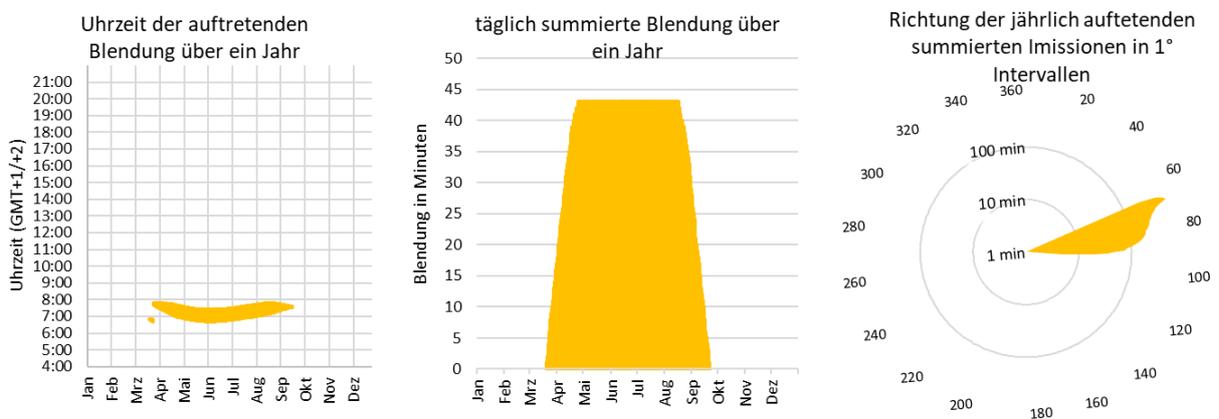


Abbildung 17: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 3



Abbildung 18: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 3 in Rot

Wohnbebauung 11

Die Ergebnisse der Simulation für die Wohnbebauung 11 sind in Abbildung 19 dargestellt. Es kommt von Mitte April bis Ende August in den Abendstunden zu potenzieller Blendung. Die Immissionswinkel liegen zwischen 280° - 297° Azimut und es werden tägliche Blenddauern von bis zu 20 Minuten ermittelt. Der betroffene Sichtbereich ist und bestehende Sichtunterbrechungen sind in Abbildung 20 dargestellt. Durch die bestehende Sichtunterbrechung in Form von Bäumen wird der betroffene Sichtbereich auf 280°-287° beschränkt und somit verringert sich die potenzielle jährliche Blenddauer auf unter 4 Stunden. Folglich liegen die Werte deutlich unterhalb der Grenzwerte gemäß LAI-Hinweisen. Es werden keine Blendschutzmaßnahmen empfohlen.

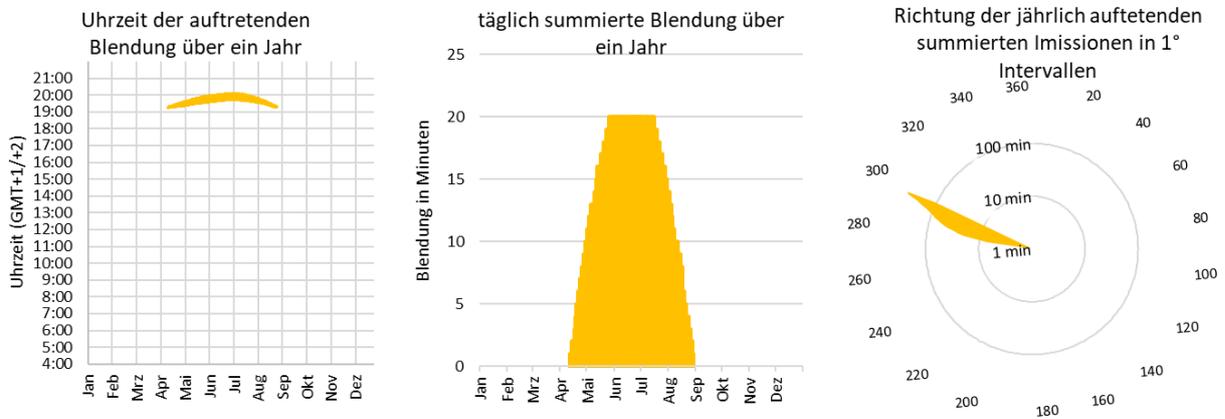


Abbildung 19: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 11



Abbildung 20: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 11 in Rot, bestehender Bewuchs in Grün markiert

7.2 Ost/West-Ausrichtung (95/275°)

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

Tabelle 4: Simulationsergebnisse: gesamte potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr für die Ost/West-Ausrichtung

Immissionsort	Ost-ausgerichtete Modufläche: Potenzielle Blenddauer in Stunden	West-ausgerichtete Modufläche: Potenzielle Blenddauer in Stunden	Gesamte Potenzielle Blenddauer in Stunden
Wohnbebauung 1	0	29,9	29,9
Wohnbebauung 2	0	1,53	1,53
Wohnbebauung 3	0	24,9	24,9
Wohnbebauung 4	0	0	0
Wohnbebauung 5	0	0	0
Wohnbebauung 6	0	0	0
Wohnbebauung 7	0	0	0
Wohnbebauung 8	7,1	0	7,1
Wohnbebauung 9	42,5	0	42,5
Wohnbebauung 10	51,2	0	51,2
Wohnbebauung 11	50,9	0	50,9

Für die Wohnbebauungen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8 wurden keine grenzwertüberschreitenden Häufigkeiten in Stunden für eine potenzielle Blendung ermittelt. Somit werden die Simulationsergebnisse im Folgenden nicht detailliert ausgewertet. Für die Wohnbebauungen 9, 10 und 11 wurden im ersten Schritt grenzwertüberschreitende Reflexionen ermittelt. Aus diesem Grund werden diese nachfolgend analysiert und bewertet und ebenfalls Sichtunterbrechungen mit in die Bewertung mit aufgenommen und somit die potenzielle Blenddauer neu berechnet.

Wohnbebauung 9

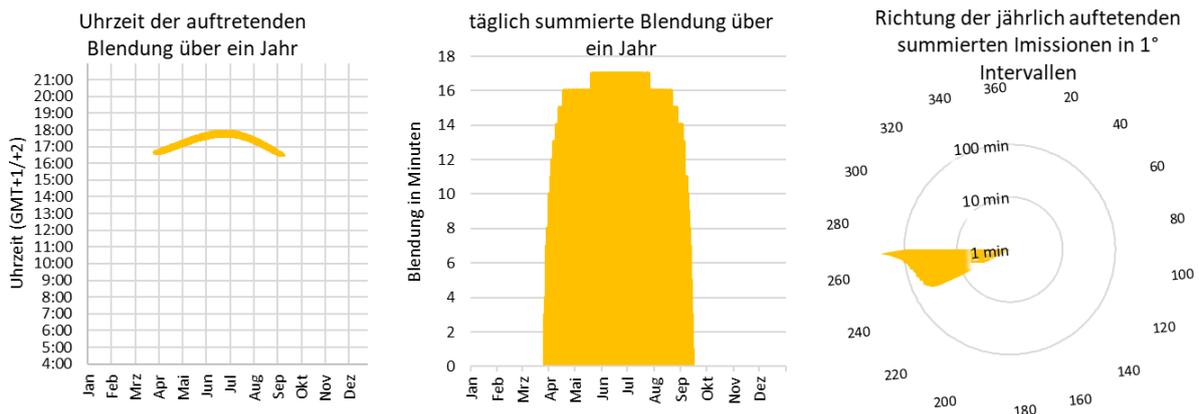


Abbildung 21: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 9

Potenzielle Blendung tritt demnach vom 19.02 bis zum 20.10 von 14:52 Uhr bis 17:55 Uhr mit Immissionswinkel zwischen 224° - 271° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 19 Minuten erreicht, siehe Abbildung 21.



Abbildung 22: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 9 in rot und vorhandene Sichtunterbrechung in grün

Die Analyse der Umgebung ergibt, dass bereits Sichtunterbrechungen zwischen dem Solarpark und OP9 bestehen, siehe Abbildung 22. Die verursachten Reflexionen sind rot markiert und die bestehenden Sichtunterbrechungen grün markiert. Unter Berücksichtigung der Emissionswinkel der Modulflächen und den Sichtunterbrechungen und der erneuten Filterung der Ergebnisse, liegen die Blendminuten für OP9 unterhalb des Grenzwertes von 1800 Minuten bzw. 30 Stunden Blendung pro Kalenderjahr. Somit sind in diesem Bereich keine Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

Wohnbebauung 10

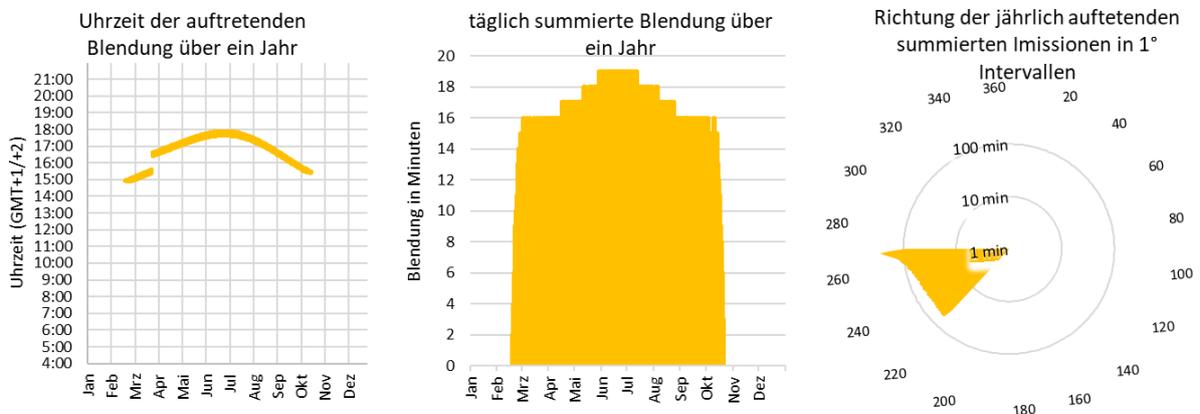


Abbildung 23: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 10

Potenzielle Blendung tritt demnach vom 19.02 bis zum 20.10 von 14:52 Uhr bis 17:55 Uhr mit Immissionswinkel zwischen 224° - 271° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 19 Minuten erreicht, siehe Abbildung 23.



Abbildung 24: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 10 in rot und vorhandene Sichtunterbrechung in grün

Die Analyse der Umgebung ergibt, dass keine Sichtunterbrechungen zwischen dem Solarpark und OP10 bestehen, siehe Abbildung 24. Die verursachten Reflexionen sind rot markiert und die bestehenden Sichtunterbrechungen grün markiert. Die Blendminuten für OP10 liegen weiterhin oberhalb des Grenzwertes von 1800 Minuten bzw. 30 Stunden Blendung pro Kalenderjahr. Somit sind in diesem Bereich Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

Wohnbebauung 11

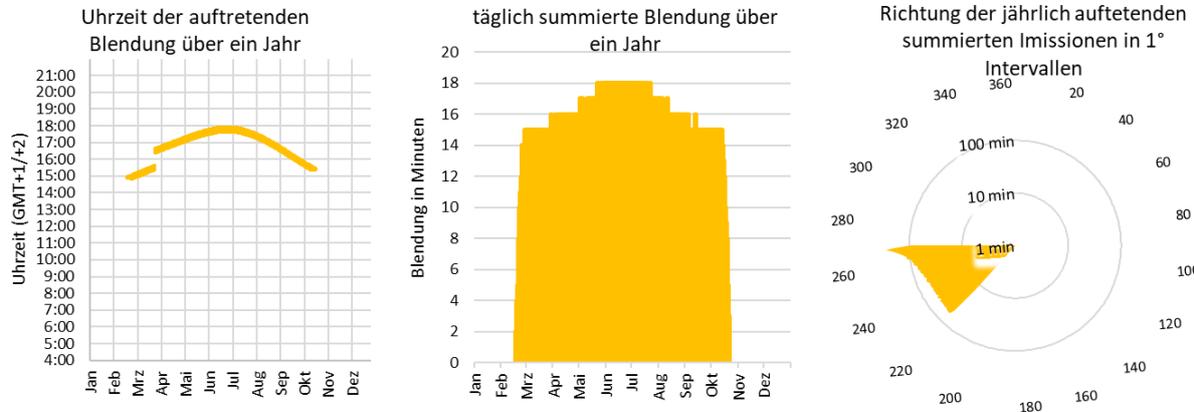


Abbildung 25: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 11

Potenzielle Blendung tritt demnach vom 18.02 bis zum 21.10 von 14:51 Uhr bis 17:55 Uhr mit Immissionswinkel zwischen 223° - 271° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 18 Minuten erreicht, siehe Abbildung 25.

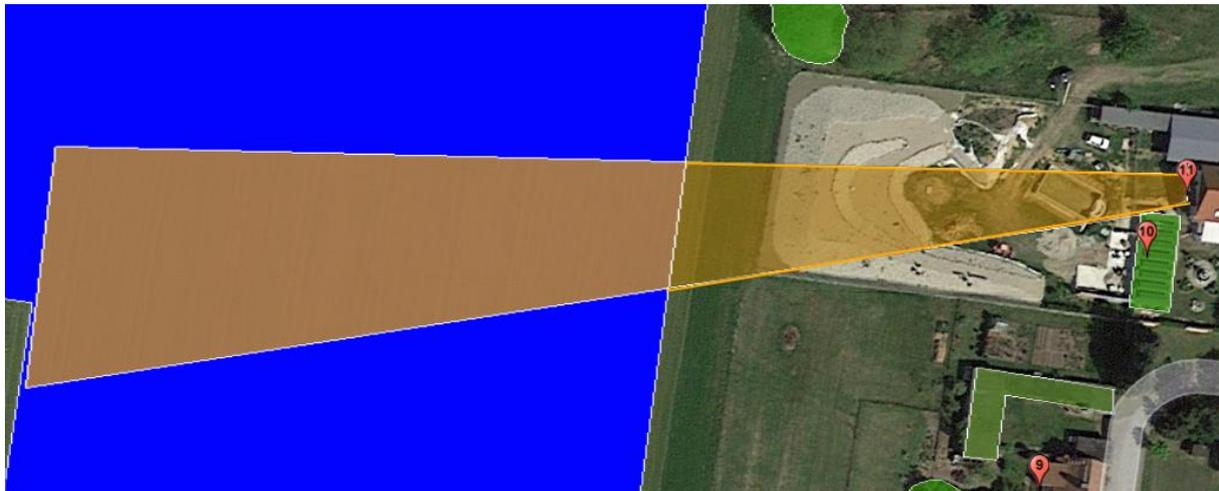


Abbildung 26: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 11 in orange und vorhandene Sichtunterbrechung in grün

Die Analyse der Umgebung ergibt, dass bereits Sichtunterbrechungen zwischen dem Solarpark und OP11 bestehen, siehe Abbildung 26. Die verursachten Reflexionen sind orange markiert und die bestehenden Sichtunterbrechungen grün markiert. Unter Berücksichtigung der Emissionswinkel der Modulflächen und den Sichtunterbrechungen und der erneuten Filterung der Ergebnisse, liegen die Blendminuten für OP11 unterhalb des Grenzwertes von 1800 Minuten bzw. 30 Stunden Blendung pro Kalenderjahr. Somit sind in diesem Bereich keine Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

8 Blendschutzmaßnahmen

Die Ausarbeitung der Blendschutzmaßnahmen werden nachfolgend für die Süd- und die Ost/West-Ausrichtung dargestellt.

8.1 Südausrichtung (185°)

Gemäß der Simulationsauswertung werden zur Vermeidung potenzieller Blendung bei der Variante Süd-Belegung für die Wohnbebauung 1-3 Blendschutzmaßnahmen empfohlen. 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.

Es werden Sichtunterbrechungen mit einer Höhe von 2,4 m (Gelb), von 2,7 m (Pink) und ab einer Höhe gemäß der Modulunterkante, also ab 0,8 m empfohlen. Der Bereich für diese Sichtunterbrechung ist Abbildung 27 in Gelb und Pink dargestellt.

Die Umsetzung der Sichtunterbrechung kann beispielsweise in Form eines blickdichten Zauns, einer blickdichten Folie bzw. einem Netz an der geplanten Einfriedung oder mit blickdichtem Bewuchs realisiert werden. Bei der Umsetzung durch Bewuchs ist zu berücksichtigen, dass dieser in den relevanten Monaten laubtragend ist. Die DGS empfiehlt für den Blendschutz generell blickdichten Bewuchs als ökologischste Variante, da dieser zusätzlich zur CO₂-Reduktion beiträgt.



Abbildung 27: Empfohlener Blendschutz Süd Variante in Gelb und Pink, von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld in Rot

8.2 Ost/West-Ausrichtung (95/275°)

Gemäß der durchgeführten Simulation kann eine erhebliche Beeinträchtigung für OP10 nicht kategorisch gemäß der LAI-Hinweise ausgeschlossen werden. Es werden nachfolgend Maßnahmen vorgestellt, mit welchen sich eine Reduktion der auftretenden Immissionen auf ein Niveau unterhalb der Grenzwerte nach LAI-Hinweisen erreichen lässt.

Zur Eingrenzung des schutzwürdigen Bereichs der PV – Fläche auf OP 10 kann Abbildung 28 herangezogen werden. Weitere Simulationen mit unterschiedlichen Höhenbetrachtungen für den Blendschutzzaun im relevanten Bereich (orange) haben eine Höhe von 2,4 m ergeben. Diese Höhe des Blendschutzes müsste in den markierten Bereichen erreicht werden, um eine Unterschreitung der Grenzwerte nach den LAI-Hinweisen zu erreichen.

Die Umsetzung der Sichtunterbrechung kann beispielsweise in Form eines blickdichten Zauns, einer blickdichten Folie bzw. einem Netz an der geplanten Einfriedung oder mit blickdichtem Bewuchs realisiert werden. Bei der Umsetzung durch Bewuchs ist zu berücksichtigen, dass dieser in den relevanten Monaten laubtragend ist. Die DGS empfiehlt für den Blendschutz generell blickdichten Bewuchs als ökologischste Variante, da dieser zusätzlich zur CO₂-Reduktion beiträgt.

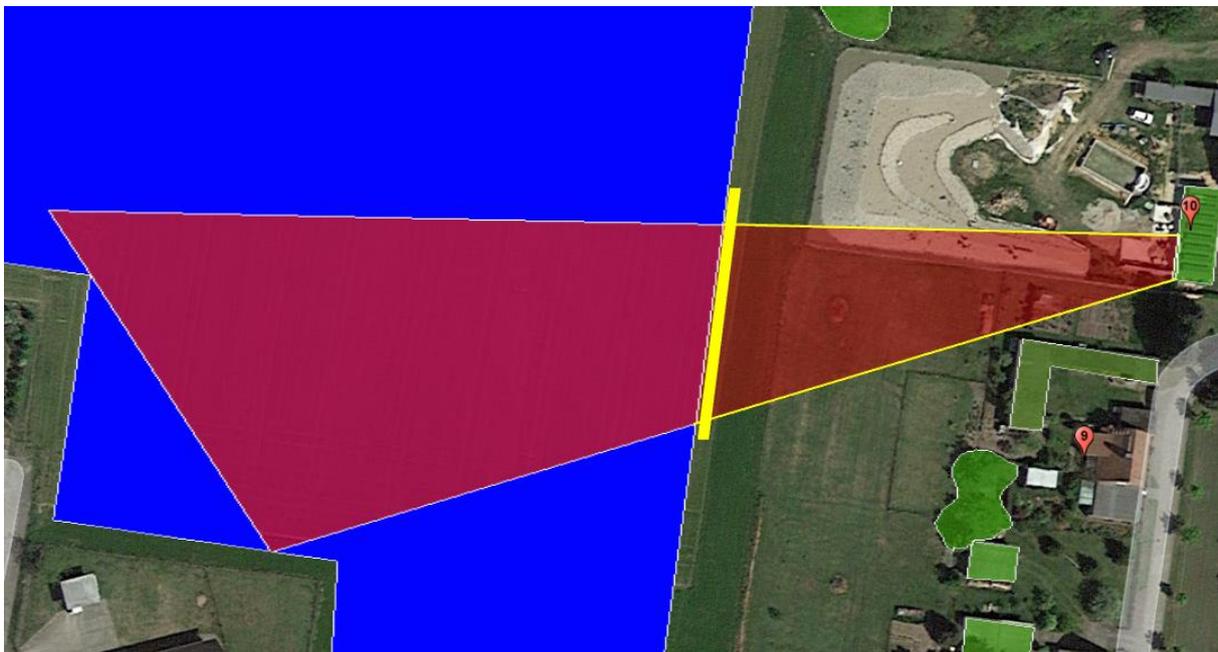


Abbildung 28: Empfohlener Blendschutz Ost/West Variante in Gelb, von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld in Rot

9 Schlussbemerkung

Untersucht wurde die potenzielle Blendung durch direkte Reflexion der Sonnenstrahlen an den Modulflächen für den geplanten Solarpark Mark Zwuschen und die unmittelbar angrenzenden Wohngebäude ermittelt.

9.1 Südausrichtung (185°)

Für die anliegenden Wohngebäude (OP) 4-11 wird in der durchgeführten Simulation potenzielle Blendung ermittelt, welche jedoch unterhalb der Grenzwerte gemäß der LAI-Hinweise liegt, weshalb hier eine erhebliche Beeinträchtigung der Anwohner ausgeschlossen wird.

Für die Wohngebäude (OP) 1-3 wird eine Überschreitung der Grenzwerte ermittelt. Es werden daher Blendschutzmaßnahmen in Form einer Sichtunterbrechung für die Wohngebäude 1-3 empfohlen, um potenzielle Reflexionen zu vermeiden. Mit der Umsetzung der empfohlenen Blendschutzmaßnahmen kommt es durch Reflexionen zu keiner Beeinträchtigung der Anwohner.

9.2 Ost/West-Ausrichtung (95/275°)

Für die anliegenden Wohngebäude wird in der durchgeführten Simulation potenzielle Blendung ermittelt, allerdings liegen diese jedoch unterhalb der Grenzwerte gemäß der LAI-Hinweise, weshalb hier eine erhebliche Beeinträchtigung der Anwohner ausgeschlossen wird, ausgenommen von einem Wohngebäude. Dabei beschränkt sich die Überschreitung der zulässigen Höchstblenddauer lediglich auf das Wohngebäude, welches in dem Gutachten durch OP10 beschrieben ist. Das Gutachten kommt hier jedoch zu der Auffassung, dass eine erhebliche Beeinträchtigung durch die am Nachmittag auftretenden Reflexionen als unwahrscheinlich einzustufen ist. Für den Fall, dass sich der betroffene Anwohner durch die auftretenden Reflexionen in erheblichem Maße gestört fühlen, können die Immissionen jedoch gemäß der vorgestellten Blendschutzmaßnahmen auf einen Wert unterhalb der LAI-Grenzwerte reduziert werden.

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 Windenergieanlagen (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 Blendbewertung 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-Flächen in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth)	4
Abbildung 2: Modulbelegungsplan für die Südausrichtung (185°) (Quelle: Auftraggeber)	5
Abbildung 3: Unterkonstruktionen der geplanten PV-Anlage (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 satinierte 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: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung (ForgeSolar 2022)	12
Abbildung 12: Anlage der PV-Flächen und Immissionsorte in der Simulationssoftware ForgeSolar	13
Abbildung 13: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 1	16
Abbildung 14: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 1 in Rot	16
Abbildung 15: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 2.....	17
Abbildung 16: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 2 in Rot	17
Abbildung 17: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 3.....	18
Abbildung 18: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 3 in Rot	18
Abbildung 19: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 11.....	19
Abbildung 20: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 11 in Rot, bestehender Bewuchs in Grün markiert.....	20
Abbildung 21: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 9.....	21
Abbildung 22: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 9 in rot und vorhandene Sichtunterbrechung in grün	22
Abbildung 23: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 10.....	22
Abbildung 24: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 10 in rot und vorhandene Sichtunterbrechung in grün	23
Abbildung 25: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung auf die Wohnbebauung 11.....	24



Abbildung 26: Von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld der Wohnbebauung 11 in orange und vorhandene Sichtunterbrechung in grün	24
Abbildung 27: Empfohlener Blendschutz Süd Variante in Gelb und Pink, von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld in Rot	25
Abbildung 28: Empfohlener Blendschutz Ost/West Variante in Gelb, von potenzieller Blendung betroffenes Sichtfeld in Rot	26