

DGS Landesverband Berlin Brandenburg e.V.

Erich-Steinfurth-Str. 8

10243 Berlin

Phone +49 (030) 29 38 12 80

Email dgs@dgs-berlin.de

Web www.dgs-berlin.de

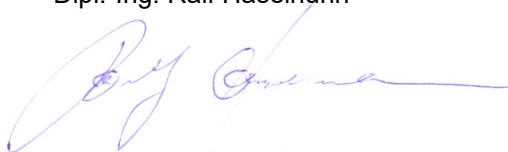
Fachgutachten zur Bewertung der Blendwirkung durch Reflexion an PV-Modulen (Blendgutachten) für den Solarpark Bendeleben

Anlage: Solarpark Bendeleben
51.387650°, 11.007216°
99707, Bendeleben

in Auftrag gegeben von: GLU GmbH
Saalbahnhofstraße 27
07743 Jena

Projektnummer: A-LV24/0254

Gutachter: Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ralf Haselhuhn'.

Bearbeiter: Dr. Laurent Kroely

A handwritten signature in blue ink, appearing to be a stylized 'LK'.

Berlin, 28.02.2025

Inhaltsverzeichnis

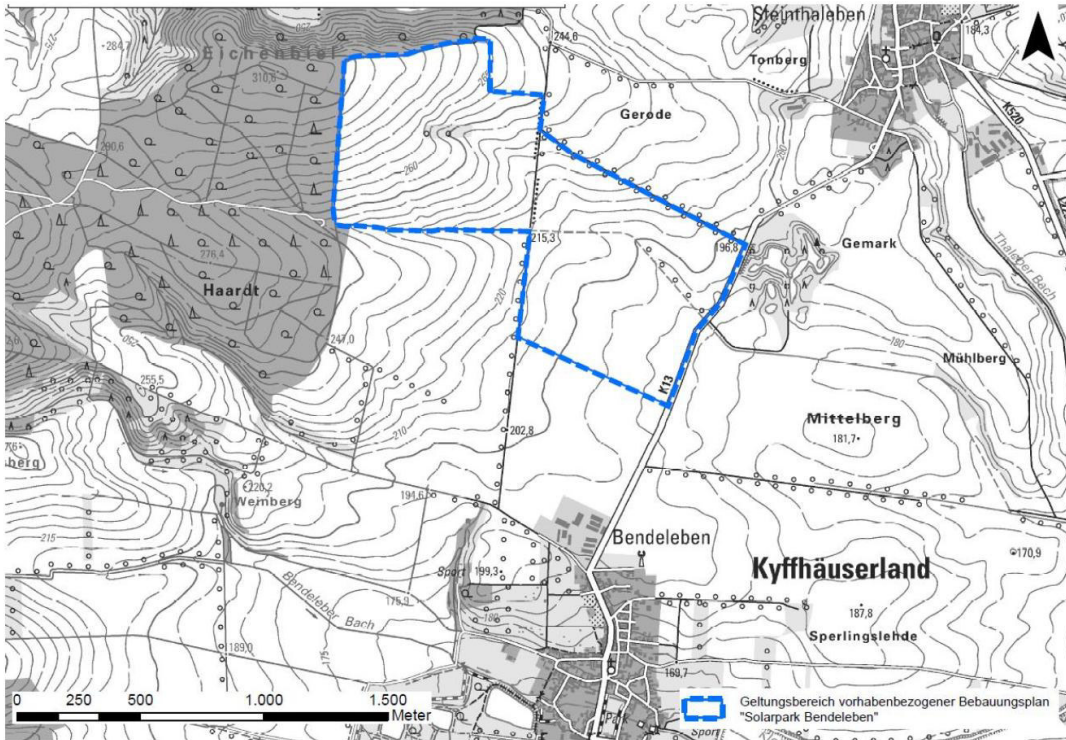
1	Einleitung.....	3
2	Beschreibung der Umgebung	3
3	Beschreibung der PV-Anlage.....	6
4	Grundlagen der Optik	8
	4.1 Geometrische Reflexionssituation	8
	4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen	9
	4.3 Blendung.....	11
5	Methodik der Untersuchung mit ForgeSolar	12
	5.1 Bewertungsbasis	12
	5.2 Simulationstool und Modellierung	13
	5.3 Simulationsausgabe und -bewertung	14
6	Simulation mit ForgeSolar	15
	6.1 PV-Anlage.....	16
	6.2 Immissionsorte.....	18
	6.1 Topologie des Geländes.....	23
7	Ergebnisse mit ForgeSolar.....	25
	7.1 Ergebnisse im Betrieb ohne Bewirtschaftung.....	25
	7.1.1 Schutzwürdige Orte	26
	7.1.2 Barbarossaweg / Mühlen.....	26
	7.2 Ergebnisse während der Bewirtschaftung	28
	7.2.1 Schutzwürdige Orte	28
	7.2.2 Ergebnisse während der Bewirtschaftung für den Straßenverkehr.....	29
8	Blendschutzmaßnahmen.....	37
	8.1 Blendschutzmaßnahmen für den Betrieb ohne Bewirtschaftung	37
	8.2 Blendschutzmaßnahmen für die Bewirtschaftung	37
9	Zusammenfassung.....	38
10	Literaturverzeichnis	39
11	Abbildungsverzeichnis.....	40
12	Gewährleistung	42
13	Vorbehaltsklausel für die Veröffentlichung des Gutachtens	42

1 Einleitung

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

2 Beschreibung der Umgebung

Die geplante PVA liegt nördlich der Ortslage Bendeleben bzw. südwestlich der Ortslage Steinhaleben auf dem Thalebener Berg in der Gemeinde Kyffhäuserland im Landkreis Kyffhäuserkreis. Östlich des Solarparks liegt die Kreisstraße 13 (K 13) an. Die PVA ist auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen (auch mit Feldgehölzen und einer Streuobstwiese) geplant. Das Gelände ist nicht eben und fällt nach Südosten ab, wie in Abbildung 1 und in Abbildung 2 dargestellt. Eine Übersicht über die nähere Umgebung der PV-Anlage wird in Abbildung 3 gegeben. Es gab keinen Ortstermin.



Quelle Karte: Geoproxy-Geoportal @ GDI-Th. Freistaat.de

Abbildung 1: Topologie (orange Höhenlinien) des Geländes (Quelle: Auftraggeber)



Abbildung 2: Vor-Ort Aufnahme der Topologie (Quelle: Auftraggeber)

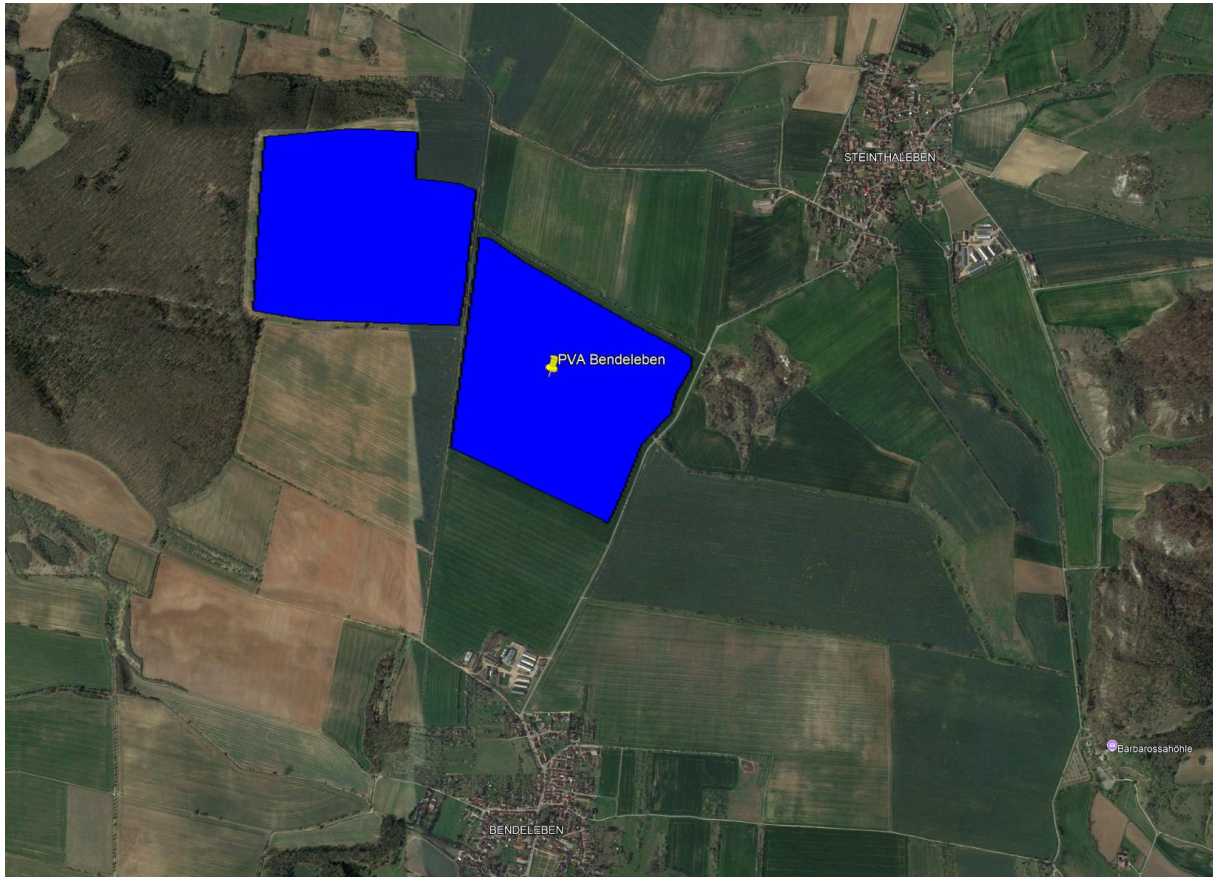


Abbildung 3: Modulflächen der geplanten PVA in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth)

3 Beschreibung der PV-Anlage

Die PVA ist auf einer Fläche von rund 112 ha und mit einer DC-Leistung von 80,2 MWp geplant. Vorgesehen ist eine Trackeranlage mit Nord-Süd Achse: mit 6,49° Azimut für das PV-Feld Ost und 3,89° Azimut für das PV-Feld West. Die maximalen Neigungswinkel sind -55° und +55°. Die Backtracking-Methode ist die sogenannte „shade-slope“ Methode, der minimale Winkel beim Backtracking (auf Englisch „resting angle“) ist 0°, und der Überschirmungsgrad (auf Englisch „Ground Coverage Ratio“ oder GCR) ist 0,34. Der Belegungsplan ist in Abbildung 4 dargestellt und die Unterkonstruktion ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt.

Bei dieser Art von nachgeführten Systemen folgt der Neigungswinkel dem Sonnenstand, von hohen Neigungswinkeln bei tiefstehender Sonne, zu flachen Winkeln bei hochstehender Sonne. Der Azimut der Modulflächen variiert zwischen 96,49° bzw. 93,89° Ost in der ersten Tageshälfte und 276,49° bzw. 273,89° West in der zweiten Tageshälfte. Bei tiefstehender Sonne führt ein hoher Neigungswinkel jedoch - je nach Reihenabstand und Tischbreite - zur Eigenverschattung der Modulreihen. Dies wird meist durch ein aktives „Backtracking“ verhindert, durch welches bei auftretender Eigenverschattung der Modulreihen der Neigungswinkel reduziert wird. Der Verlauf des Neigungswinkels ergibt sich für dieses System dann wie in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt, wobei der Neigungswinkel bei Ostausrichtung negativ dargestellt ist. Im Sommer begrenzt das Backtracking demnach den maximalen Neigungswinkel in den Morgen- und Abendstunden. Mit höherem Sonnenstand wird der Neigungswinkel dann kurzzeitig auf eine maximale Neigung von 60° erhöht. Bis zum Mittag senkt er sich dann mit zunehmender Sonnenhöhe auf einen idealen Neigungswinkel von 0° ab. Je nach Hersteller ist auch eine Anpassung dieses Nachführverhaltes möglich, beispielsweise die Begrenzung der Absenkung des Neigungswinkels bei sehr tiefem Sonnenstand.

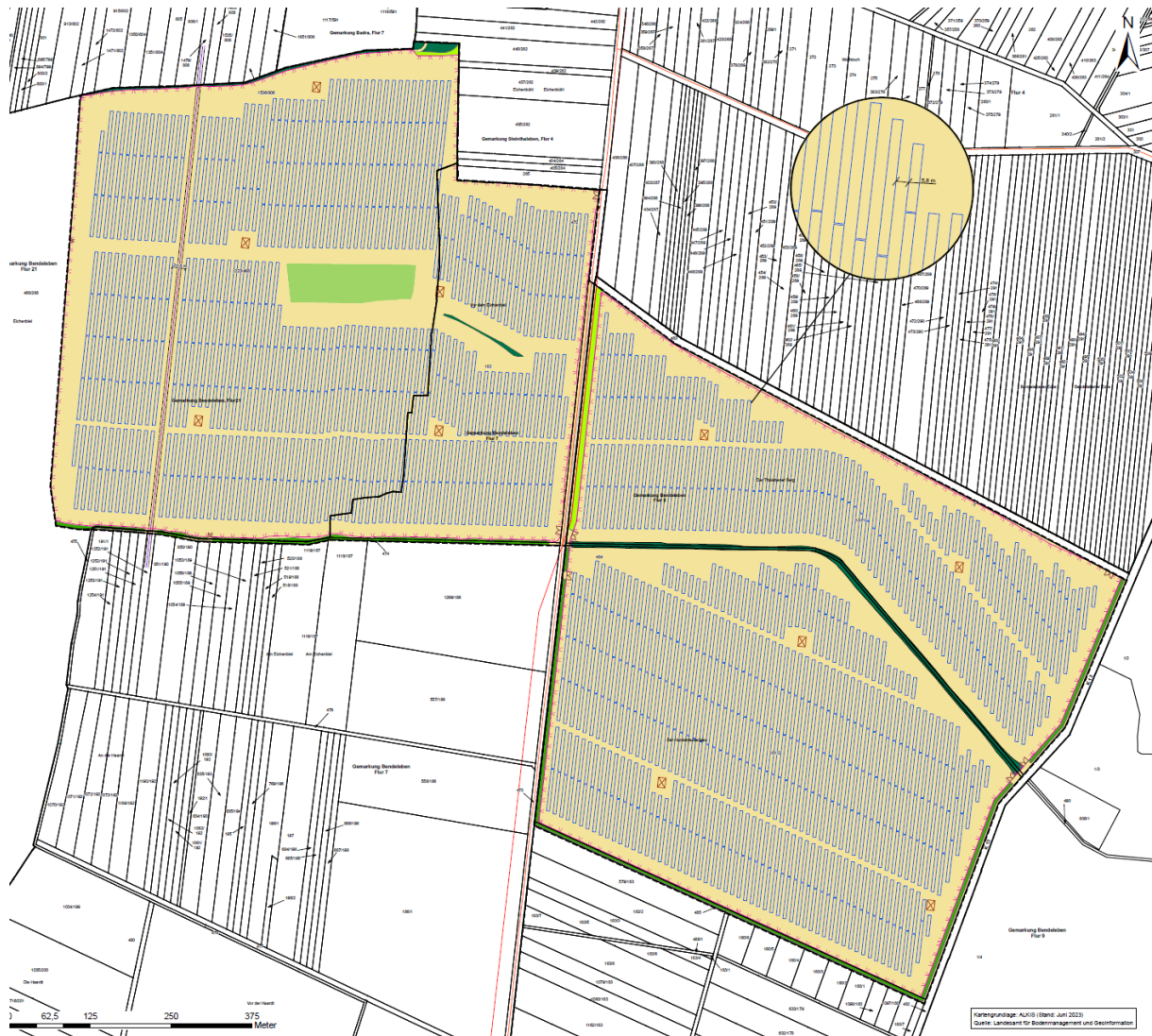


Abbildung 4: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)

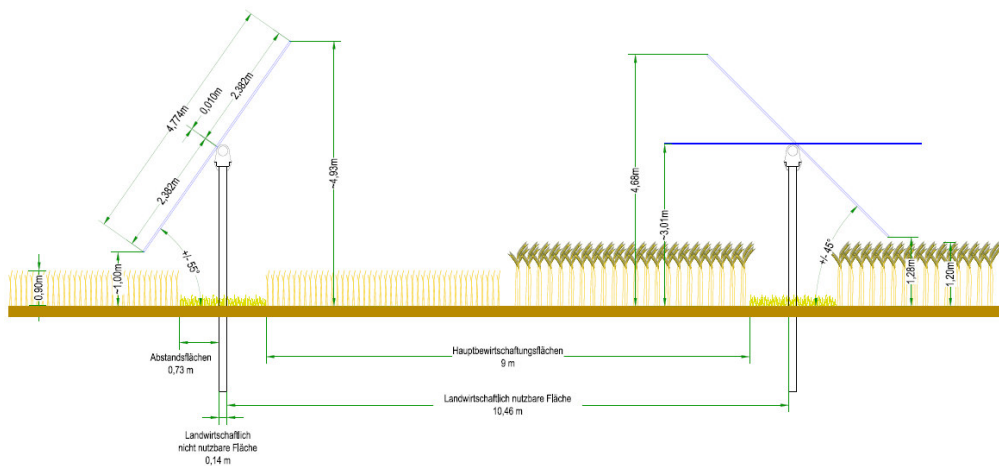


Abbildung 5: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)

4 Grundlagen der Optik

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

4.1 Geometrische Reflexionssituation

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

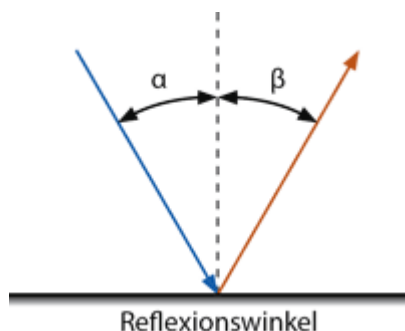


Abbildung 6: Reflexion eines Lichtstrahls

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 7 ist in a) die ideal gerichtete Reflexion an einer völlig glatten Oberfläche, in b) eine reale auftretende Streuung an einer unebenen Oberfläche und in c) eine ideal gestreute Reflexion nach dem Lambertischen Gesetz zu sehen.

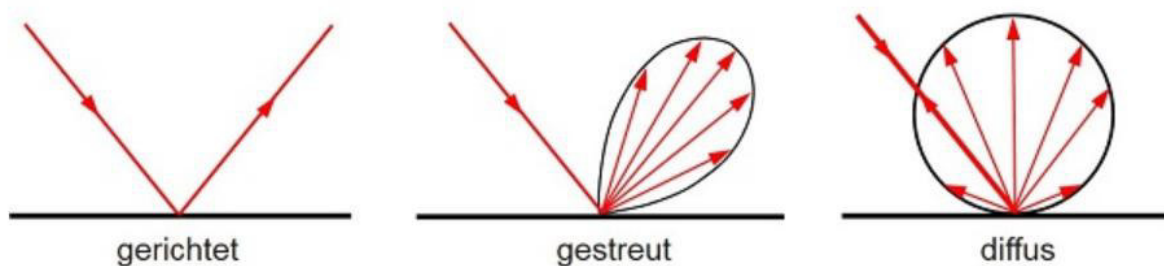


Abbildung 7: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1]

Bei realer Reflexion kommt es zudem zu sogenannter Bündelaufweitung, einer Streuung um den idealen Reflexionswinkel. Mit steigendem Differenzwinkel zwischen idealem Reflexionswinkel und Streuwinkel nimmt die Intensität der reflektierten Strahlung stark ab. Hier wird, wenn von einer Bündelaufweitung gesprochen wird, das Bogenmaß (oder der Winkel) der Standardabweichung um die Intensität der realen Reflexion verwendet (s. Abbildung 8).

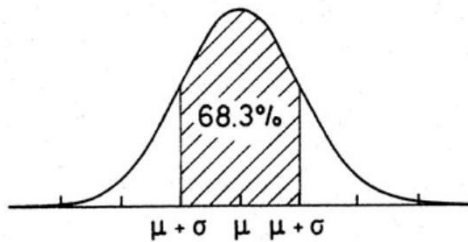


Abbildung 8: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung

4.2 Reflexionseigenschaften verschiedener Modultypen

Entscheidend für die Reflexionseigenschaften eines PV-Moduls ist die Oberflächenstruktur des Glases. In Abbildung 9 sind Messungen der Oberflächenstruktur und Bilder der auftretenden Reflexion für drei unterschiedlich stark texturierte Frontgläser zu sehen.

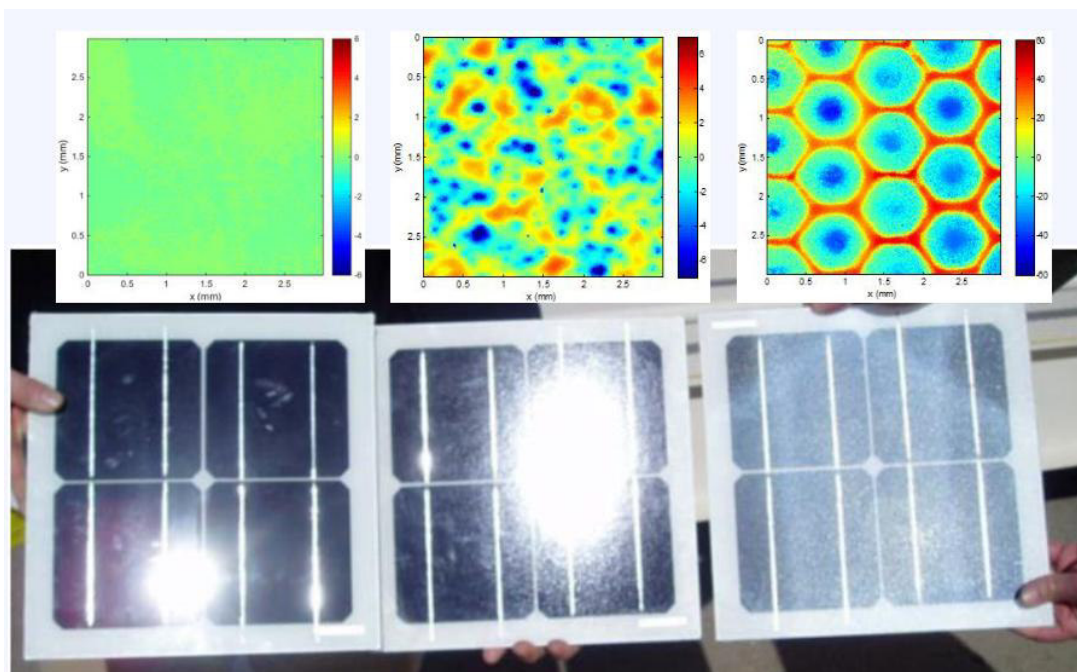


Abbildung 9: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [2]

In der Messdatenanalyse wurde für Floatglas eine Strahlweite von 20 mrad ($1,15^\circ$), für leicht- bis mittelstark texturiertes Glas eine Aufweitung von 92-184 mrad ($5,27-10,56^\circ$) und für tiefstrukturiertes Glas 1000 mrad (57°) gemessen [2]. Während leicht bis mittelstark strukturiertes Glas bereits als Standardprodukt vertrieben wird, handelt es sich bei tiefstrukturiertem Glas noch nicht um Massenware, da die Herstellung mit erheblichen Mehrkosten einhergeht. Alternativ ist jedoch auch das Aufbringen geeigneter Folien oder das Verwenden von satiniertem Glas eine Möglichkeit, um beinahe vollständig blendfreie Module herzustellen, siehe Abbildung 10.

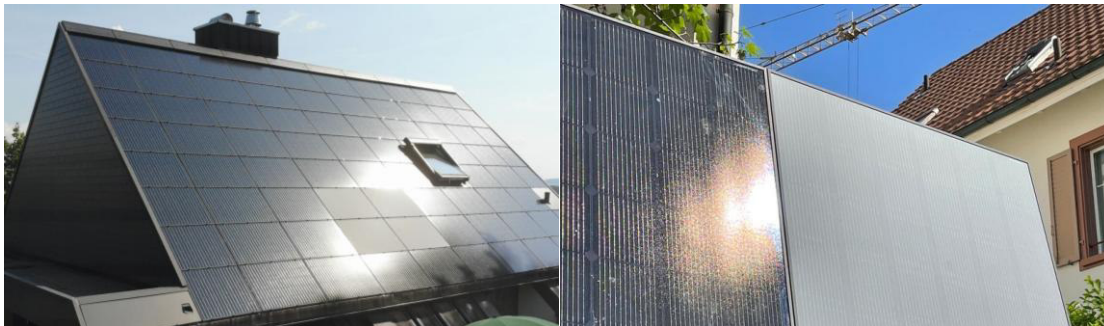


Abbildung 10: links: Module mit satinierter Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4]

Solarmodule sind so konzipiert, dass sie einen möglichst hohen Anteil des Sonnenlichtes nutzen, das Frontglas also einen möglichst hohen Transmissionsgrad und möglichst niedrigen Reflexionsgrad aufweist. Die Transmission von Solargläsern liegt typischerweise bei rund 96% bei senkrechter Einstrahlung, sodass die Reflexionsverluste etwa 4% betragen. Mit Verwendung von Anti-Reflexions-Beschichtungen sind auch Reflexionsgrade von nur 2% möglich. Mit höheren Einfallswinkeln steigt der Reflexionsgrad jedoch bei beinahe allen Modultypen stark an, wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Ausnahmen sind hier nur tief texturierte Module.

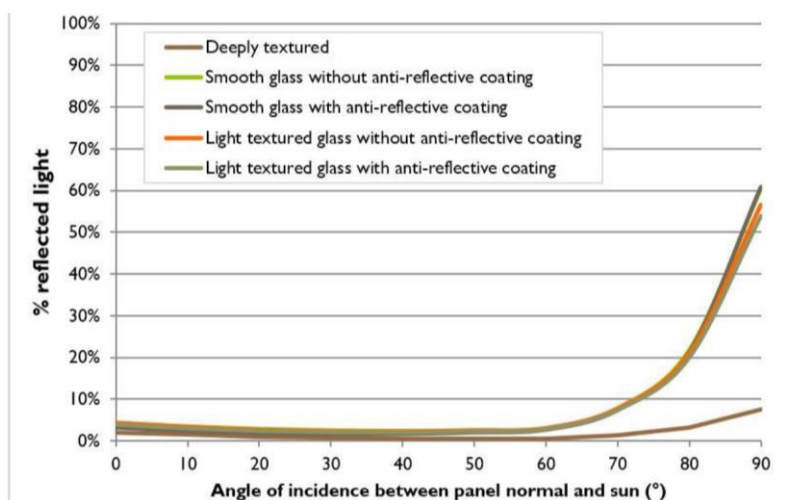


Abbildung 11 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]

4.3 Blendung

Blendung wird hier definiert als eine Störung der Wahrnehmung durch eine Lichtquelle. Hierfür ist zum einen die gewichtete Helligkeit des Sichtfeldes relevant, welche zu einer entsprechenden Adaption des Auges führt, zum anderen die Helligkeit des Objekts, auf welches das Auge fokussiert ist und welches wahrgenommen werden soll.

Es wird zwischen einer Blendung, welche eine Beeinträchtigung der Sicht zur Folge hat und einer Blendung, welche „nur“ als unangenehm empfunden wird, unterschieden. Während eine Beeinträchtigung der Sicht in Verkehrssituationen gänzlich vermieden werden sollte, ist für ortsfeste Beobachter eine kurzzeitige Beeinträchtigung durch Blendung ein geringeres Problem als eine lang andauernde „nur“ unangenehm empfundene Blendung. Wann eine Reflexion als unangenehm empfunden wird, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. In der Literatur werden verschiedene Berechnungsmethoden vorgeschlagen, es hat sich jedoch bisher kein Standard etablieren können [5].

Eine Beeinträchtigung der Sicht liegt vor, wenn die Helligkeit der Blendquelle (gewichtet mit deren Entfernung zum zentralen Sichtfeld) eine Anhebung der adaptiven Helligkeit zur Folge hat, welche dazu führt, dass das Ziel nicht mehr richtig wahrgenommen werden kann. Dies wird in Abbildung 12 verdeutlicht: Erhöht sich die adaptive Helligkeit, erhöht sich auch die minimale Helligkeit, die ein Objekt haben muss, um gut erkennbar zu sein. Das Anpassungsvermögen an die Umgebungshelligkeit endet bei einer Helligkeit zwischen $10^4 - 10^5 \text{ cd/m}^2$, was dann als Absolutblendung bezeichnet wird. Ob es durch eine Blendquelle zu einer Absolutblendung kommt, hängt somit immer auch von der Blickrichtung zu dieser ab und ist in der Regel nur bei einer Blickrichtung direkt in die Blendquelle oder in deren direkte Nähe möglich.

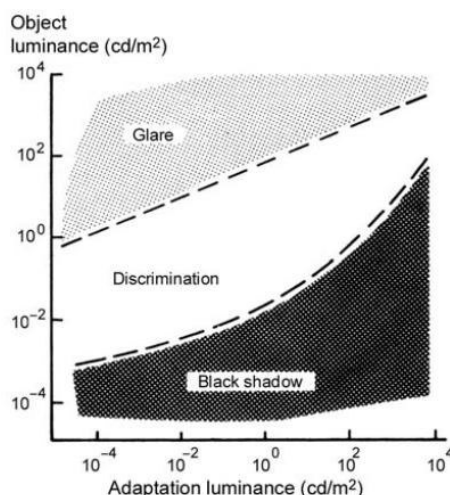


Abbildung 12: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]

5 Methodik der Untersuchung mit ForgeSolar

5.1 Bewertungsbasis

Um die betroffenen örtlich aufgelösten Bereiche bestimmen zu können und eine quantitative Aussage über die Reflexionsimmissionen zu treffen, wird ein Simulationstool verwendet. Dieses soll minutengenau darstellen, ob und zu welchem Zeitpunkt schutzwürdige Räume einer potenziellen Blendung ausgesetzt sind. Schutzwürdige Räume sind laut LAI-Hinweisen:

- Wohnräume
- Schlafräume einschließlich Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten und Bettenräume in Krankenhäusern und Sanatorien
- Unterrichtsräume in Schulen, Hochschulen und ähnlichen Einrichtungen
- Büroräume, Praxisräume, Arbeitsräume, Schulungsräume und ähnliche Arbeitsräume [6]

Ist einer dieser Räume von Blendung betroffen, wird überprüft, ob es zu einer erheblichen Belästigung im Sinne der LAI-Hinweise kommt. Derzeit gibt es dafür in Deutschland keine gesetzlichen Regelungen, bzw. Grenzwerte. Allerdings leiten die LAI - Hinweise Bewertungsgrößen aus einem Hinweispapier für Windenergieanlagen [7] ab. Die LAI-Hinweise definieren diese Bewertungsgrößen wie folgt:

*„[Gegenwärtig wird davon ausgegangen, dass...] eine erhebliche Belästigung im Sinne des BImSchG durch die maximal mögliche astronomische Blenddauer unter Berücksichtigung aller umliegenden Photovoltaikanlagen vorliegt, wenn diese **mindestens 30 Minuten am Tag oder 30 Stunden pro Kalenderjahr** beträgt.“ [6]*

Liegt die Blenddauer unterhalb dieser Grenzwerte wird die Blendung als allgemein hinnehmbar bewertet. Auch der Österreichische Verband für Elektrotechnik veröffentlichte im November 2016 eine Richtlinie mit identischen Richtwerten für die Ermittlung von durch Blendung verursachte Belästigung [8]. Zusätzlich zu den schutzwürdigen Räumen muss überprüft werden, ob die auftretende Blendung die Sicherheit von folgenden Bereichen gefährdet:

- Straßenverkehr
- Schienenverkehr
- Schifffahrtsverkehr
- Flugverkehr

Tritt in einem dieser Arbeitsbereiche Blendung auf, kann selbst eine kurzzeitige Blendung schwerwiegend Folgen haben. Es sollte deshalb beim Auftreten von Blendung im Verkehrsbereich mit der Behörde und den Beteiligten eine Risikoanalyse zur Gefährdungsbeurteilung vorgenommen werden, um ggf. Blendschutzmaßnahmen vorzunehmen.

5.2 Simulationstool und Modellierung

Als Simulationstool zur Bestimmung der auftretenden Blendung wird das Programm *ForgeSolar* der Firma Sims Industries, LLC verwendet. Dieses basiert auf dem wissenschaftlichen Modell „Solar Glare Hazard Analysis Tool“, welches durch die Sandia National Laboratories, New Mexico entwickelt wurde. Dieses wurde 2013 in den USA von staatlicher Seite anerkannt und bis 2021 war eine Analyse mit diesem Tool verpflichtend für PV-Flächen in Flughafenumgebung [9].

Das Tool berechnet aus den lokalen Sonnenständen die Einfallswinkel auf die Module, bzw. Modulreihen. Hierzu werden auf einer Karte die Modulflächen markiert und Neigungswinkel und Azimut der Ausrichtung eingestellt. Mit den Höhendaten des Geländes wird hieraus eine einheitliche Fläche approximiert. Es lassen sich verschiedene Modultypen mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften auswählen, welche im Wesentlichen darüber entscheiden, wie stark das reflektierte Licht gestreut wird. Die Simulation wertet nur als relevant markierte Beobachtungspunkte und Strecken aus. Die Auflösung der Simulation ist minütlich und erfolgt für ein Kalenderjahr. Bei der Simulation werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Blendwirkung wird unabhängig vom Bedeckungsgrad des Himmels berechnet. Somit ergeben sich die astronomisch maximalen Blendzeiträume. Das entspricht einer „worst case“ Betrachtung der Blendsituation. Das Vernachlässigen der Wetterverhältnisse empfiehlt auch das Ministerium für Umwelt [6] und die TU Ilmenau [10].
- Zur Bewertung des Straßenverkehrs wird nur die Blendung im Bereich des Blickwinkels von $\pm 30^\circ$ berücksichtigt, ausgehend von der jeweiligen Fahrtrichtung. Zur Bewertung des Bahnverkehrs wird die Blendung im Bereich des Blickwinkels von $\pm 20^\circ$ berücksichtigt. Zudem werden Blendungen nicht betrachtet, welche aus der gleichen Richtung wie die direkte Sonnenstrahlung kommen. Somit muss die Differenz der Richtungsvektoren von Reflexionsstrahl und Sonneneinstrahlung weniger als 10° betragen. Dies wird begründet dadurch, dass die Sonne, die eine höhere Lichtintensität aufweist als die Reflexion, als Hauptblendquelle wahrgenommen wird und die Reflexion in diesen Fällen keine zusätzliche Blendungsquelle darstellt [8].
- Der Immissionsort im Straßenverkehr wird in der Regel auf eine Höhe von 3 m festgelegt, was in etwa der Sichthöhe von Lastkraftwagen entspricht. Grund hierfür ist, dass in der Regel höhere Beobachtungspositionen auch einer stärkeren Blendung ausgesetzt sind. In Situationen, in denen das nicht zutrifft, weil eine Blendung von oben stattfindet, wird die Sichthöhe stattdessen auf 1,5 m über dem Boden festgelegt, um in diesem Fall einen PKW abzubilden. Der Immissionsort von Bahntrassen wird typischerweise auf 3 m über dem Boden festgelegt.

Für weitere Informationen wird an dieser Stelle auf die Webseite von ForgeSolar verwiesen [11].

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 13 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.

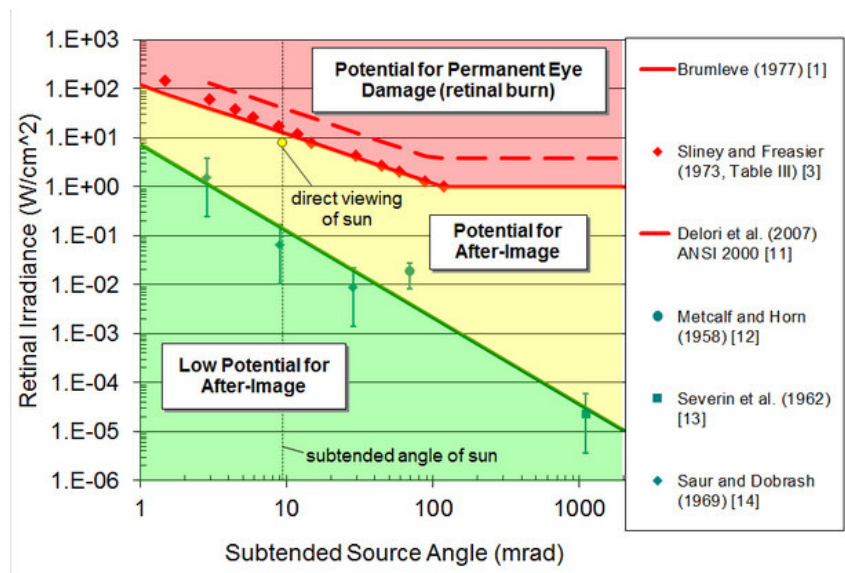


Abbildung 13: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [11]

6 Simulation mit ForgeSolar

Dieses Kapitel stellt die Simulationsparameter dar. Es werden die Eingabedaten und Simulationsparameter für die PV-Flächen und die zu untersuchenden Immissionsorte aufgeführt. Eine Übersicht über die angelegte Simulation ist in Abbildung 14 für den Straßenverkehr dargestellt und in Abbildung 15 für die schutzwürdigen Orte.

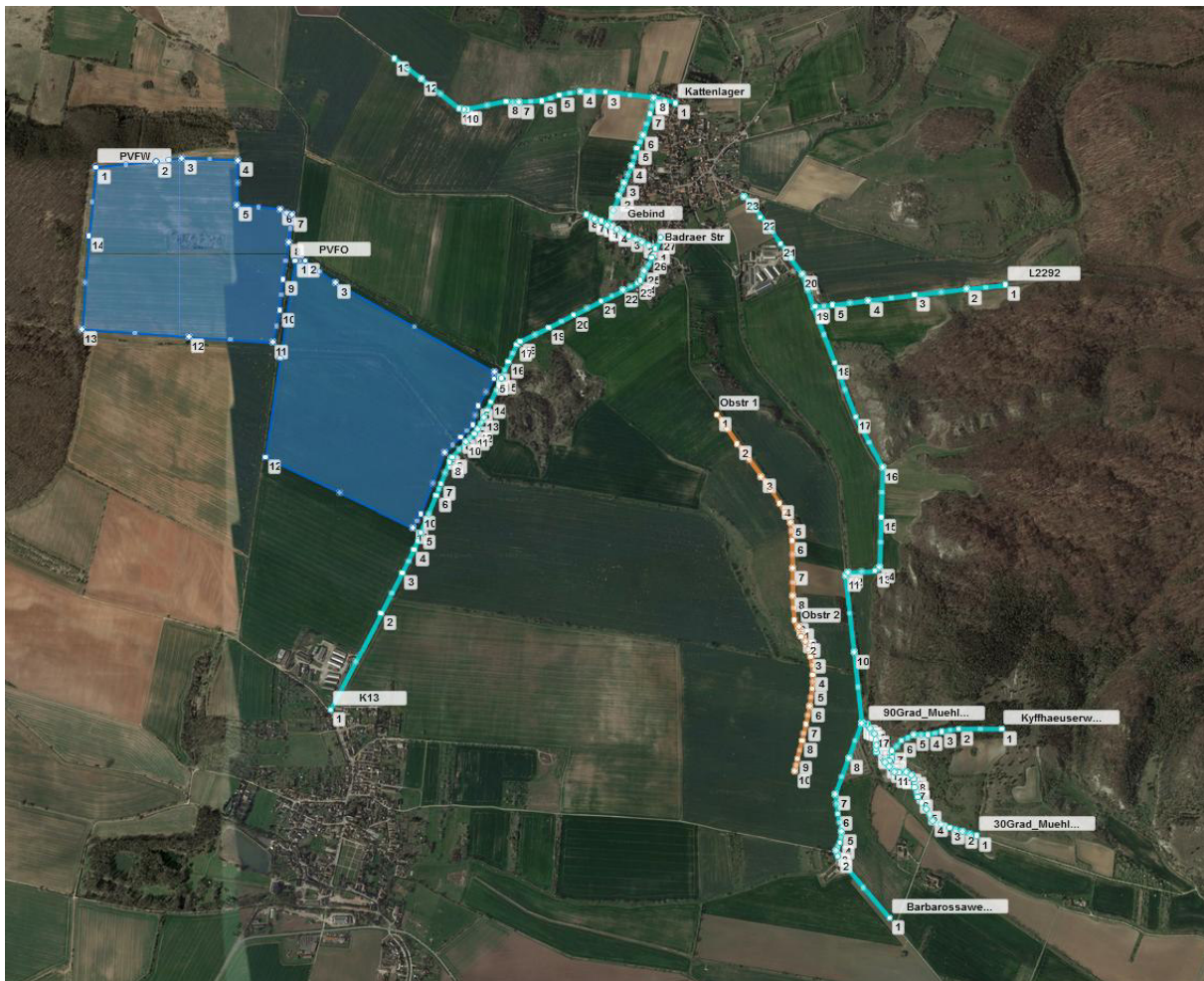


Abbildung 14: Anlage (blaue Flächen), umliegende Straßen (hellblaue Linien) und Topologie des Geländes (orange Linien) in der Simulationssoftware ForgeSolar

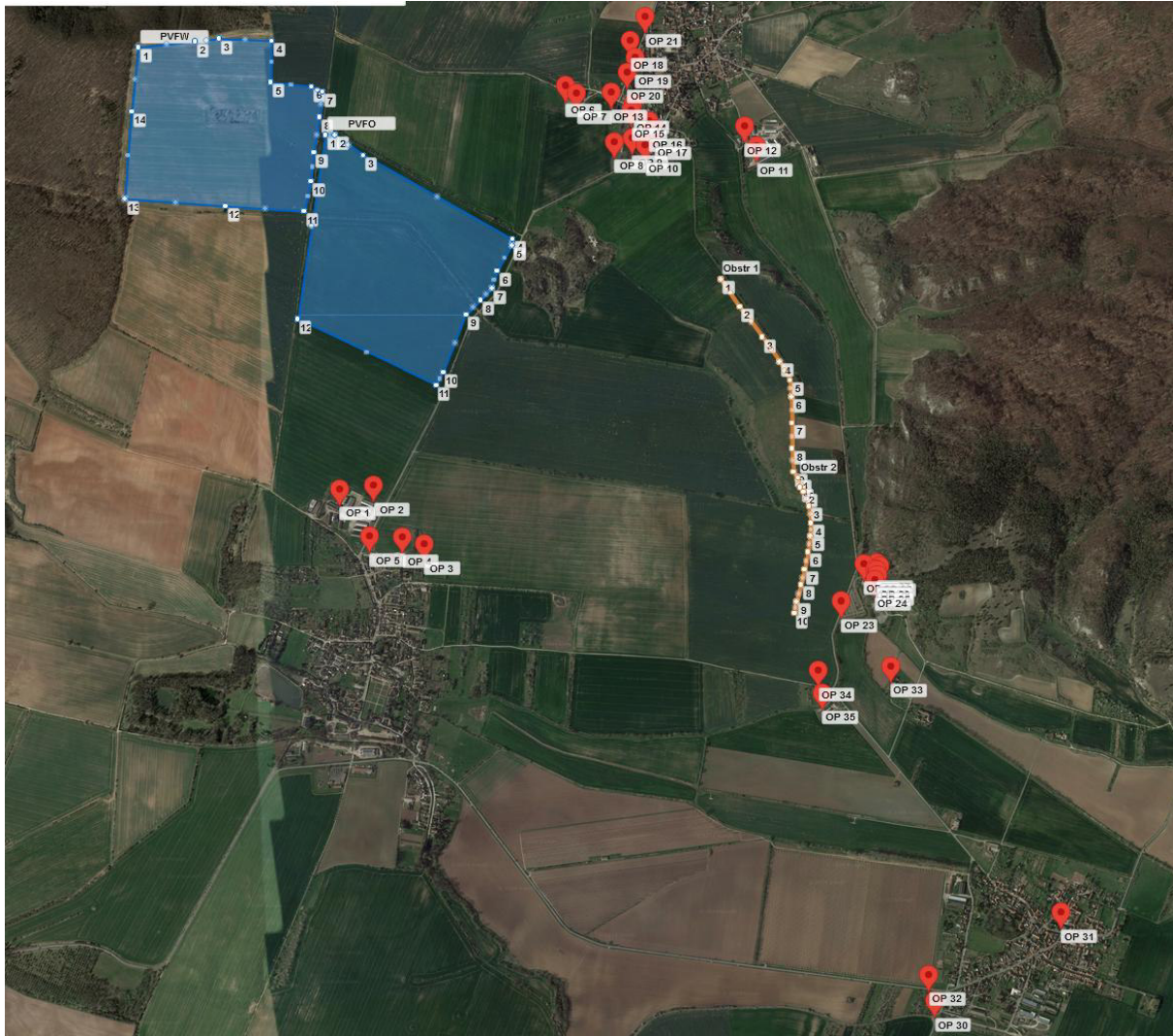


Abbildung 15: Anlage (blaue Flächen), umliegende schutzwürdige Orte (rote Punkte) und Topologie des Geländes (orange Linien) in der Simulationssoftware ForgeSolar

6.1 PV-Anlage

Die PV-Flächen werden als einachsige-nachgeführte Trackeranlagen mit Rotationsachsen von $183,89^\circ$ und $186,49^\circ$ simuliert. Das Nachführungsverhalten der Modultische in der Simulation entspricht dem in Kapitel 3 beschriebenen Backtracking-Verhalten.

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 Höhe der Achse beträgt 3,01 m. Die genauen Koordinaten der Eckpunkte der PV-Flächen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Koordinaten der PV-Flächen

PV-Flächen	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
PV-Feld Ost	1	51,392122	11,00375371	232,5	3	235,5
	2	51,392122	11,00429015	232,3	3	235,4
	3	51,3913722	11,00598531	227,4	3	230,4
	4	51,38828915	11,0147615	197,4	3	200,5
	5	51,38803808	11,01472395	196,7	3	199,7
	6	51,38710408	11,01386028	195,6	3	198,6
	7	51,38646467	11,01358133	189,7	3	192,7
	8	51,38602277	11,01291077	189,6	3	192,6
	9	51,38550051	11,01205247	188,3	3	191,3
	10	51,38338464	11,0106899	188,6	3	191,6
	11	51,38290253	11,01028221	188,5	3	191,5
	12	51,38532441	11,0021122	209	3	212
PV-Feld West	1	51,39533445	10,99270863	301,4	3	304,5
	2	51,39553527	10,99605603	289,6	3	292,6
	3	51,39564238	10,99747223	282,8	3	285,8
	4	51,39556874	11,00059432	267,1	3	270,1
	5	51,39402906	11,00054068	259,6	3	262,6
	6	51,3938684	11,00294394	251,8	3	254,8
	7	51,39369434	11,00358767	249,2	3	252,2
	8	51,39275711	11,00341601	240,6	3	243,6
	9	51,39145835	11,00305123	226,6	3	229,6
	10	51,39040057	11,00290102	224,3	3	227,3
	11	51,38930928	11,00250406	216,2	3	219,2
	12	51,38947666	10,99785847	228	3	231
	13	51,38976455	10,99193615	245	3	248
	14	51,39295795	10,99233312	287,8	3	290,8

Für die optischen Eigenschaften der Moduloberfläche wurde für die Simulation mit Straßen ein glattes Glas mit einer Rauigkeit (auf Englisch: slope error) von 6,55 mrad gewählt. Dies ist hinsichtlich der resultierenden Leuchtdichte als worst-case Szenario anzusehen, da die meisten handelsüblichen Module leicht texturiert sind und eine Antireflexionsbeschichtung aufweisen.

Für die optischen Eigenschaften der Moduloberfläche wurde für die Simulation mit Beobachtungspunkten ein glattes Glas mit einer Rauigkeit (auf Englisch: slope error) von 0 mrad gewählt, um den Ansatz der LAI [7] (ideale Verspiegelung) nachzubilden.

6.2 Immissionsorte

Als relevante Immissionsorte werden die umliegenden Straßen und die umliegenden schutzwürdige Orte untersucht. Grundlage für die gewählten Immissionsorte sind Angaben des Auftraggebers, die vom Auftraggeber durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse (s. Abbildung 16), sowie Satellitenbilder von April 2021. Die Untersuchungshöhe für den Straßenverkehr wird als „worst case“ auf 3 m über der Strecke festgelegt. Für die Straßen wird ein relevanter Sichtwinkel von $\pm 30^\circ$ zur Fahrtrichtung untersucht. Die exakten Koordinaten, die Höhe ü. NN, die für die Simulation angenommene Untersuchungshöhe und die daraus resultierende Gesamthöhe sind aus Tabelle 2 und zu Tabelle 3 entnehmen.

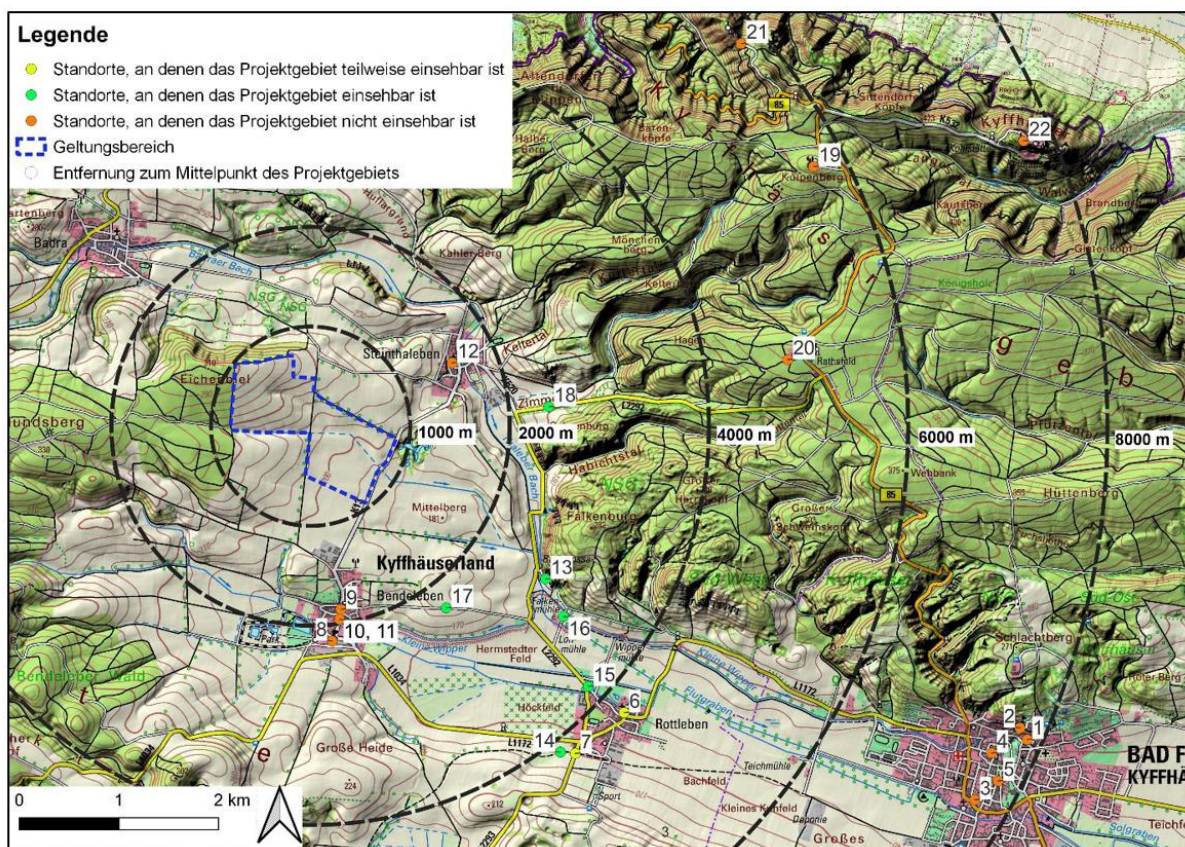


Abbildung 16: Sichtbarkeitsanalyse (Quelle: Auftraggeber)

Tabelle 2: Koordinaten der zu untersuchenden Straßen

Verkehrsstrecken	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
Barbarossaweg / Mühlen	1	51,37230138	11,04143172	161,2	3	164,2
	2	51,37242863	11,04064852	159,2	3	162,2

	3	51,37256928	11,03991895	157,6	3	160,6
	4	51,37281039	11,03898555	153,3	3	156,3
	5	51,37320554	11,03862077	156,8	3	159,8
	6	51,37363417	11,03815943	154,1	3	157,1
	7	51,37394895	11,03800922	153,6	3	156,6
	8	51,37425702	11,03796631	153	3	156
	9	51,37437757	11,0378161	152,4	3	155,4
	10	51,37447803	11,03750497	152,9	3	155,9
	11	51,37445794	11,03712946	155	3	158
	12	51,37449813	11,03687196	155,1	3	158,1
	13	51,37468565	11,03659301	156,4	3	159,4
	14	51,37516115	11,03589564	156	3	159
	15	51,37528839	11,03584736	157,1	3	160,1
	16	51,3753855	11,03591173	158,7	3	161,7
	17	51,37579737	11,0357508	161,1	3	164,1
	18	51,37597484	11,03553622	159,7	3	162,7
	19	51,37611548	11,03537529	157,5	3	160,5
	20	51,37616571	11,03510707	154,7	3	157,7
Barbarossaweg / Mühlen Kreuzung	1	51,37613344	11,03531704	155,4	3	158,4
	2	51,37615186	11,0352178	154	3	157
	3	51,37615688	11,03514538	154,4	3	157,4
	4	51,37616526	11,03509174	154,7	3	157,7
Badraer Str.	1	51,39253257	11,02367861	180,6	3	183,6
	2	51,3927468	11,02294905	183,6	3	186,6
	3	51,39297776	11,02219267	186,6	3	189,6
	4	51,39318529	11,02153821	190	3	193
	5	51,39336939	11,02097495	192,7	3	195,7
	6	51,39346646	11,02064772	194,6	3	197,6
	7	51,39356352	11,02027221	196,1	3	199,1
	8	51,39369072	11,01985915	197,7	3	200,7
Barbarossaweg / L2292	1	51,36944051	11,03660383	144,1	3	147,1
	2	51,37156372	11,03373923	151,7	3	154,7
	3	51,37178474	11,03364267	153,6	3	156,6
	4	51,37204595	11,03386797	152,6	3	155,6
	5	51,37242101	11,0339538	152,2	3	155,2
	6	51,37304388	11,0337285	152,5	3	155,5
	7	51,37370692	11,03361048	152,3	3	155,3
	8	51,37495931	11,03434004	154,4	3	157,4
	9	51,37616478	11,0350696	154,8	3	157,8
	10	51,37862251	11,03464045	156,9	3	159,9
	11	51,3812743	11,03416838	159,7	3	162,7
	12	51,38136805	11,03430785	159,5	3	162,5

	13	51,38141492	11,03580989	160	3	163
	14	51,38156893	11,03604593	161,1	3	164,1
	15	51,38328313	11,03613176	164,4	3	167,4
	16	51,38499726	11,03622832	167,7	3	170,7
	17	51,3867153	11,03473701	166,6	3	169,6
	18	51,38860338	11,03355684	173,4	3	176,4
	19	51,39050699	11,03241958	175,6	3	178,6
	20	51,39166519	11,03175439	174,3	3	177,3
	21	51,39268947	11,03056501	176,3	3	179,3
	22	51,39359992	11,02944921	180,2	3	183,2
	23	51,39432961	11,02855871	182,7	3	185,7
Gebind	1	51,39334209	11,02101461	192,4	3	195,4
	2	51,39436633	11,02165834	193,3	3	196,3
	3	51,39479476	11,02194801	192,3	3	195,3
	4	51,39538386	11,0223128	189,9	3	192,9
	5	51,39598633	11,02264539	188,3	3	191,3
	6	51,39644822	11,02297798	187	3	190
	7	51,39717786	11,02335349	185,9	3	188,9
	8	51,39769329	11,02356807	183,5	3	186,5
K13	1	51,37664235	11,00572601	187,1	3	190,1
	2	51,37995051	11,00850478	193	3	196
	3	51,38133665	11,00967423	191,8	3	194,8
	4	51,38214019	11,01031796	188,7	3	191,7
	5	51,38274953	11,01071492	188	3	191
	6	51,38403515	11,01154104	187,7	3	190,7
	7	51,3844369	11,01181999	187,8	3	190,8
	8	51,38518012	11,0122706	188,3	3	191,3
	9	51,38534082	11,01241008	188,4	3	191,4
	10	51,38586773	11,01320051	189,4	3	192,4
	11	51,38614894	11,01365112	189,8	3	192,8
	12	51,38630294	11,01384424	190,1	3	193,1
	13	51,38671136	11,01417684	191	3	194
	14	51,38722691	11,01455235	193,8	3	196,8
	15	51,38806382	11,01515316	197	3	200
	16	51,38861952	11,0155394	198,2	3	201,2
	17	51,38922208	11,01601147	201,6	3	204,6
	18	51,38932921	11,01621532	202,1	3	205,1
	19	51,38981361	11,01779019	197,1	3	200,1
	20	51,39023539	11,01916348	195	3	198
	21	51,39071742	11,02065479	193,6	3	196,6
	22	51,39109903	11,02187787	189,3	3	192,3
	23	51,39133335	11,02267181	186,5	3	189,5

	24	51,39144046	11,02283274	186,3	3	189,3
	25	51,39175512	11,0230795	184,5	3	187,5
	26	51,39221705	11,02346574	182,5	3	185,5
	27	51,39291329	11,02397	180,3	3	183,3
Kattenlager	1	51,397549	11,0247803	179,3	3	182,3
	2	51,39772639	11,02357867	183,4	3	186,4
	3	51,39791382	11,02093401	187,5	3	190,5
	4	51,39795733	11,01953926	190,1	3	193,1
	5	51,39781676	11,01833763	191,5	3	194,5
	6	51,3976126	11,01739349	193,5	3	196,5
	7	51,39756239	11,01610603	197,7	3	200,7
	8	51,39758582	11,01542475	199	3	202
	9	51,39732141	11,01327899	202,1	3	205,1
	10	51,39732476	11,0130805	203	3	206
	11	51,39736827	11,01279082	204,8	3	207,8
	12	51,39836424	11,01072776	216,9	3	219,9
	13	51,39906118	11,00925245	225,3	3	228,3
L2292	1	51,39128928	11,04300563	210,2	3	213,2
	2	51,3911353	11,04089205	200,9	3	203,9
	3	51,39093446	11,03801672	197,1	3	200,1
	4	51,39073361	11,03540961	189,9	3	192,9
	5	51,39057963	11,03343551	181,1	3	184,1
	6	51,39052607	11,03249137	176,2	3	179,2

Tabelle 3: Koordinaten der zu untersuchenden schutzwürdigen Orte

Beobachtungs- punkte	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]	Höhe über Gelände [m]	Höhe ü. NN gesamt [m]
1	51,37845755	11,00457396	193,3	4,7	198
2	51,37857793	11,00657489	194,8	4,7	199,5
3	51,37642356	11,00952775	192,5	1,7	194,2
4	51,37668423	11,00827337	193,4	4,7	198,1
5	51,37670783	11,00634486	189	4,7	193,7
6	51,39329158	11,01788416	197	1,7	198,7
7	51,39303217	11,01857348	195,6	1,7	197,3
8	51,39121289	11,02073803	189,4	1,7	191,1
9	51,39135934	11,021827	186,4	4,7	191,1
10	51,39113172	11,0225968	189,7	4,7	194,4
11	51,39106728	11,0291615	170	1,7	171,7
12	51,39179366	11,02843731	171,2	4,7	175,9
13	51,39305958	11,02058112	190,8	4,7	195,5
14	51,39265372	11,02189004	185,2	4,7	189,9

15	51,39239263	11,02176397	184,8	4,7	189,5
16	51,39201104	11,02282613	182,8	4,7	187,5
17	51,39170475	11,02312922	185,1	4,7	189,8
18	51,39495211	11,02171531	193,2	4,7	197,9
19	51,39434126	11,02199426	191,4	4,7	196,1
20	51,3937873	11,02149939	194,3	4,7	199
21	51,39583637	11,02259693	189,1	4,7	193,8
22	51,37567869	11,03545145	154,4	1,7	156,1
23	51,37432084	11,03414253	152,7	1,7	154,4
24	51,37511985	11,0360992	157,3	1,7	159
25	51,37528727	11,03626818	161,2	1,7	162,9
26	51,37550242	11,03616894	162,6	1,7	164,3
27	51,37573514	11,03623465	166,6	1,7	168,3
28	51,37564515	11,03639961	166,2	4,7	170,9
29	51,37547354	11,03621722	162,6	4,7	167,3
30	51,35962883	11,03968435	159,5	1,7	161,2
31	51,36288632	11,04707841	142,2	4,7	146,9
32	51,36057357	11,03934676	155,7	4,7	160,4
33	51,37193858	11,03704508	147,2	4,7	151,9
34	51,37176719	11,03281773	154,9	1,7	156,6
35	51,37093668	11,0330341	152,5	4,7	157,2

6.1 Topologie des Geländes

Zur Darstellung wichtiger Sichtunterbrechungen wurden die in Abbildung 17 gezeigten Hindernisse mit in die Simulation aufgenommen. Die genauen Koordinaten sind in der Tabelle 4 angegeben.



Abbildung 17: Topologie des Geländes (Quelle: ForgeSolar)

Tabelle 4: Koordinaten der Sichtunterbrechungen

Sichtunterbrechungen	Punkt	Breitengrad [°]	Längengrad [°]	Geländehöhe ü. NN [m]
Sichtunterbrechung 1	1	51,38679464	11,02707019	138,5
	2	51,38577692	11,02818599	139,1
	3	51,38466544	11,02949491	137,6
	4	51,38375481	11,03052488	136
	5	51,38308522	11,03114715	135,4
	6	51,38246919	11,03123298	136,2
	7	51,38150494	11,03125444	135,2
	8	51,38055407	11,0312759	129,5
	9	51,37971032	11,03136173	127,1
	10	51,37913442	11,03172651	120,4
Sichtunterbrechung 2	1	51,37949604	11,03161922	126,8

	2	51,3789804	11,03195181	116,9
	3	51,37845807	11,03225222	110,4
	4	51,37783527	11,03239169	110,1
	5	51,37733971	11,03234878	116,4
	6	51,37677048	11,03218785	119,1
	7	51,37611418	11,03197327	115,3
	8	51,37554493	11,03176942	109,7
	9	51,37493549	11,03153339	108,8
	10	51,37451357	11,03137245	108,9

7 Ergebnisse mit ForgeSolar

Grundlage für die durchgeführte Simulation ist ein **fehlerfreier Betrieb des Nachführungsmechanismus**. Sollte dieser ausfallen oder ausgesetzt werden, so empfiehlt das Gutachten die Modulflächen in Richtung Westen (mit maximaler Neigung $+55^\circ$) auszurichten, so dass horizontnahe Reflexionen in Richtung Osten und damit auch eine Gefährdung des Verkehrs auf der K 13 vermieden werden können.

7.1 Ergebnisse im Betrieb ohne Bewirtschaftung

Das typische Verhalten des Backtracking-Systems ist in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt.

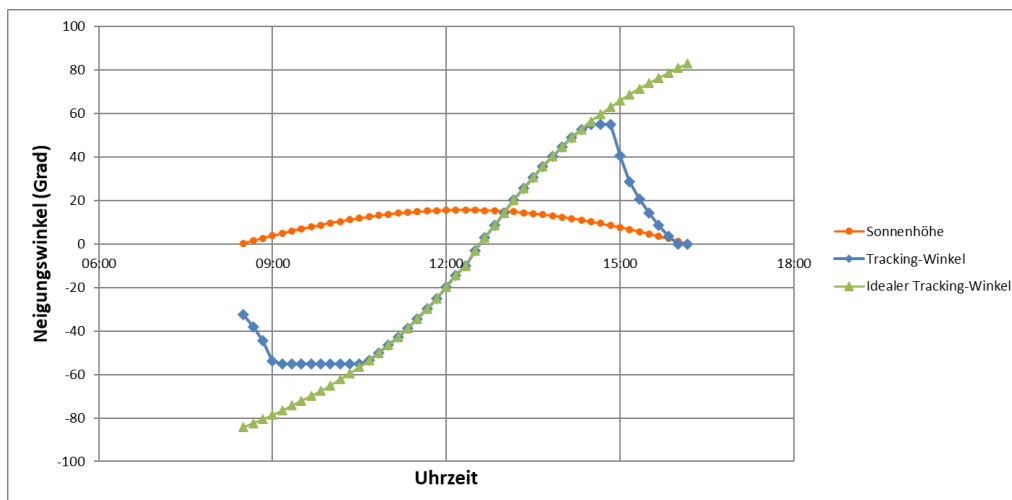


Abbildung 18: Winkel des Backtracking-Systems am 1. Januar (Quelle: ForgeSolar) (Uhrzeiten: GMT+1)

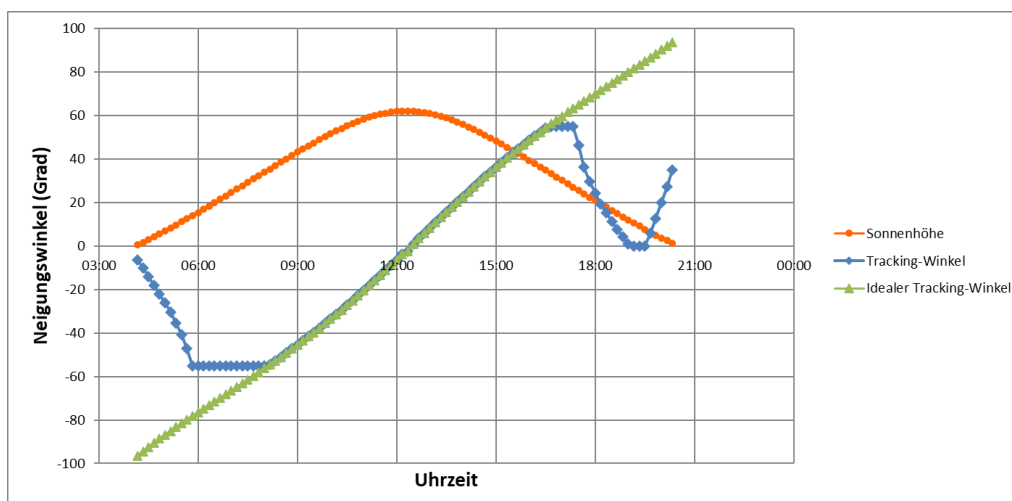


Abbildung 19: Winkel des Backtracking-Systems am 21. Juni (Quelle: ForgeSolar) (Uhrzeiten: GMT+1)

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 5 sind die Werte nach genannten Korrekturen aufgeführt. Werte, welche den LAI-Grenzwert von 30 Stunden/Jahr bzw. 30 Minuten/Tag überschreiten und einen schutzbedürftigen Ort betreffen oder eine kritische Blendung im Verkehr betreffen, sind in Rot dargestellt. Die so simulierte Blenddauer stellt das Höchstmaß potenzieller Blendung dar, welche ohne Bewölkung auftritt.

Die Immissionsorte ohne Reflexionen sind nicht in der Tabelle aufgelistet.

Tabelle 5: Simulationsergebnisse nach Filterung der Ergebnisse

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten
Barbarossaweg / Mühlen	2	4

7.1.1 Schutzwürdige Orte

Auf die Wohngebäude, Gärten, Bauernhöfe und die Gaststätte Barbarossahöhle treten laut Simulation keine Reflexionen auf.

7.1.2 Barbarossaweg / Mühlen

Die Ergebnisse der Simulation für den Barbarossaweg / Mühlen sind in Abbildung 20 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 28.05. bis zum 14.07. von 20:05 Uhr bis 20:20 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 296° - 298° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 4 Minuten erreicht.

Die Reflexionen können nahe der Hauptblickrichtung der Verkehrsbeteiligten auftreten, die Reflexionen sind daher als potenziell sichtbeeinträchtigend einzustufen und es werden Blendschutzmaßnahmen empfohlen (s. Kapitel 8). Die möglichen Immissionswinkel und Positionen sind in Abbildung 21 dargestellt.

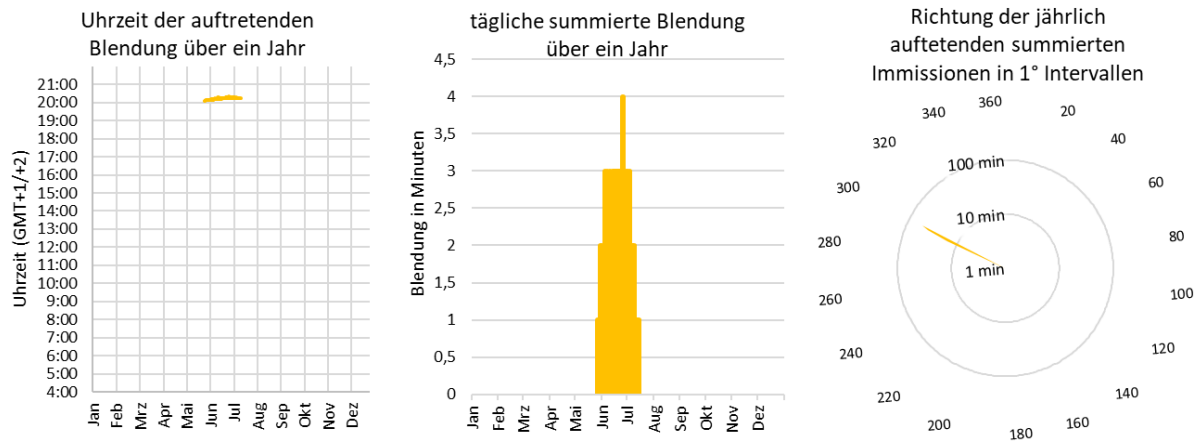


Abbildung 20: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung

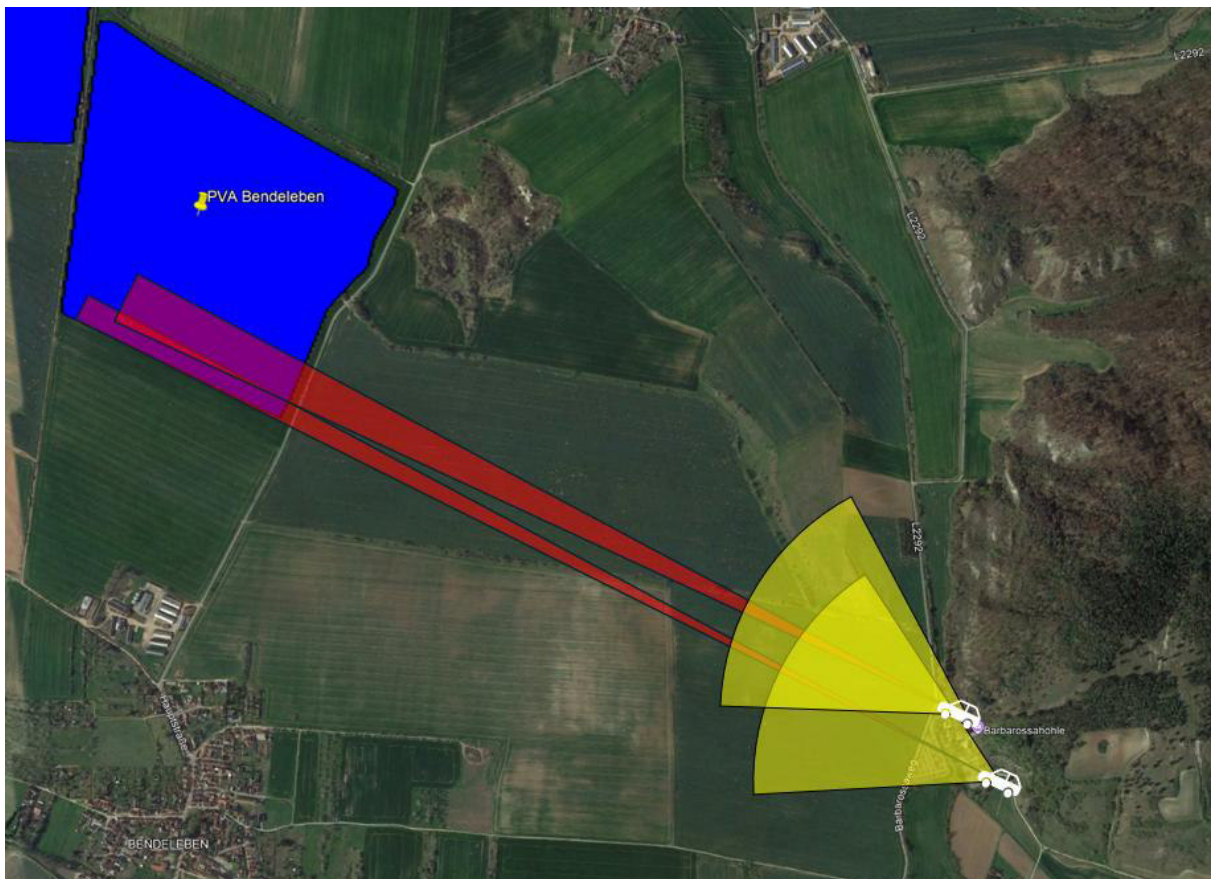


Abbildung 21: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, Immissionswinkel in Rot für zwei Positionen auf dem Barbarossaweg / Mühlen (Quelle: ForgeSolar)

7.2 Ergebnisse während der Bewirtschaftung

Für die Bewirtschaftung ist geplant, jede zweite Modulreihe maximal nach Osten bzw. nach Westen zu kippen, wie in Abbildung 22 exemplarisch dargestellt. Die Reflexionen mit diesen statischen Ausrichtungen der Bewirtschaftung müssen auch untersucht werden.

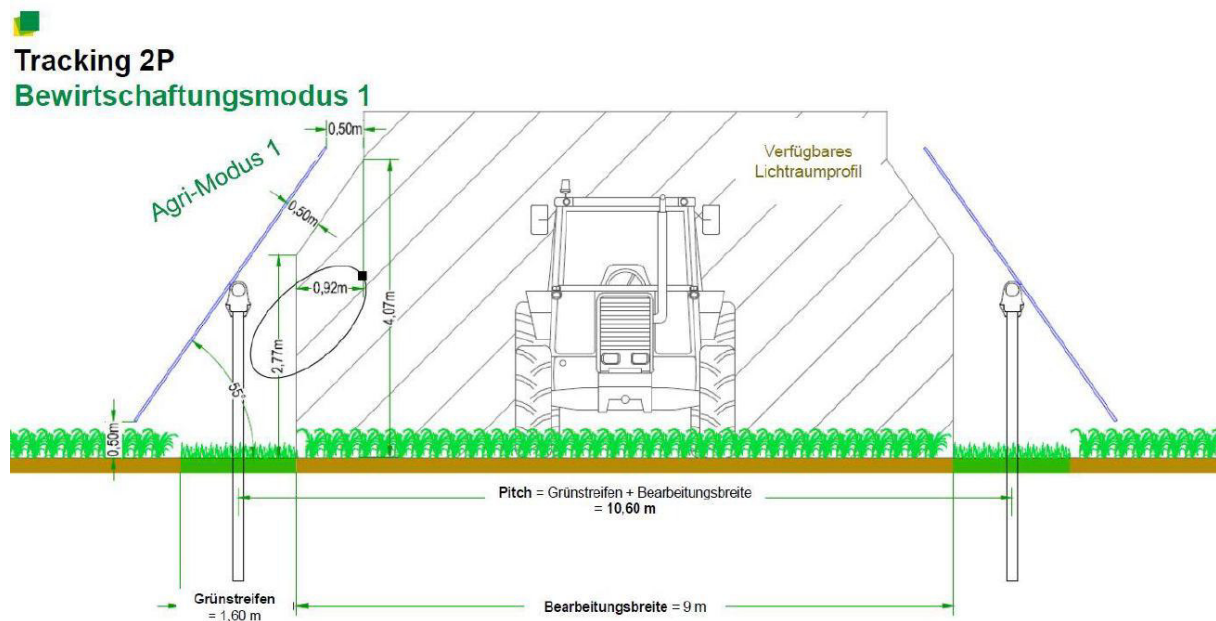


Abbildung 22: Exemplarische Darstellung des Bewirtschaftungsmodus (Quelle: Auftraggeber und Hersteller Baywa r.e.)

7.2.1 Schutzwürdige Orte

Die statische Ausrichtung nach Westen (+55°) verursacht laut Simulation gar keine Reflexionen auf die Wohngebäude, Gärten, Bauernhöfe und die Gaststätte Barbarossahöhle.

Die statische Ausrichtung nach Osten (-55°) verursacht laut Simulation die in der Tabelle 6 aufgelisteten Reflexionsdauern.

Tabelle 6: Reflexionsdauern auf die schutzwürdigen Orte mit den statisch nach Osten (-55°) ausgerichteten Modulen. Für die nicht aufgelisteten Beobachtungspunkte treffen keine Reflexionen auf.

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten
Beobachtungspunkt 6	39	11

Beobachtungspunkt 7	34	11
Beobachtungspunkt 8	24	8
Beobachtungspunkt 9	20	7
Beobachtungspunkt 10	15	6
Beobachtungspunkt 11	11	6
Beobachtungspunkt 12	12	6
Beobachtungspunkt 13	23	7
Beobachtungspunkt 14	22	7
Beobachtungspunkt 15	22	7
Beobachtungspunkt 16	20	7
Beobachtungspunkt 17	18	6
Beobachtungspunkt 18	20	6
Beobachtungspunkt 19	21	6
Beobachtungspunkt 20	20	6
Beobachtungspunkt 21	22	6

Es werden die in den LAI-Hinweisen vorgeschlagenen Grenzwerte nur bei den Beobachtungspunkten 6 und 7 leicht überschritten. Da es aber nicht andauernd bewirtschaftet wird, kann eine Beeinträchtigung der Anwohner und der Mitarbeiter ausgeschlossen werden. **Es sind für die schutzwürdigen Orte keine Blendschutzmaßnahmen erforderlich.**

7.2.2 Ergebnisse während der Bewirtschaftung für den Straßenverkehr

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. Die statische Ausrichtung nach Westen ($+55^\circ$) verursacht laut Simulation gar keine Reflexionen auf die Straßen.

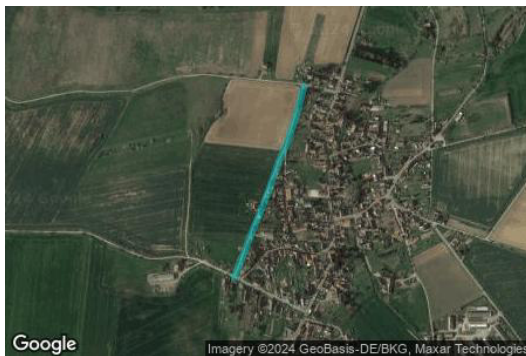
Die statische Ausrichtung nach Osten (-55°) verursacht laut Simulation nach den genannten Korrekturen die in der Tabelle 7 aufgelisteten Reflexionsdauern. Werte, welche eine kritische Blendung im Verkehr betreffen, sind in Rot dargestellt. Die Straßen ohne Reflexionen sind nicht in der Tabelle aufgelistet. Die

so simulierte Blenddauer stellt das Höchstmaß potenzieller Blendung dar, welche ohne Bewölkung auftritt.

Tabelle 7: Simulationsergebnisse nach Filterung der Ergebnisse

Immissionsort	Potenzielle Blenddauer in Stunden über ein Jahr	Längste potenzielle tägliche Blenddauer in Minuten
Gebind	51	23
Kreisstraße 13	175	47
Kattenlager	3	3
L2292	54	30

Gebind



Die Ergebnisse der Simulation für diese Straße sind in Abbildung 23 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 23.01. bis zum 16.11. von 11:45 Uhr bis 13:05 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 207° - 237° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 23 Minuten erreicht.

Der betroffene Streckenabschnitt und die möglichen Immissionswinkel sind in Abbildung 24 dargestellt. Da diese Reflexionen im zentralen Sichtfeld liegen, kann eine potenzielle Sichtbeeinträchtigung für die Verkehrsteilnehmer nicht ausgeschlossen werden. Es sind daher **Blendschutzmaßnahmen empfohlen**.

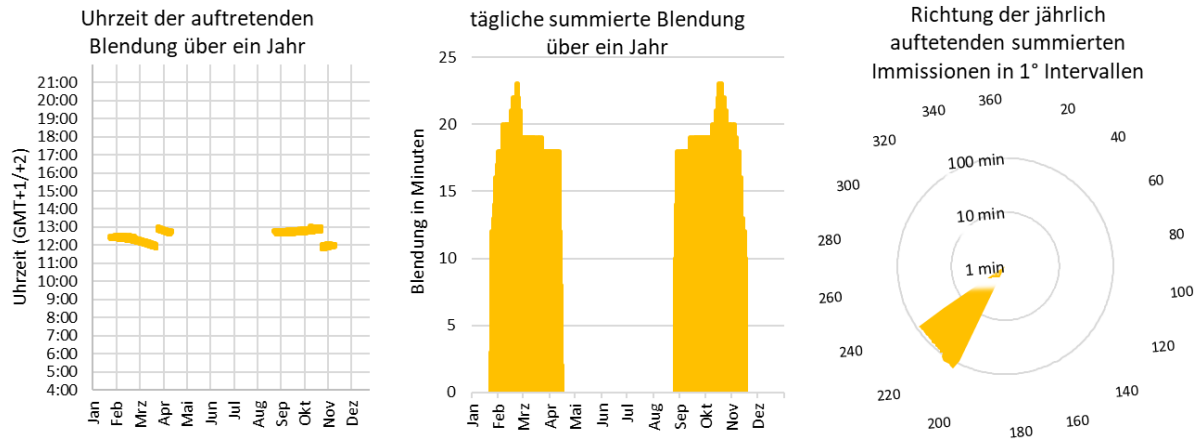
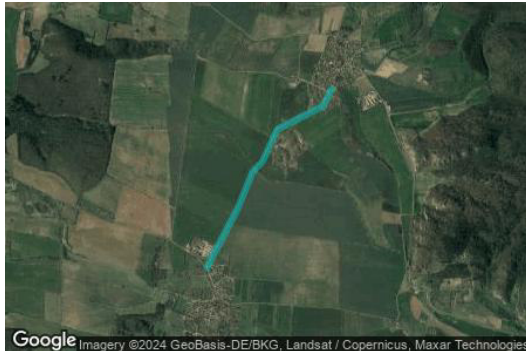


Abbildung 23: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung



Abbildung 24: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange

Kreisstraße 13



Die Ergebnisse der Simulation für diese Straße sind in Abbildung 25 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 20.01. bis zum 19.11. von 11:36 Uhr bis 13:17 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 206° - 252° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 47 Minuten erreicht.

Der betroffene Streckenabschnitt und die möglichen Immissionswinkel sind in Abbildung 26 dargestellt. Da diese Reflexionen im zentralen Sichtfeld liegen, kann eine potenzielle Sichtbeeinträchtigung für die Verkehrsteilnehmer nicht ausgeschlossen werden. Es sind daher **Blendschutzmaßnahmen empfohlen**.

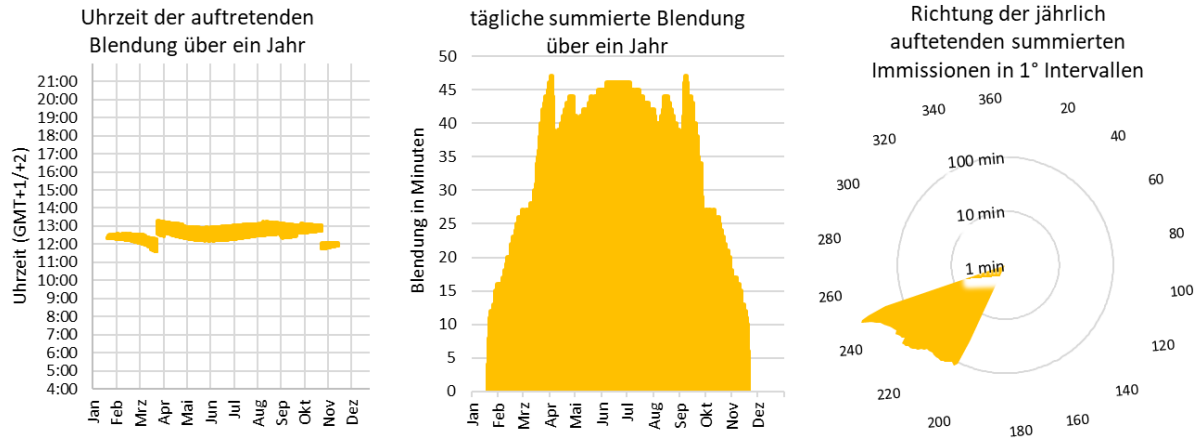


Abbildung 25: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung

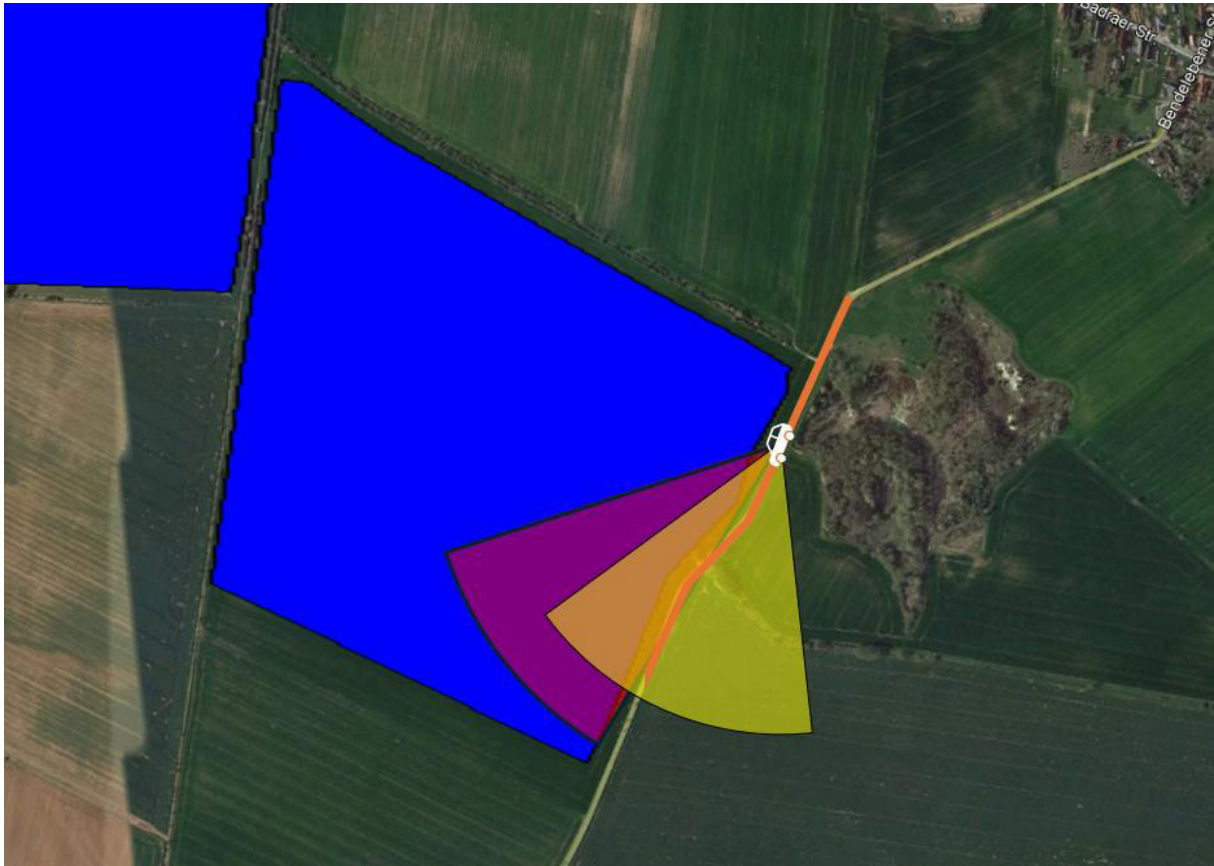
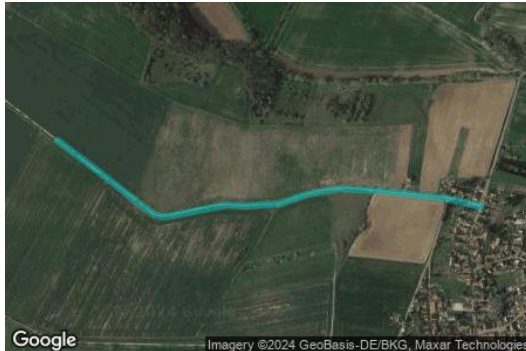


Abbildung 26: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange

Kattenlager



Die Ergebnisse der Simulation für diese Straße sind in Abbildung 27 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 05.05. bis zum 07.08. von 11:10 Uhr bis 11:27 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 241° - 249° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 3 Minuten erreicht.

Der betroffene Streckenabschnitt und die möglichen Immissionswinkel sind in Abbildung 28 dargestellt. Da diese Reflexionen im zentralen Sichtfeld liegen, kann eine potenzielle Sichtbeeinträchtigung für die Verkehrsteilnehmer nicht ausgeschlossen werden. Es sind daher **Blendschutzmaßnahmen empfohlen**.

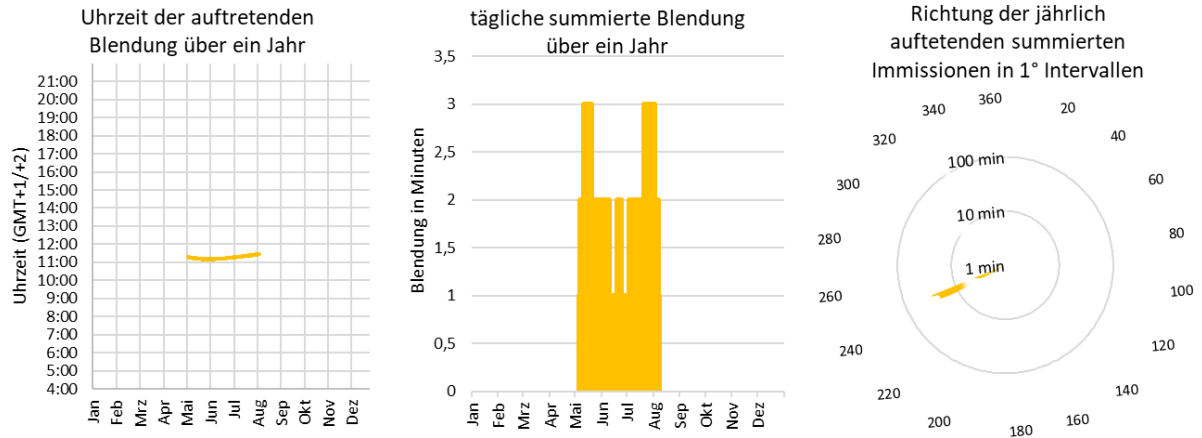


Abbildung 27: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung



Abbildung 28: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange

L2292



Die Ergebnisse der Simulation für diese Straße sind in Abbildung 29 dargestellt. Potenzielle Blendung tritt demnach vom 18.04. bis zum 23.08. von 11:55 Uhr bis 12:42 Uhr mit Immissionswinkeln zwischen 239° - 254° auf. Es werden tägliche potenzielle Blenddauern bis 30 Minuten erreicht.

Der betroffene Streckenabschnitt und die möglichen Immissionswinkel sind in Abbildung 30 dargestellt. Da diese Reflexionen im zentralen Sichtfeld liegen, kann eine potenzielle Sichtbeeinträchtigung für die Verkehrsteilnehmer nicht ausgeschlossen werden. Es sind daher **Blendschutzmaßnahmen empfohlen**.

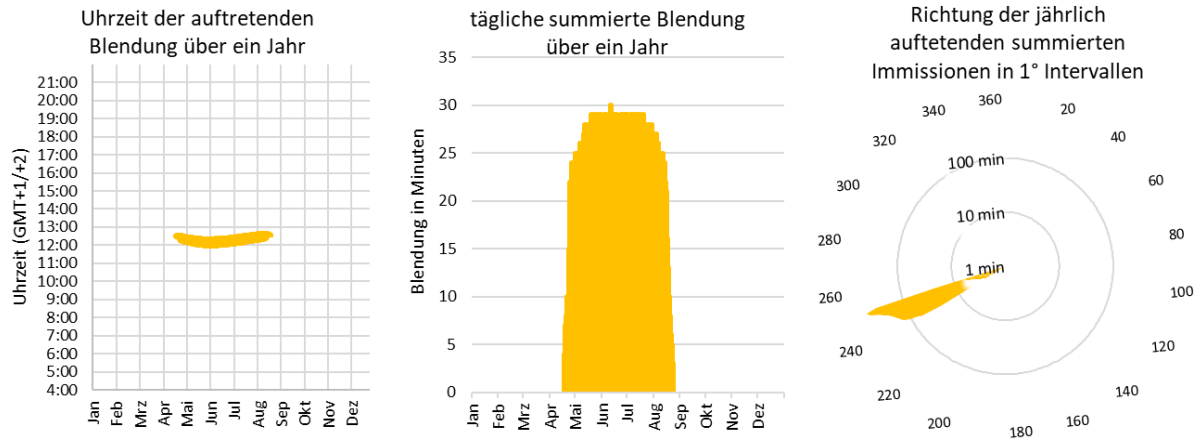


Abbildung 29: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung



Abbildung 30: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange

8 Blendschutzmaßnahmen

Es werden nachfolgend Blendschutzmaßnahmen vorgeschlagen, mit welchen sich Reflexionen im relevanten Sichtbereich der Verkehrsteilnehmer vermeiden lassen. Es handelt sich lediglich um Vorschläge, auch andere Arten von Blendschutzmaßnahmen können zielführend sein.

Nach Fertigstellung der Agri-PV Anlage kann die Wirksamkeit der Blendschutzmaßnahmen stichprobenartig, ohne die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu beeinträchtigen, überprüft werden. Nach Rücksprache mit dem Gutachter können die Blendschutzmaßnahmen angepasst und für Teilflächen abweichend programmiert werden, wenn eine Gefährdung der Verkehrssicherheit auch mit modifizierten Blendschutzmaßnahmen vermieden wird.

8.1 Blendschutzmaßnahmen für den Betrieb ohne Bewirtschaftung

Um Reflexionen auf den Verkehr in Fahrtrichtung Nordwesten auf dem Barbarossaweg / Mühlen zu vermeiden, wird eine Änderung des minimalen Winkels beim Backtracking (auf Englisch „rest angle“) von 0° auf $+1^\circ$ empfohlen. Mit einem $+1^\circ$ „rest angle“ und die große Entfernung zwischen PVA und Immissionsorte werden laut Simulation die Reflexionen komplett vermieden. (Die Zeiten in Abbildung 19 sind in GMT+1 angegeben. Im Sommer in Deutschland sind die Zeiten GMT+2, so dass gegen 20 Uhr die Modulneigung beim „rest angle“ liegt.)

8.2 Blendschutzmaßnahmen für die Bewirtschaftung

Das Kippen der Modulreihen nach Westen ($+55^\circ$) stellt nie eine Gefahr dar.

Das Kippen der Modulreihen nach Osten (-55°) stellt laut Simulation (mit zusätzlichen Simulationen für die Modulober- und unterkanten) in den Zeiten vom 20.01. bis zum 21.11. von 11:33 Uhr bis 13:29 Uhr eine potenzielle Gefahr dar. **In diesen Zeiten** sollten die Modulreihen nicht maximal nach Osten (-55°) sondern nur leicht nach Osten (-20°) gekippt werden, um eine potenzielle Gefährdung der Verkehrssicherheit zu vermeiden. **In allen anderen Zeiten** müssen für die Bewirtschaftung die Modulreihen maximal nach Osten (-55°) gekippt werden.

9 Zusammenfassung

Die mögliche Blendung durch Sonnenreflexion an den PV-Modulen der geplanten PV-Anlage Bendeleben für den Verkehr auf den angrenzenden Straßen und für die umliegenden schutzwürdigen Orte wurde untersucht. Die Wirtschaftswege wurden nicht betrachtet.

Die Simulation geht von einem ordnungsgemäßen Betrieb des Nachführmechanismus der Trackeranlage aus. Das Verhalten des Nachführmechanismus bei hohen Windgeschwindigkeiten (sogenannter „wind speed protection mode“) wurde nicht berücksichtigt.

Gebäude: Das Gutachten kommt zu dem Schluss, dass es auf Basis der Strahlengeometrie außerhalb der Bewirtschaftung zu keinen Reflexionen auf die umliegenden schutzwürdigen Orte (Wohngebäude, Gärten, Bauernhöfe und die Gaststätte Barbarossahöhle) kommt. Die Dauern der Reflexionen während der Bewirtschaftung werden zu keiner Beeinträchtigung der Anwohner bzw. der Mitarbeiter führen.

Straßen außerhalb der Bewirtschaftung: Unter den angrenzenden Straßen treten potenziell sichtbeeinträchtigende Reflexionen auf den Barbarossaweg / Mühlen. Als Blendschutzmaßnahme wird empfohlen, den minimalen Winkel beim Backtracking (auf Englisch „rest angle“) von 0° auf +1° (nach Westen) anzupassen. Mit dieser Anpassung treten keine Reflexionen mehr auf die Straßen.

Straßen während der Bewirtschaftung: Das Kippen der Modulreihen mit dem maximalen Winkel nach Osten (-55°) kann Mitte des Tages zu potenziellen Reflexionen auf die Verkehrsbeteiligten führen. Es wird empfohlen, für die Bewirtschaftung Mitte des Tages die Modulreihen nur mit dem Winkel -20° zu kippen. (Details zu den genauen Jahreszeiten und Uhrzeiten sind im Kapitel 8.2 zu finden.)

10 Literaturverzeichnis

- [1] J. Trempler, *Optische Eigenschaften*, Carl Hanser Verlag, 2015.
- [2] J. Yellowhair und C. K. Ho, *Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts*, Proceedings of the ASME 2015 9th International Conference on Energy Sustainability, 2015.
- [3] C. Bucher, <https://www.bulletin.ch/de/news-detail/reflexionen-an-photovoltaikanlagen.html>, 2021.
- [4] P. Warthmann, <https://www.gebaeudetechnik.ch/gebaeudehuelle/photovoltaikanlage/sandstrahl-atelier-loest-blendproblem>, 2021.
- [5] P. R. Boyce, *Human Factors in Lightning*, CRC Press, 2014.
- [6] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg als Vorsitzland der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), *Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI)*, 2012.
- [7] Länderausschuss für Immissionsschutz, *Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immission von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise)*, 2002.
- [8] OVE (Österreichischer Verband für Elektrotechnik), *Blendung durch Photovoltaikanlagen*, Wien, 2016.
- [9] Federal Aviation Administration, *Interim Policy, FAA Review of Solar Energy System Projects on Federally Obligated Airports*, Federal Register, 2013.
- [10] C. Schierz, *Über die Blendbewertung von reflektierendem Sonnenlicht bei Solaranlagen*, TU Ilmenau, FG Lichttechnik, 2012.
- [11] ForgeSolar, <https://www.forgesolar.com/help/#assumptions>.
- [12] European Union Aviation Safety Agency, *Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design (CS-ADR-DSN, Issue 6)*, 2022.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Topologie (orange Höhenlinien) des Geländes (Quelle: Auftraggeber).....	4
Abbildung 2: Vor-Ort Aufnahme der Topologie (Quelle: Auftraggeber)	4
Abbildung 3: Modulflächen der geplanten PVA in Blau und Umgebung (Quelle: Google Earth).....	5
Abbildung 4: Modulbelegungsplan (Quelle: Auftraggeber)	7
Abbildung 5: Zeichnung der Unterkonstruktion (Quelle: Auftraggeber)	7
Abbildung 6: Reflexion eines Lichtstrahls.....	8
Abbildung 7: (a) gerichtete Reflexion, (b) reale Reflexion, (c) ideale diffuse Reflexion [1]	8
Abbildung 8: Standardabweichung um Maximum einer Normalverteilung	9
Abbildung 9: Messung der Oberflächenstruktur und Aufnahmen der Reflexion an Solarmodulen mit verschiedener Frontglas-Strukturierung, links: glattes Floatglas, mitte: leicht strukturiert mit Anti-Reflexionsschicht, rechts: tief strukturiert [2]	9
Abbildung 10: links: Module mit satinierte Folie [3], rechts: nachträglich sandgestrahltes Modul [4].....	10
Abbildung 11 Reflexionsgrad über Einfallswinkel für verschiedene Modultypen [2]	10
Abbildung 12: Wahrnehmungsbereiche von Objekthelligkeiten in Abhängigkeit der Helligkeitsadaption des Auges [5]	11
Abbildung 13: Einstufung des Blendpotenzials hinsichtlich der Sichtbeeinträchtigung [11]	14
Abbildung 14: Anlage (blaue Flächen), umliegende Straßen (hellblaue Linien) und Topologie des Geländes (orange Linien) in der Simulationssoftware ForgeSolar	15
Abbildung 15: Anlage (blaue Flächen), umliegende schutzwürdige Orte (rote Punkte) und Topologie des Geländes (orange Linien) in der Simulationssoftware ForgeSolar.....	16
Abbildung 16: Sichtbarkeitsanalyse (Quelle: Auftraggeber).....	18
Abbildung 17: Topologie des Geländes (Quelle: ForgeSolar).....	23
Abbildung 18: Winkel des Backtracking-Systems am 1. Januar (Quelle: ForgeSolar) (Uhrzeiten: GMT+1)	25
Abbildung 19: Winkel des Backtracking-Systems am 21. Juni (Quelle: ForgeSolar) (Uhrzeiten: GMT+1)	25
Abbildung 20: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung	27
Abbildung 21: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, Immissionswinkel in Rot für zwei Positionen auf dem Barbarossaweg / Mühlen (Quelle: ForgeSolar).....	27
Abbildung 22: Exemplarische Darstellung des Bewirtschaftungsmodus (Quelle: Auftraggeber und Hersteller Baywa r.e.).....	28
Abbildung 23: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung	31
Abbildung 24: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange	31
Abbildung 25: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung	32



Abbildung 26: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange	33
Abbildung 27: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung	34
Abbildung 28: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange	35
Abbildung 29: Zeitraum und Richtung der potenziellen Blendung	36
Abbildung 30: Sichtfeld der Verkehrsbeteiligten in Gelb, potenzielle Immissionswinkel in Rot, betroffener Streckenabschnitt in Orange	36

12 Gewährleistung

Unsere Fachgutachten werden nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Die Messungen, Bewertungen, Berechnungen und Simulationen werden entsprechend dem Stand der Wissenschaft und Technik und den anerkannten Regeln der Technik mit größtmöglicher Sorgfalt vorgenommen.

Die Fachgutachten erfolgen auf Basis der vom Auftraggeber übermittelten Informationen und Planungsunterlagen. Diese werden einer fachkritischen Wertung unterzogen. Die Informationen zu den technischen Parametern der einzelnen Komponenten werden soweit möglich mit Herstellerangaben abgeglichen. Dabei wird die Eignung der Komponenten anhand der entsprechenden Zertifikate oder anderer Nachweise geprüft. Der Gutachter unterstellt dabei, dass die für die Komponenten geltenden anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden. Für Fehlangaben des Auftraggebers sowie modellbedingte Abweichungen hat der Gutachter nicht einzustehen. Die in den Fachgutachten verwendeten Messungen sind mit Messunsicherheiten behaftet. Die Bewertungen anhand von Berechnungen sind mit Unsicherheiten in der Modellierung verbunden. Somit können Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Werten zu den tatsächlichen Werten nicht ausgeschlossen werden. Der Gutachter ist bestrebt, die Abweichungen gering zu halten.

Für einfache und grobe Fahrlässigkeit gilt eine Haftungsbegrenzung auf folgende Beträge:

1. Die Haftung für einfache Fahrlässigkeit ist auf einen Betrag von 100.000 € beschränkt.
2. Die Haftung für alle sonstigen Fälle der Fahrlässigkeit ist auf einen Betrag von 200.000 € begrenzt.
3. Die Haftung für Schäden aus der Verletzung des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit wird durch die vereinbarten Haftungsbegrenzungen nicht berührt. Das gleiche gilt für die Haftung wegen Vorsatz.

13 Vorbehaltsklausel für die Veröffentlichung des Gutachtens

Der Auftraggeber ist nicht berechtigt, das Gutachten ohne die ausdrückliche schriftliche Zustimmung des Auftragnehmers an Dritte weiterzugeben oder zu veröffentlichen, mit Ausnahme der Weitergabe an dafür vorgesehene Behörden. Eine Veröffentlichung im Internet oder die Weitergabe an andere Dritte muss schriftlich angefragt werden. Es ist wichtig, dass alle Parteien die vertraglichen Vereinbarungen respektieren, um rechtliche Konflikte zu vermeiden.