

Blendgutachten PV-Anlage Wulkow

Analyse der Reflexionswirkungen einer Photovoltaikanlage

Auftraggeber:

Enerparc AG
Kirchenpauerstr. 26
20457 Hamburg

erstellt von:

Santhosh Ratnasabapathy
Solarpraxis Engineering GmbH
Alboinstraße 36-42
12103 Berlin Germany
Tel. 030/ 726 296-399
E-Mail: santhosh.ratnasabapathy@solarpraxis.com
Internet: www.solarpraxis.com



Datum: 04.10.2024

Berichtsnummer: P240081-01



Inhalt

1	Zweck und Gegenstand des Gutachtens	4
2	Zusammenfassung der Bewertung	5
3	Einleitung	6
3.1	<i>Gesetzlicher und regulatorischer Rahmen</i>	6
3.1.1	Nutzung erneuerbarer Energien in Raumordnung und Baurecht	6
3.1.2	Immissionsschutz	7
3.1.3	Straßenverkehrsgesetze	7
3.1.4	Richtlinien der FGSV	7
3.2	<i>Sonnenlichtreflexionen an Photovoltaikanlagen</i>	8
3.3	Bewertung der Blendwirkung von Sonnenlichtreflexionen	9
3.3.1	Immissionsschutz (Wohn- und Arbeitsbereich)	9
3.3.2	Verkehrssicherheit	9
4	Berechnungsmethodik	11
4.1	Verwendete Azimut-Winkelangaben	11
4.2	Berechnung der Reflexionsrichtungen	11
4.3	Berechnung der Beleuchtungsstärken	13
4.4	Modellierung der Reflexions- und Blickpunkte	13
4.5	Ergebnisdarstellung durch Reflexionsdiagramme	13
4.5.1	Straßen- und Schienenverkehr	13
4.5.2	Schützenswerte Nutzungen	14
5	Situation vor Ort	16
5.1	PV-Anlage	16
5.2	Potenzielle Blendrichtungen	17
5.3	Zu prüfende Immissionsorte	18
6	Berechnungsergebnisse	20
6.1	Schienenverkehr auf der Bahnstrecke	20
6.2	Straßenverkehr auf der Landesstraße L 383	21
6.2.1	Blickpunkt VKvSüd_01	21
6.2.2	Blickpunkt VKvSüd_02	22



7	Bewertung der Blendrisiken	24
8	Verwendete Materialien	25
8.1	Dokumente vom Auftraggeber	25
8.2	Literatur	25
9	Abbildungsverzeichnis.....	26
10	Tabellenverzeichnis	27



1 Zweck und Gegenstand des Gutachtens

Es ist zu prüfen, ob von den PV-Modulen der im Ort Wulkow bei Booßen im Landkreis Märkisch-Oderland in Brandenburg geplanten Photovoltaik-Freiflächenanlage Sonnenlicht auf Verkehrswege reflektiert werden kann und ob dadurch die Sicherheit des Straßen- und Schienenverkehrs beeinträchtigende Blendwirkungen auftreten können. Die Lage der geplanten PV-Anlage ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Analyse erfolgt auf Basis der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Daten und Fotos.

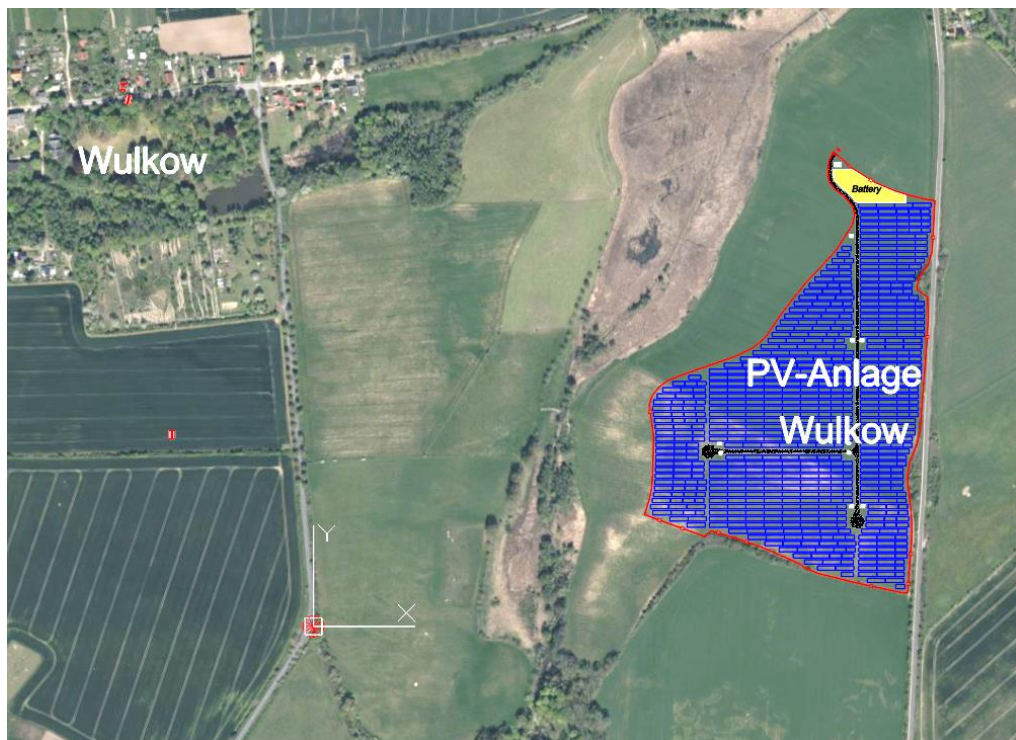


Abbildung 1: Lage der geplanten PV-Anlage (PV-Modultischreihen blau eingezeichnet)



2 Zusammenfassung der Bewertung

Es wird festgestellt, dass der Schienenverkehr auf der Bahnlinie 6156 Werbig – Frankfurt (Oder) jederzeit frei von relevanten Blendungen durch Sonnenlichtreflexionen der geplanten PV-Anlage bleibt.

Ebenso wird festgestellt, dass auch der Straßenverkehr auf der Landesstraße L 383 jederzeit frei von relevanten Blendungen durch Sonnenlichtreflexionen der geplanten PV-Anlage bleibt.

Die Sicherheit des Schienen- und Straßenverkehrs bleibt jederzeit gewahrt. Es sind keine zusätzlichen Blendschutzmaßnahmen erforderlich.

Aus blendgutachterlicher Sicht ist die PV-Anlage Wulkow bei Booßen als genehmigungsfähig einzustufen.



3 Einleitung

Der vorliegende Bericht enthält vertrauliche Informationen. Der Bericht dient nur zur Vorlage bei den finanzierenden Banken, beim Errichter der Anlage bzw. dessen Rechtsnachfolger, beim Auftraggeber sowie zur Klärung genehmigungsrechtlicher Fragen bei den entsprechenden Behörden. Darunter fällt auch die Weitergabe des Berichts als Bestandteil des Bebauungsplanes (B-Plan) durch die Gemeinde an berechnigte Interessenten nach dem Informationsfreiheitsgesetz. Eine Weitergabe an sonstige Dritte oder eine Veröffentlichung des Berichtes unabhängig vom B-Plan als Ganzes oder in Teilen ist nur in Absprache mit der Solarpraxis Engineering GmbH zulässig.

3.1 Gesetzlicher und regulatorischer Rahmen

3.1.1 Nutzung erneuerbarer Energien in Raumordnung und Baurecht

Die Ziele der Raumordnung der Bundesrepublik Deutschland liegen in der Sicherung der nachhaltigen Daseinsvorsorge, der Unterstützung von nachhaltigem Wirtschaftswachstum und Innovation, der Sicherung von Entwicklungspotenzialen und dem nachhaltigen Ressourcenschutz. Das Raumordnungsgesetz (ROG) in der seit Februar 2023 wirksamen Fassung beruht u. a. auf dem Grundsatz, den „räumlichen Erfordernissen für eine kostengünstige, sichere und umweltverträgliche Energieversorgung [...] Rechnung zu tragen.“

Das Baugesetzbuch (BauGB) gibt den Rahmen für die Bauleitplanung vor. Bauleitpläne im Sinne des Gesetzes sind nach § 1 Abs. 2 „der Flächennutzungsplan (vorbereitender Bauleitplan) und der Bebauungsplan (verbindlicher Bauleitplan)“. Das Baugesetzbuch (BauGB) definiert die Nutzung erneuerbarer Energien als öffentlichen Belang, der bei der Aufstellung der Bauleitpläne zu berücksichtigen sei. Mit dem Gesetz zur sofortigen Verbesserung der Rahmenbedingungen für die erneuerbaren Energien vom 4. Januar 2023 werden bestimmte Solaranlagen in die Liste der privilegierten Vorhaben des § 35 Abs. 1 BauGB aufgenommen:

- ▶ Solaranlagen in, an und auf Dach- und Außenwandflächen von zulässigerweise genutzten Gebäuden, wenn die Anlage dem Gebäude baulich untergeordnet ist
- ▶ Solaranlagen auf einer Fläche längs von Autobahnen oder Schienenwegen des übergeordneten Netzes im Sinne des § 2b des Allgemeinen Eisenbahngesetzes mit mindestens zwei Hauptgleisen und in einer Entfernung zu diesen von bis zu 200 Metern, gemessen vom äußeren Rand der Fahrbahn
- ▶ Solaranlagen bis zu einer Größe von 25.000 m² im Rahmen eines landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betriebs

Durch die Privilegierung steht eine bloße Beeinträchtigung öffentlicher Belange dem Vorhaben nicht mehr entgegen und die Realisierung des Vorhabens wird in der Schutzgüterabwägung gegenüber anderen öffentlichen Belangen gestärkt. Durch die Zuweisung eines überragenden öffentlichen Interesses an der Errichtung und dem Betrieb von Erneuerbare-Energien-Anlagen im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2023) setzen sich diese in der Regel gegen andere öffentliche Belange durch.

Die Privilegierung von Solaranlagen entlang von Autobahnen und Schienenwegen führt auch zu einer Beschleunigung des Genehmigungsverfahrens. Im Regelfall ist keine zeitaufwändige Bauleitplanung mehr



erforderlich. Es kann direkt ein Bauantrag gestellt werden, dessen Bewilligung nicht mehr von der Zustimmung des Gemeinderats abhängt. Bei Genehmigungsfähigkeit der Anlage besteht ein Anspruch auf Erteilung der Baugenehmigung. Zur Beurteilung der Genehmigungsfähigkeit fordern die stellungnehmenden Autobahn- und Schienenwegbetreiber im Regelfall ein Blendgutachten ein.

3.1.2 Immissionsschutz

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) soll den Menschen, die natürliche Umwelt sowie Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen, darunter auch Lichtimmissionen, schützen und deren Entstehung vorbeugen. Nach den Vorschriften des BImSchG sind sowohl genehmigungspflichtige als auch nicht genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen, sonstige Gefahren sowie erhebliche Nachteile und Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft vermieden werden.

Derzeit gibt es keine die Errichtung und den Betrieb von Photovoltaikanlagen regelnde Immissionsschutz-Verordnung. Diese Aufgabe übernimmt die „zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen“ (LAI-Richtlinie) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz, einem Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz. Die LAI-Richtlinie gibt im Anhang 2 (Stand 3.11.2015) Empfehlungen zur Ermittlung, Beurteilung und Minderung der Blendwirkung von großflächigen Freiflächen-Photovoltaikanlagen im Rahmen von Baugenehmigungsverfahren.

3.1.3 Straßenverkehrsgesetze

Das Straßenverkehrsrecht ist ein Sicherheitsrecht und darauf ausgerichtet, die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten (§ 6 Abs. 1 StVG). Es dient dem Zweck, die spezifischen Gefahren, Behinderungen und Belästigungen auszuschalten oder wenigstens zu mindern, die mit der Straßenbenutzung verbunden sind und liefert damit die Bewertungsgrundlage für Blendrisiken im Straßenverkehr. Im Bundesfernstraßengesetz (FstrG) regelt §9 Absatz 3, dass die Zustimmung für Baugenehmigungen entlang der Verkehrswege außerhalb der Anbauverbotszonen nur versagt werden darf, wenn die Sicherheit oder Leichtigkeit des Verkehrs dadurch beeinträchtigt wird.

3.1.4 Richtlinien der FGSV

Die Richtlinien für die Anlage von Land- und Stadtstraße der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) sind technische Regelwerke, die unter anderem die Anforderungen an freizuhaltende Sichtfelder im Verkehrswesen regeln.



3.2 Sonnenlichtreflexionen an Photovoltaikanlagen

Auf Grund der großen reflektierenden Fläche kann das von den Deckgläsern der PV-Module reflektierte Sonnenlicht eine Blendung von Anwohnern und Verkehrsteilnehmern bewirken. Da die Leuchtdichte der Sonne bei klarer Sicht bereits kurz über dem Horizont mehr als 10^6 cd/m^2 beträgt, muss auch bei den geringen Reflexionsgraden von Solarmodulen mit dem Eintritt von Blendungserscheinungen bei Beobachtern gerechnet werden. Bei typischen Freiflächen-Photovoltaikanlagen werden die PV-Module auf Tischreihen mit einer festen Azimutausrichtung von Süd bis Ost/West und einem starren Neigungswinkel zwischen 10° und 25° errichtet. In Abhängigkeit von der Topografie des Baufelds und der Umgebung können meistens nur morgens und abends Reflexionen mit geringen Höhenwinkeln auf die Augen von Verkehrsteilnehmer gerichtet sein. Die Sonne steht dabei gleichzeitig auf einer geringen Höhe mit einem geringen horizontalen Versatz über der reflektierenden Fläche. Das reflektierte Sonnenlicht hat eine um mindestens eine Zehnerpotenz geringere Intensität als das direkte Sonnenlicht.

Für Deckgläser von PV-Modulen wird ein spezielles Glas mit hohem Transmissionsgrad verwendet. Mit zunehmendem Einfallswinkel der Sonnenstrahlen sinkt die Transmission und die Reflexion am Glas steigt an. Dies hat nach heutigem Stand der Technik zur Folge, dass bei senkrechter Einstrahlung weniger als 9 % des gesamten eingestrahlt sichtbaren Lichtes reflektiert wird, während bei einem Einfallswinkel von 65° ca. 20 % der auftretenden Strahlung reflektiert wird. Abbildung 2 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel der Sonnenstrahlen und der Transmission des Lichts durch das Glas.

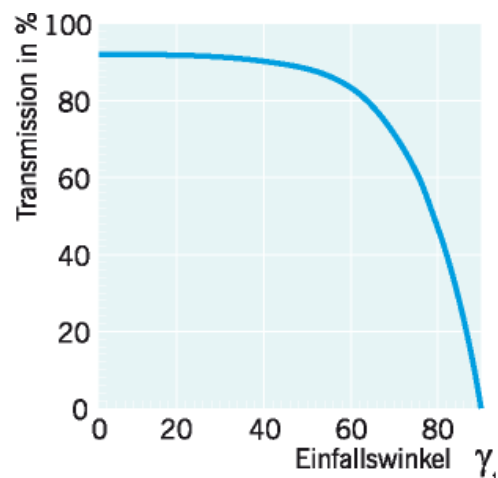


Abbildung 2: Auswirkung des Einfallswinkels auf den Transmissionsgrad für Modulgläser

Antireflexbeschichtungen von Solarmodulen entfalten ihre größte Wirksamkeit bei senkrechtem Lichteinfall. Bei flacheren Einfallswinkeln sinkt die reflexionsmindernde Wirkung, so dass sie bei den potenziell blendwirksamen Reflexionen mit flachen Einfallswinkeln zur reflektierenden Ebene den gewünschten Blendschutz in der Regel nicht erreichen.



3.3 Bewertung der Blendwirkung von Sonnenlichtreflexionen

3.3.1 Immissionsschutz (Wohn- und Arbeitsbereich)

Die „Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), im folgenden LAI-Richtlinie genannt, definiert schutzwürdige Räume und Flächen und beschreibt eine Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der astronomisch maximal möglichen Immissionszeiträume unter der Annahme einer punktförmigen Sonne und ideal gerichteter Reflexion. Aufgrund der Größe der Sonnenscheibe mit einem Durchmesser von $0,56^\circ$ können real auftretende Reflexionen etwas länger andauern, als die schematische Berechnung ergibt.

Hinsichtlich der Beurteilung sieht die LAI-Richtlinie einen Anhaltspunkt für eine erhebliche Belästigung im Sinne des BImSchG, wenn die berechneten Immissionszeiten bei mindestens 30 min/d oder 30 h/a liegen. Dabei sind nur Immissionszeiten zu berücksichtigen, in denen sich die Blickrichtung zur Sonne und die auf das reflektierende Modul um $\geq 10^\circ$ unterscheiden. Die Richtlinie schränkt den Wertungsmaßstab insofern ein, dass damit nur ein erster Anhaltspunkt für die Beurteilung gegeben wird, dessen Übertragbarkeit im Einzelfall begründet werden muss. Begründete abweichende Bewertungen sind ausdrücklich zulässig.

In der Rechtsprechung wird die Zumutbarkeit von Lichtimmissionen nach der durch die Gebietsart und die tatsächlichen Verhältnisse zu bestimmenden Schutzwürdigkeit und Schutzbedürftigkeit der betroffenen Nachbarschaft beurteilt, wobei wertende Elemente wie Herkömmlichkeit, soziale Adäquanz und allgemeine Akzeptanz einzubeziehen sind. Zeitdauern von bis zu einer Stunde werden keinesfalls grundsätzlich als unzumutbar angesehen (LG Frankfurt / Main 2/12 O 322/06; OLG Stuttgart 3 U 46/13). Die Zuweisung eines überragenden öffentlichen Interesses an der Errichtung und dem Betrieb von Erneuerbare-Energien-Anlagen im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2023) ist in der veröffentlichten Rechtsprechung bislang nicht berücksichtigt.

3.3.2 Verkehrssicherheit

Zur Bewertung von Blendungen im Straßenverkehr unter Tageslichtbedingungen ist der Bereich des fovealen Sehens im zentralen Blickfeld als besonders kritisch anzusehen. Dieser Bereich wird durch unbewusste Augenbewegungen (Sakkaden) und Fixationen des Blicks aufgespannt. Einflussfaktoren auf die Größe dieses Bereichs sind bspw. die Geschwindigkeit, der Straßenverlauf und die Verkehrssituation. Für Sehaufgaben im Straßen- und Schienenverkehr umfasst das zentrale Blickfeld allgemein den Bereich mit einem horizontalen Differenzwinkel zur Blickachse (= Hauptblickrichtung) von $\leq 10^\circ$. Der vertikale Differenzwinkel beträgt im Allgemeinen weniger als 3° und kann im Rahmen der Betrachtung vernachlässigt werden. An Knotenpunkten und für spezielle Fahrsituationen kann eine abweichende Festlegung des zentralen Blickfelds notwendig sein. Zur Bewertung der potenziellen Blendwirkung der Reflexionen sind neben der Beleuchtungsstärke der Reflexionsstrahlen am Auge auch die Sichtbarkeit und Position der Sonne zu berücksichtigen.

Zusätzlich ist für die Bewertung von Blendrisiken der Bereich des peripheren Sehens zu berücksichtigen, in dem Umgebungsinformationen aufgenommen werden. Das periphere Sehen dient der Orientierung (z.B. Spurhalten) sowie der Wahrnehmung von Veränderungen in der Umgebung (Bewegung, Leuchtdichteunterschiede), die als Distraktoren eine Blickzuwendung auslösen können. Für das periphere Blickfeld ist ein horizontaler Differenzwinkelbereich zur Blickachse von bis zu 30° anzusetzen.



Bei einer Fixation der Augen auf eine Blendquelle mit einer Leuchtdichte von mehr als ca. 10^5 cd/m^2 tritt eine Absolutblendung auf. Dabei wird die Anpassungsfähigkeit des Auges an die Helligkeit überschritten, und es setzen Schutzmechanismen ein, die zu einer Beeinträchtigung der Verkehrstüchtigkeit führen. Dies kann im Straßenverkehr nur im zentralen Blickfeld beim direkten Blick auf die reflektierenden Moduloberflächen geschehen. Haupteinflussfaktoren auf die Absolutblendung sind die Leuchtdichte der Blendquelle und die Dauer des Blicks in die Blendquelle.

Im Rahmen der Verkehrssicherheit kommt es vor allem auf die Relativblendung an, bei der gerichtete Lichtstrahlen durch Streueffekte des Augenapparats eine sogenannte äquivalente Schleierleuchtdichte auf der Netzhaut induzieren, die eine Einschränkung der Sehleistung vor allem durch eine Kontrastminderung und die Ablenkung von der Sehaufgabe hervorruft. Eine weitere Ursache für eine Relativblendung der Fahrzeugführenden kann ein abrupter Anstieg der Helligkeit sein, bei dem sich die Augen nicht schnell genug an die veränderte Umgebungsleuchtdichte anpassen können.

Für die Bewertung einer Relativblendung sind entsprechend der Formeln zur Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte der Differenzwinkel der Reflexionen zur Blickachse und deren Beleuchtungsstärke am Auge heranzuziehen, sowie die Sichtbarkeit und Position der Sonne zu berücksichtigen. Die Sonnenhöhe dient als Maß für die Umgebungshelligkeit und damit auch für den Adaptionzustand der Augen. In vielen Situationen steht die Sonne so nah an der reflektierenden Fläche, dass diese überstrahlt wird und keine eigenständige Blendwirkung verursachen kann.

Bei einem horizontalen Differenzwinkel von bis zu 20° zur Blickachse ist auch die Dauer des Reflexionsgeschehens zu berücksichtigen. Eine Blendsituation, die mehrere Sekunden dauert, kann zu Schutzreaktionen führen, die die Erfüllung der Sehaufgabe beeinträchtigen, während eine kurzfristige Relativblendung keinen Einfluss auf deren Erfüllung durch die Fahrzeugführenden hat. Wahrnehmbare Reflexionen außerhalb von $\pm 30^\circ$ sind als unerheblich zu bewerten.



4 Berechnungsmethodik

4.1 Verwendete Azimut-Winkelangaben

Für die Ausrichtung der PV-Module, in den Reflexionsdiagrammen und bei der Beschreibung von Blickrichtungen wird die geodätische Azimutangabe verwendet: Norden = 0°, Osten = 90°, Süden = 180° und Westen = 270°.

4.2 Berechnung der Reflexionsrichtungen

Für die Reflexionsberechnungen wird der im Regelfall in einem UTM-Koordinatensystem erstellte Belegungsplan der geplanten Solaranlage auf eine nach geographisch Nord ausgerichtete Karte mit einem Koordinatensystem in winkeltreuer Lambert-Kegelprojektion übertragen und zum Ausgleich der Meridiankonvergenz gedreht. Auf dieser Plangrundlage werden die Azimutausrichtung und die Neigung der Module unter Berücksichtigung etwaiger Querneigungen bestimmt.

Anschließend werden die Reflexionsrichtungen nach dem Reflexionsgesetz für ideal gerichtete Reflexion (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) unter Annahme einer punktförmigen Sonne berechnet. Die Reflexionsberechnung erfolgt mit den Sonneneinfallswinkeln am Standort der Anlage in 6-minütiger Auflösung für 12 Tage im Jahr (jeweils für den 21. jeden Monats)¹. Sie liefert den Azimut und den Höhenwinkel des von der reflektierenden Fläche ausgehenden Lichtstrahls. Die Reflexionsrichtungen werden mit dem Azimut als x-Wert und Höhenwinkel als y-Wert anschaulich in einem Reflexionsdiagramm dargestellt. Abbildung 3 zeigt die geometrischen Beziehungen einschließlich des Abstandswinkels zwischen den Blickrichtungen zur Sonne und zum Reflexionspunkt.

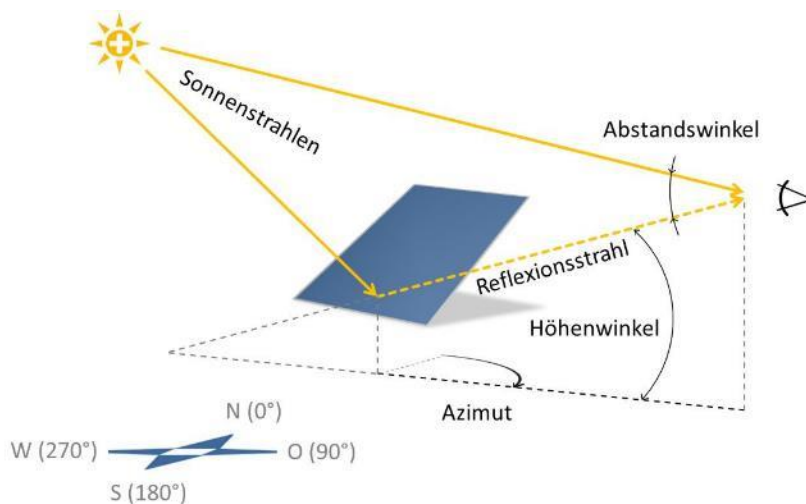


Abbildung 3: Darstellung des Reflexionsstrahls anhand von Azimut und Höhenwinkel wie in den Berechnungen verwendet und des Abstandswinkels zwischen den Blickrichtungen zur Sonne und zum Reflexionspunkt

¹ Berechnung nach Eicker 2001



Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein Reflexionsdiagramm für PV-Module an einem gegebenen Standort, die eine Azimutausrichtung (senkrecht zur reflektierenden Ebene) von 180° und einen Neigungswinkel von 18° aufweisen. Der Standort der PV-Anlage, die Bezeichnung der reflektierenden Ebene (hier: Süd, ebenes Gelände), der Zeitabstand zwischen zwei Reflexionspunkten, die Azimutausrichtung und die Modulneigung werden im Kopfbereich des Diagramms dokumentiert. Der potenzielle Blendbereich ist durch eine rote Umrandung gekennzeichnet.

Im Diagramm werden die Reflexionsrichtungen mit ihrem Azimut- und Höhenwinkel als Tagesganglinien für den 21. jeden Monats mit gleichfarbigen Markierungspunkten dargestellt. Die roten Punkte markieren die Reflexionsrichtungen am 21. Juni und die dunkelblauen die am 21. Dezember. Zwischen den Markierungspunkten liegt ein Zeitraum von 6 min. Die graue Umrandung der Markierungspunkte zeigt, dass der Abstandswinkel zwischen Reflexions- und Sonnenstrahlen bei weniger als 6° (Verkehrswege) oder 10° (schutzwürdige Nutzungen) liegt und die Reflexionen damit keine eigenständige Blendwirkung verursachen.

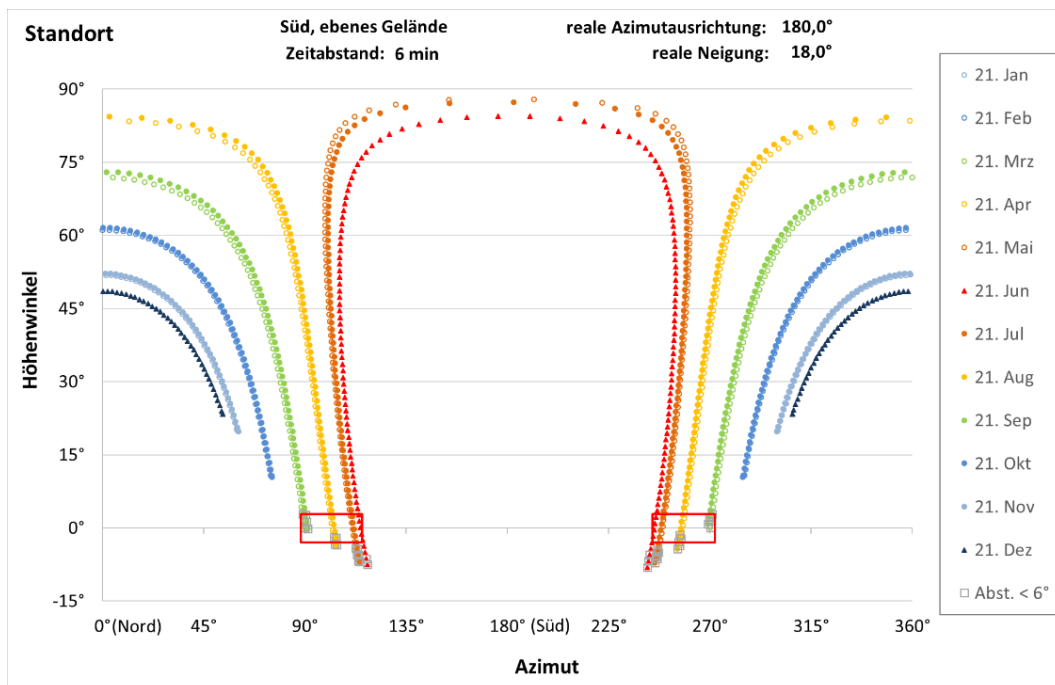


Abbildung 4: Beispielhaftes Reflexionsdiagramm mit roter Umrandung der potenziellen Blendrichtungen und -zeiten

Ein potenzieller Immissionsort kann nur von blendenden Sonnenlichtreflexionen der untersuchten PV-Anlage betroffen sein, wenn gleichzeitig die Azimutrichtung und der Höhenwinkel der Reflexionen auf diesen gerichtet sind. Aus den Höhendifferenzen und der Entfernung zwischen PV-Anlage und Immissionsort lässt sich in einem ersten Schritt der blendrelevante Höhenwinkelbereich eingrenzen. Bei Freiflächenanlagen können in der Regel nur Reflexionen bis zu einem maximalen Höhenwinkel von 3° bis 5° auf die umliegenden Immissionsorte treffen. Aus der Eingrenzung des blendrelevanten Höhenwinkelbereichs ergibt sich der potenzielle Blendbereich der Reflexionen.



4.3 Berechnung der Beleuchtungsstärken

Zur Beurteilung der Blendwirkung auf Verkehrswege werden auch die Beleuchtungsstärken der Sonnenlichtreflexionen und des Umgebungslichts (direktes, gestreutes oder diffus reflektiertes Sonnenlicht) herangezogen.

Zur Ermittlung der Beleuchtungsstärken durch das Umgebungslicht wird der Sonnenhöhenwinkel im untersuchten Reflexionszeitpunkt bestimmt und anschließend die horizontale Beleuchtungsstärke bei klarem Himmel aus direktem Sonnenlicht und Himmelslicht berechnet. Dazu werden die Berechnungsformeln der DIN 5034 Teil 2 Abschnitt 5.3 für die Bedingungen von klarem Himmel verwendet, um sicherheitshalber den für Blendung ungünstigsten Fall zu betrachten. Die horizontale Beleuchtungsstärke beträgt nach DIN 5034 an sonnigen Tag in Mitteleuropa bei einer Sonnenhöhe von 60° (mittags, Sommer) 90.000 lx und bei einer Sonnenhöhe von 16° (mittags, Winter) 20.000 lx.

Die Beleuchtungsstärke der Reflexionsstrahlen am Blickpunkt wird durch die Multiplikation der zum Reflexionszeitpunkt auf das PV-Modul treffenden Beleuchtungsstärke mit dem für den Auftreffwinkel hinterlegten Reflexionsgrad berechnet. Sollten keine modulspezifischen Reflexionsgrade vorliegen, wird der in Abschnitt 3.2 gezeigte Reflexionsgrad herangezogen, der als worst-case anzusehen ist.

4.4 Modellierung der Reflexions- und Blickpunkte

Als Reflexionspunkte werden die für die Blendanalyse ausgewählten Punkte auf der reflektierenden Oberfläche der PV-Module bezeichnet. Diese werden so gewählt, dass sie den gesamten Bereich der PV-Anlage repräsentieren, der in Richtung der im blendrelevanten Azimutbereich liegenden Immissionsorte reflektieren kann. Die x-y-Koordinaten der Reflexionspunkte werden der nach geographisch Nord ausgerichteten Karte mit dem Belegungsplan der PV-Anlage entnommen. Die z-Koordinaten ergeben sich aus der Höhe der Geländeoberkante am Reflexionspunkt und der Höhe über Grund der Unter- und Oberkanten der PV-Module.

Für die zu prüfenden Immissionsorte (Verkehrswege und schützenswerte Nutzungen) werden repräsentative Blickpunkte im potenziellen Blendbereich der PV-Anlage gewählt. Diese werden in die Plangrundlage aufgenommen und mit ihren x-y-Koordinaten in die Berechnungen übernommen. Die z-Koordinaten ergeben sich aus der Höhe der Geländeoberkante zuzüglich der Augenpunkthöhe am Blickpunkt. Dazu werden im Straßenverkehr gemäß den Richtlinien der FGSV 1 m (PKW) und 2,5 m (LKW) angesetzt, im Schienenverkehr 2 m bis 4 m, für unbebaute Grundstücke 2 m und für schützenswerten Räumen die Höhe des Fenstermittelpunkts. Die minimale und maximale Höhe eines Blickpunkts mit gleichen x-y-Koordinaten werden im Reflexionsdiagramm mit „min“ und „max“ markiert. Für Verkehrswege wird eine Blickachse (=Hauptblickrichtung) festgelegt, die im Normalfall der Fahrtrichtung entspricht.

4.5 Ergebnisdarstellung durch Reflexionsdiagramme

4.5.1 Straßen- und Schienenverkehr

Ein Reflexionsdiagramm mit Sichtbeziehung zu den Fahrzeugführenden dient zum Abgleich, ob ein Reflexionspunkt der PV-Anlage im Jahres- und Tagesverlauf Reflexionen auf einen Blickpunkt richten kann. Bei gleicher Azimutausrichtung und Modulneigung weist jeder Punkt der Moduloberfläche die gleiche



Reflexionscharakteristik auf, aber aus Sicht jedes einzelnen Reflexionspunkts unterscheiden sich Azimut- und Höhenwinkel der Reflexionspunkte zu ein und demselben Immissionsort. Deshalb werden die Kugelkoordinaten des Blickpunkts aus Sicht aller modellierten Reflexionspunkte berechnet und in das Reflexionsdiagramm eingetragen. Liegen diese innerhalb des von Reflexionen betroffenen Bereichs, d.h. zwischen den Tagesganglinien für den 21. Juni und den 21. Dezember, dann sind Reflexionen auf diesen Punkt möglich und der Zeitpunkt und die Dauer der potenziell blendenden Reflexionen können abgeschätzt werden. Zusätzlich werden das zentrale Blickfeld (oranges Oval) und das periphere Blickfeld (graues Oval) der Fahrzeugführenden entgegen der Blickrichtung eingezeichnet.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch ein Reflexionsdiagramm mit Sichtbeziehungen zu einem Blickpunkt im Straßenverkehr. Der schwarz umrandete Bereich zeigt den maximalen Blendzeitraum, in dem von Mitte April bis Ende August morgens für wenige Minuten Sonnenlichtreflexionen in das zentrale (April und August) oder periphere Blickfeld der Fahrzeugführenden gerichtet sein können. Ob die Reflexionen tatsächlich eine Blendwirkung verursachen können, ist anhand der lichttechnischen Berechnungsergebnisse zu prüfen.

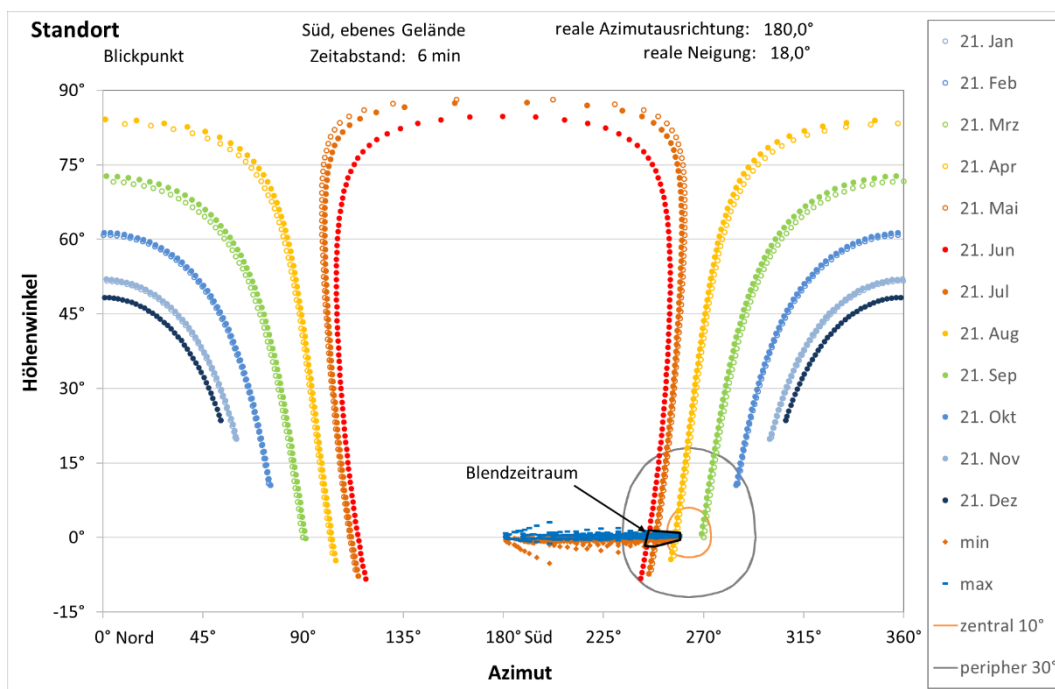


Abbildung 5: Beispielhaftes Reflexionsdiagramm mit Sichtbeziehung zu Fahrzeugführenden

4.5.2 Schützenswerte Nutzungen

Abbildung 6 zeigt exemplarisch ein Reflexionsdiagramm mit Blickbeziehungen zu einem schützenswerten Raum (oberes Diagramm) und eine Detailansicht mit dreiminütiger Auflösung der Tagesganglinien (unteres Diagramm), bei der der potenzielle Immissionszeitraum innerhalb eines Jahres durch eine schwarze Linie umgrenzt wird. Die graue Umrandung der Reflexionspunkte kennzeichnet die Zeitpunkte, zu denen der Abstandswinkel der Reflexionsstrahlen zur Sonne $< 10^\circ$ ist, und die damit nicht als Lichtimmissionen im Sinne der Licht-Richtlinie zu werten sind. Im gezeigten Beispiel beträgt die maximale tägliche Immissionsdauer 3 Minuten (etwas weniger als 2 Reflexionszeitpunkte mit dreiminütigem Abstand auf der Tagesganglinie vom 21. April bzw. August in der Detailansicht). Die maximale jährliche Immissionsdauer, umgrenzt durch die schwarze Linie in der Detailansicht, beträgt weniger als 5 Stunden.

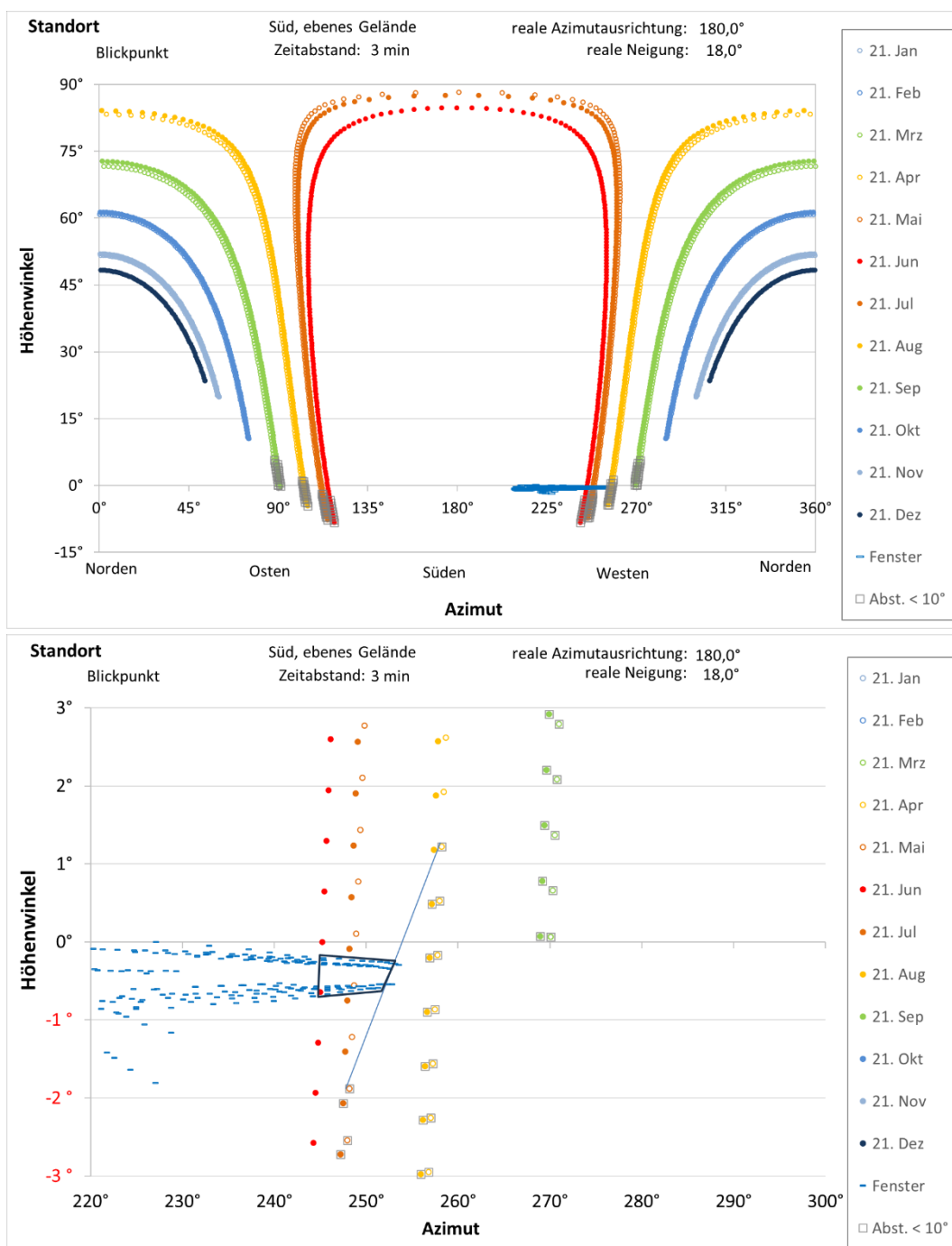


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung eines Reflexionsdiagramms für schützenswerte Nutzungen (oben) mit einer Detailansicht in 3-minütiger Auflösung der Tagesganglinien und schwarzer Umrandung des maximalen Immissionszeitraums (unten)



5 Situation vor Ort

5.1 PV-Anlage

Das Baufeld der PV-Anlage ist nördlich, westlich und südlich von freien Feldern umgeben. Mit einem Mindestabstand von 10 m verläuft östlich des Baufelds die Bahnlinie 6156 Werbig - Frankfurt (Oder) von Norden nach Süden. Die Landesstraße L 383 führt vom Ort Wulkow Richtung Süden und befindet sich ca. 600 m westlich vom Baufeld entfernt.

Abbildung 7 zeigt die Lage der Tischreihen der PV-Anlage (blaue Blöcke), die Position des Einfriedungszauns (rote Linie) sowie die umliegenden Verkehrswege und freien Felder.

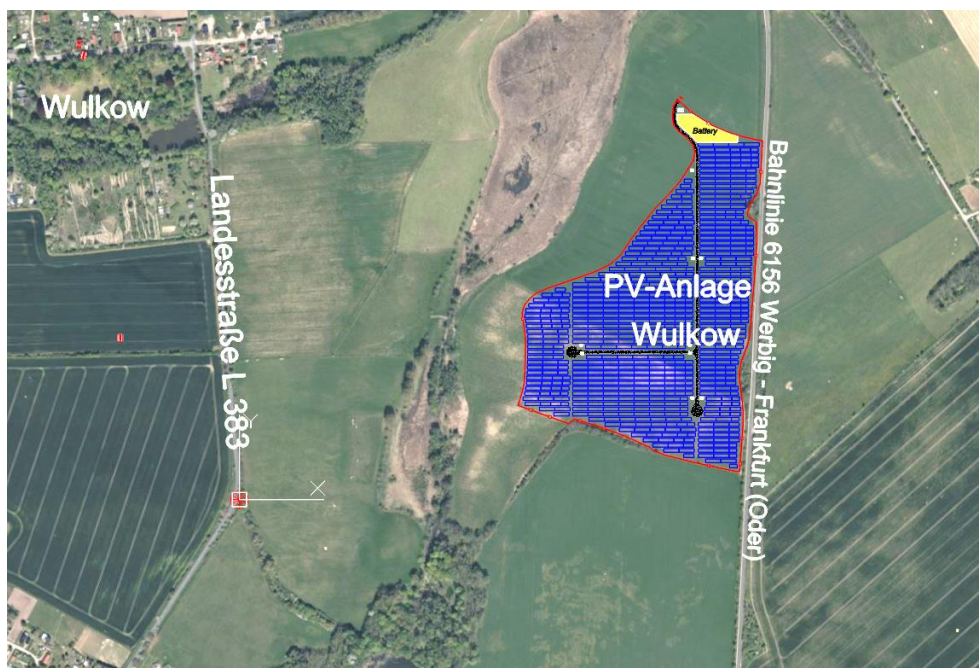


Abbildung 7: Belegungsplan der PV-Anlage Wulkow (Modultischreihen in blau)

Der Belegungsplan der PV-Anlage ist in einem UTM-Koordinatensystem erstellt, das eine Meridiankonvergenz von $-0,42^\circ$ zu geographisch Nord aufweist. Diese führt zu einer Azimutausrichtung von $179,6^\circ$ für auf ebenem Gelände errichtete PV-Tische. Die teilweise auftretende Hangneigung des Baufelds kann zu einer Querneigung der PV-Tische von bis zu $+2,0^\circ$ führen (Anstieg Richtung Osten). Die Unter- und Oberkanten der mit einer Planneigung von 18° zu errichtenden PV-Module liegen 0,8 m respektive 2,9 m über dem Gelände. Tabelle 1 fasst die für die Blendanalyse genutzten Systemangaben der PV-Anlage zusammen.



Tabelle 1: Systemangaben Freiflächen-Photovoltaikanlage Wulkow

PV-Anlage:	Wulkow
Standort:	Wulkow bei Booßen (Breite.: 52,40°, Länge: 14,48°)
UTM-Meridiankonvergenz:	-0,42°
Azimutausrichtung:	179,6°
Höhe des Baugrunds:	44 m üNNH bis 52 m üNNH
Planneigung der Module:	18°
Querneigung der PV-Tische:	0,0° bis 2,0° (Anstieg nach Osten)
Höhe der Modulunterkante:	0,8 m über Geländeoberkante
Höhe der Moduloberkante:	2,9 m über Geländeoberkante

5.2 Potenzielle Blendrichtungen

Auf Grund der Topografie der Umgebung liegen die potenziellen Immissionsorte nur geringfügig höher oder niedriger als die PV-Module. Es können nur potenziell blendende Sonnenlichtreflexionen mit Höhenwinkeln von weniger als $\pm 3^\circ$ auf die Augenhöhenpunkte gerichtet sein. Das Reflexionsdiagramm für PV-Tische auf ebenem Baufeld in Abbildung 8 zeigt, dass potenziell blendende Reflexionen (rote Umrandung) mit einem Abstandswinkel zur Sonne von $> 6^\circ$ abends in einen östlichen Azimutbereich von 95° bis 117° und morgens in einen westlichen Azimutbereich von 242° bis 265° gerichtet sein können.

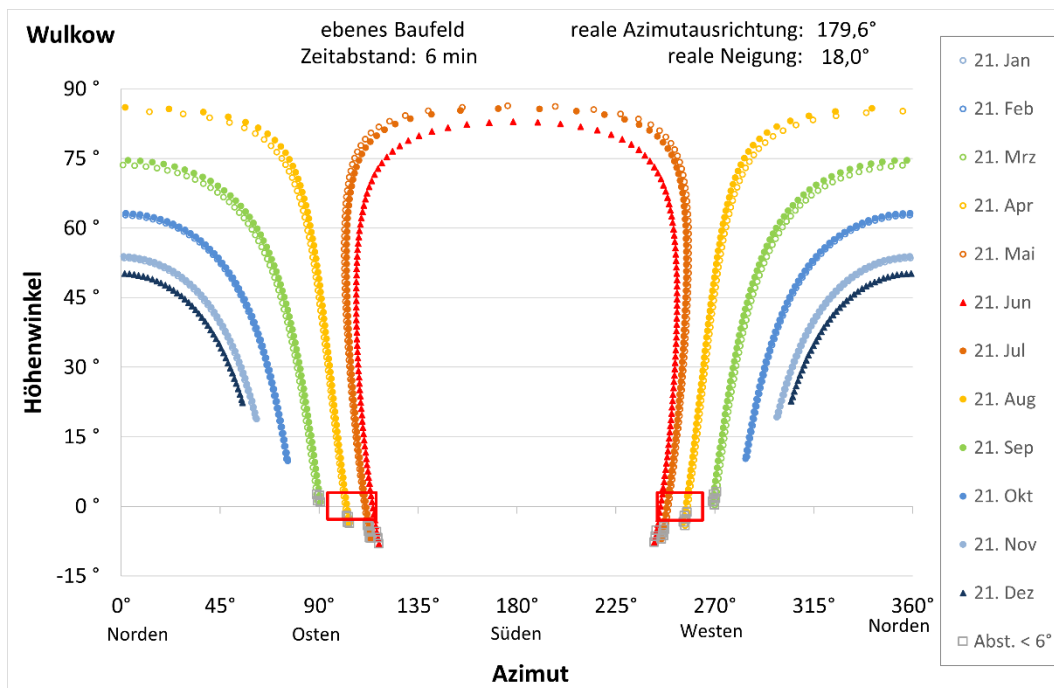


Abbildung 8: Reflexionsdiagramm für PV-Tische auf ebenem Gelände

Unter Einbeziehung der teilweise abweichenden Hangneigung des Baufelds ergibt sich für PV-Tische mit $2,0^\circ$ Querneigung, dass potenziell blendende Reflexionen abends in einen östlichen Azimutbereich von 99° bis 119° und morgens in einen westlichen Azimutbereich von 244° bis 272° gerichtet sein können.



5.3 Zu prüfende Immissionsorte

Abbildung 9 zeigt die blendrelevanten Azimutbereich der PV-Anlage für ausgewählte Reflexionspunkte und die zur Prüfung der Blendwirkung ausgewählten Blickpunkte. Die gelben Winkel mit 100 m Schenkellänge zeigen die möglichen Blendrichtungen, in die Sonnenlichtreflexionen mit geringen Höhenwinkeln möglich sind.

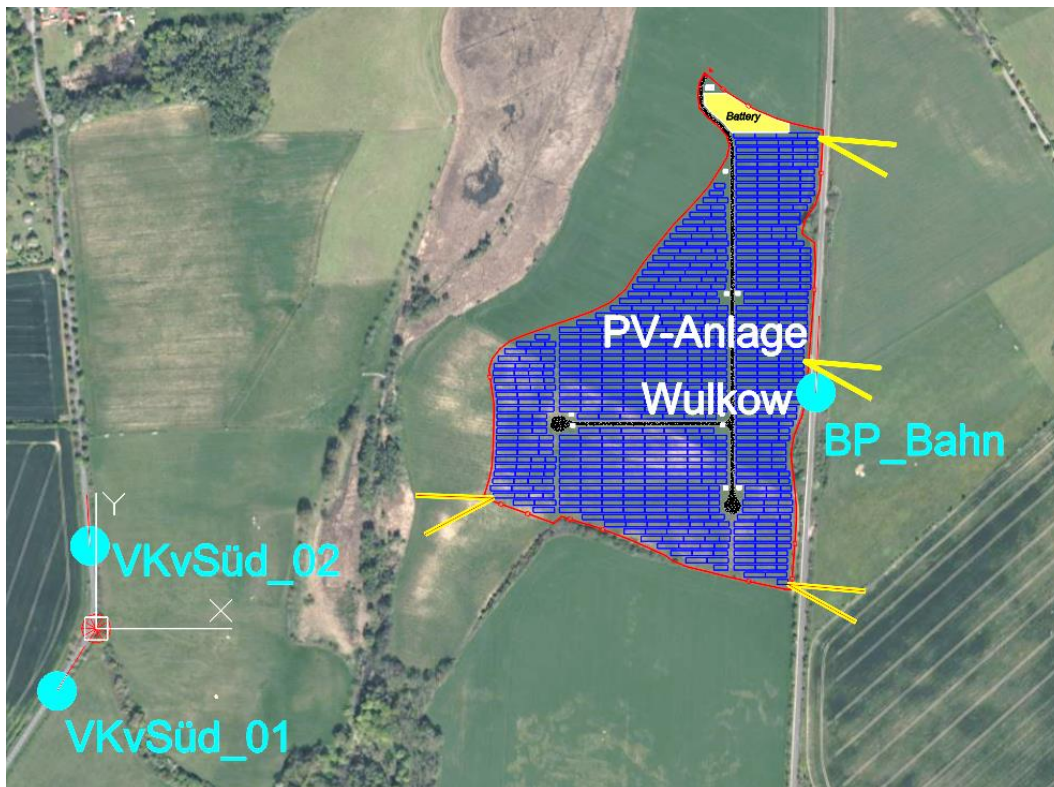


Abbildung 9: Mögliche Blendrichtungen (gelb), angezeichnet an ausgewählte Reflexionspunkte und die für die Blendanalyse gewählten Blickpunkte (cyanfarbene Kreise)

Die reflektierende Fläche der südausgerichteten PV-Anlage ist nur für aus Süden kommende Zugführende bzw. Fahrzeugführende sichtbar. Der aus Norden kommende Verkehr kann zu keiner Zeit von Sonnenlichtreflexionen durch die PV-Anlage betroffen sein. Die östlich der PV-Anlage mit einer Azimutrichtung von $2,0^\circ$ und einem Abstand von 10 m von Süden nach Norden verlaufende Bahnstrecke befindet sich im blendrelevanten östlichen Azimutbereich der PV-Anlage. Im Streckenverlauf bleibt ihre Lagebeziehung zur PV-Anlage unverändert. Mit dem Blickpunkt „BP_Bahn“ wird die Blendwirkung der PV-Anlage auf Zugführende Richtung Norden geprüft. Das Gleisbett befindet sich auf einer Höhe von 48,8 m üNNH.

Mit den Blickpunkten „VKvSüd_01“ sowie „VKvSüd_02“ wird die Blendwirkung der PV-Anlage auf von Süden kommende Fahrzeugführende auf der Landesstraße L 383 geprüft. Die im blendrelevanten westlichen Azimutbereich der PV-Anlage liegende Landesstraße verläuft von Südwesten kommend mit einer Azimutrichtung von 32° Richtung Nordosten. Nach einer Linkskurve führt sie mit einem Azimutwinkel von 357° in den Ort Wulkow Richtung Norden. Die Landesstraße L 383 befindet sich im blendrelevanten Azimutbereich auf einer Höhe von etwa 56 m üNNH.



Abbildung 10 zeigt die modellierten Reflexionspunkte der PV-Anlage und die Blickpunkte der zu prüfenden Immissionsorte in der x-y-Ebene.

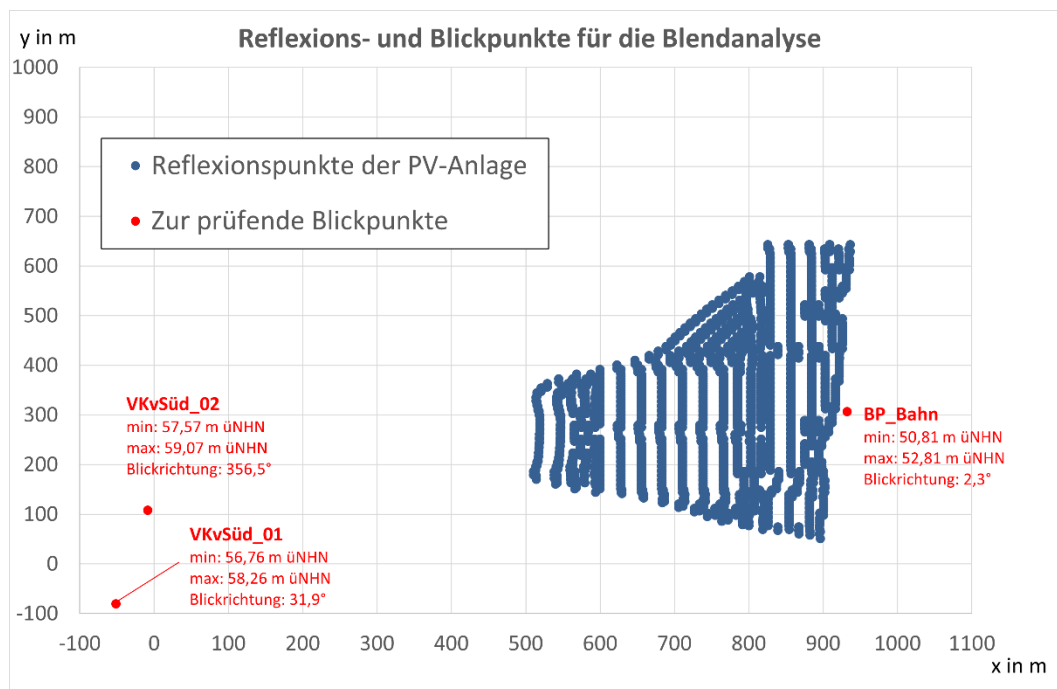


Abbildung 10: Für die Blendanalyse modellierte Reflexions- und Blickpunkte in der x-y-Ebene mit Angabe der Augenpunkthöhen und Blickrichtung am Blickpunkt



6 Berechnungsergebnisse

6.1 Schienenverkehr auf der Bahnstrecke

Am Blickpunkt BP_Bahn ist die PV-Anlage für die aus Süden kommenden Zugführenden im zentralen bis linken Bereich ihres Blickfelds sichtbar. Das Reflexionsdiagramm für PV-Module mit 2,0° Querneigung am Blickpunkt BP_Bahn in Abbildung 11 zeigt, dass das Blickfeld der Zugführenden jederzeit frei von Sonnenlichtreflexionen der PV-Anlage bleibt. Die Berücksichtigung der Querneigung für PV-Module auf ebenem Bauwerk hat keinen bewertungsrelevanten Einfluss auf das Ergebnis.

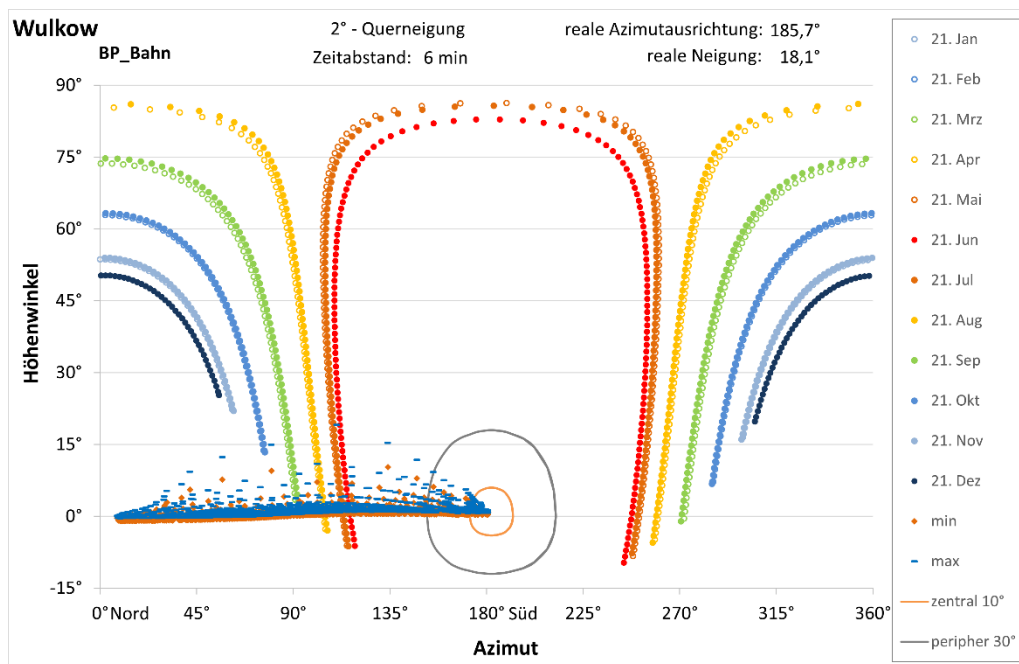


Abbildung 11: Reflexionsdiagramm am Blickpunkt BP_Bahn für PV-Module mit 2,0° Querneigung



6.2 Straßenverkehr auf der Landesstraße L 383

6.2.1 Blickpunkt VKvSüd_01

Die von Süden kommenden Fahrzeugführenden auf der Landesstraße L 383 befinden sich etwa 600 Meter von der PV-Anlage entfernt. Am Blickpunkt VKvSüd_01 kurz vor der Linkskurve der L 383 befindet sich die PV-Anlage im rechten Bereich des Blickfelds der Fahrzeugführenden. Das Reflexionsdiagramm für PV-Module auf ebenem Baufeld am Blickpunkt VKvSüd_01 in Abbildung 12 zeigt, dass das Blickfeld der Fahrzeugführenden jederzeit frei von Sonnenlichtreflexionen der PV-Anlage bleibt.

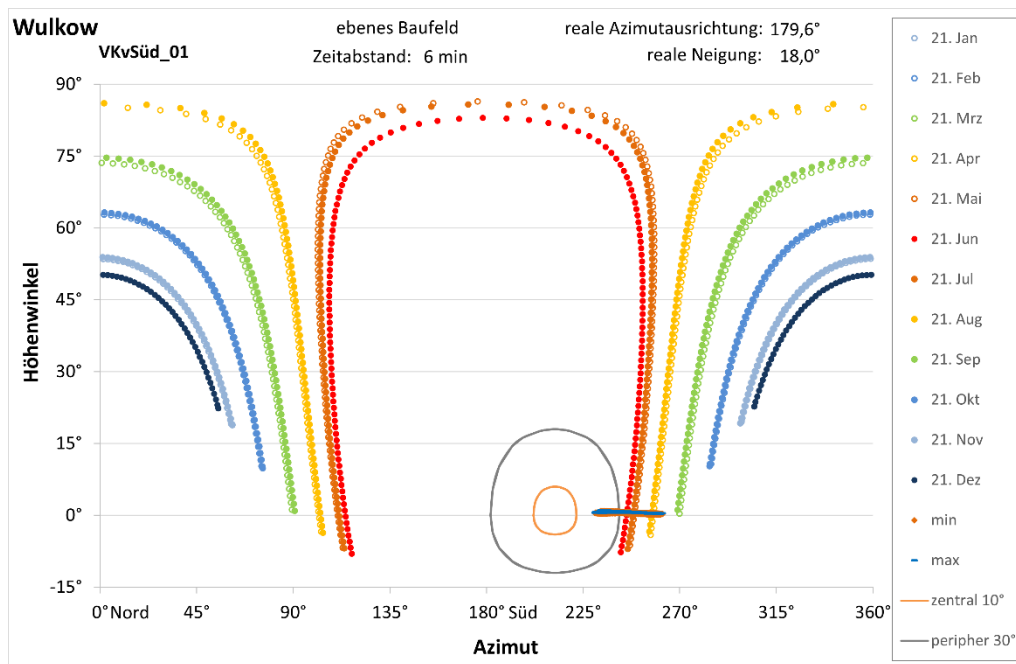


Abbildung 12: Reflexionsdiagramm am Blickpunkt VKvSüd_01 für PV-Module auf ebenem Baufeld

Abbildung 13 zeigt, dass eine Berücksichtigung der topographisch bedingten Querneigung von maximal 2,0° der PV-Module keinen bewertungsrelevanten Einfluss auf das Ergebnis hat.

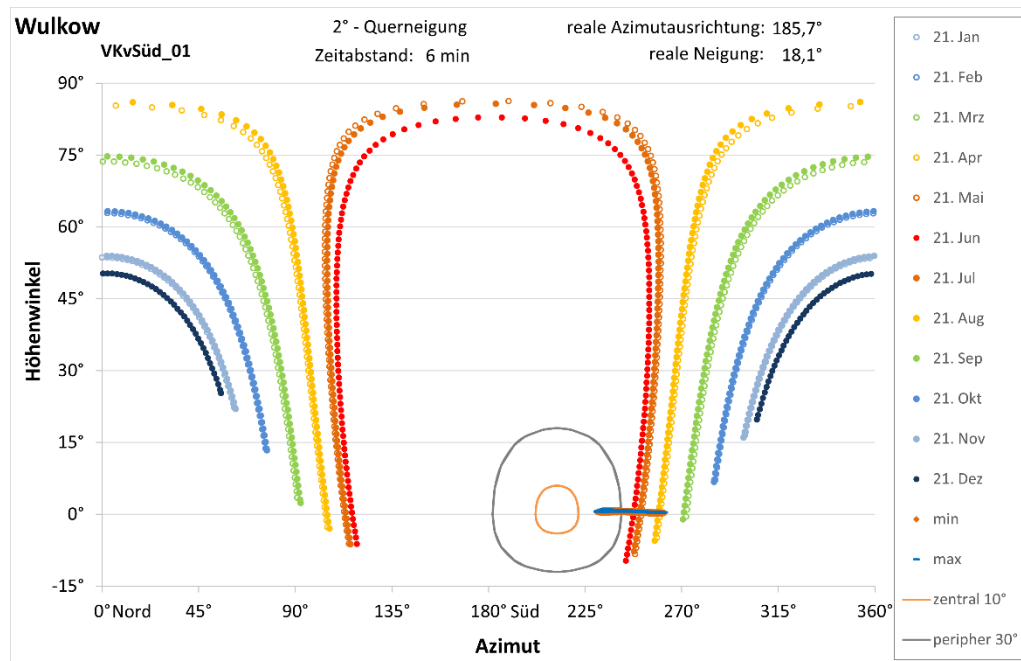


Abbildung 13: Reflexionsdiagramm am Blickpunkt VKvSüd_01 für PV-Module mit 2,0° Querneigung

6.2.2 Blickpunkt VKvSüd_02

Am Blickpunkt VKvSüd_02 kurz nach der Linkskurve der L 383 Richtung Norden wendet sich die Hauptblickrichtung der Fahrzeugführenden von der PV-Anlage ab. Das Reflexionsdiagramm für PV-Module auf ebenem Baufeld am Blickpunkt VKvSüd_02 in Abbildung 12 zeigt, dass das Blickfeld der Fahrzeugführenden jederzeit frei von Sonnenlichtreflexionen der PV-Anlage bleibt. Die Berücksichtigung der topographisch bedingten Querneigung von maximal 2,0° der PV-Module hat keinen bewertungsrelevanten Einfluss auf das Ergebnis.

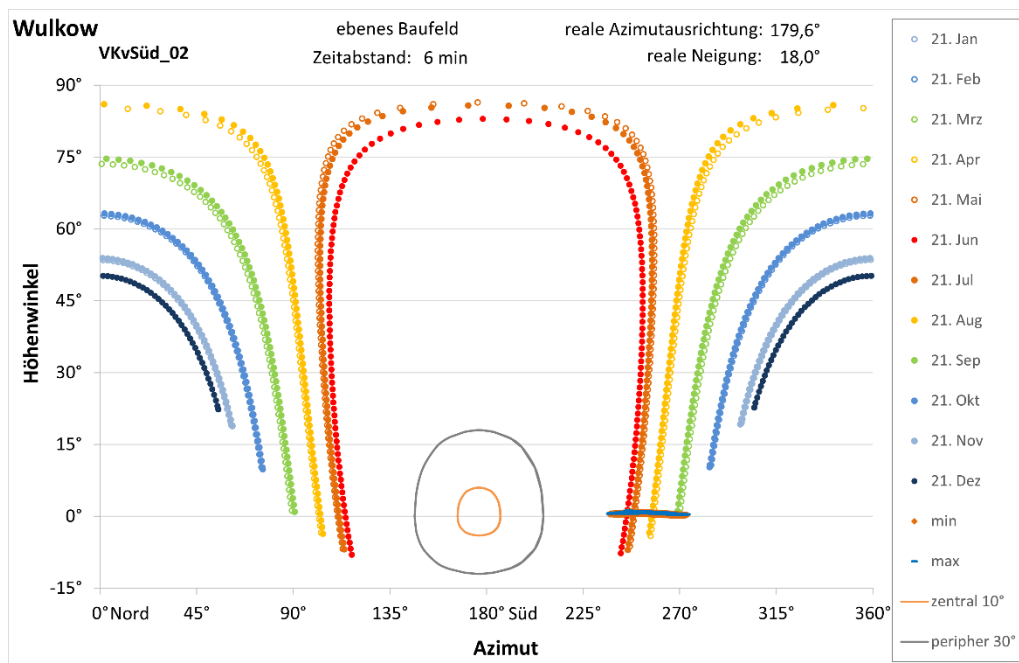


Abbildung 14: Reflexionsdiagramm am Blickpunkt VKvSüd_02 für PV-Module auf ebenem Baufeld



7 *Bewertung der Blendrisiken*

Bahnlinie 6156 Werbig - Frankfurt (Oder)

Die Zugführenden auf der Bahnlinie 6156 Werbig – Frankfurt (Oder) können nicht von potenziell blendenden Sonnenlichtreflexionen in ihr Blickfeld von $\pm 30^\circ$ um die Hauptblickrichtung betroffen sein. Der Streckenverlauf sowie die Verkehrssituation bleiben uneingeschränkt erkennbar.

Landstraße L 383

Die Fahrzeugführenden auf der Landesstraße L 383 können nicht von potenziell blendenden Sonnenlichtreflexionen in ihr Blickfeld von $\pm 30^\circ$ um die Hauptblickrichtung betroffen sein. Die Sicherheit und Leichtigkeit des Straßenverkehrs bleiben jederzeit gewahrt.



8 *Verwendete Materialien*

8.1 *Dokumente vom Auftraggeber*

- ▶ Modulbelegungsplan als Datei „2024-04-23_Wulkow-Booßen_Layout_bereinigt“
- ▶ Systemangaben in der Datei „Projektfläche Wulkow bei Booßen“

8.2 *Literatur*

- ▶ Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), zuletzt geändert durch Gesetz vom 20.07.2022 (BGBl. I S. 1353)
- ▶ Baugesetzbuch In der Fassung der Bekanntmachung vom 23.09.2004 (BGBl. I S. 2414), zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 28.7.2023 I Nr. 221
- ▶ BMWK: Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor, Bearbeitungsstand 4.3.2022
- ▶ Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 26. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) geändert worden ist
- ▶ Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 24. September 2021 (BGBl. I S. 4458) geändert worden ist
- ▶ Straßenverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. März 2003 (BGBl. I S. 310, 919), das zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist
- ▶ Bundesfernstraßengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Juni 2007 (BGBl. I S. 1206), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist
- ▶ RAL R1 – Richtlinie für die Anlage von Landstraßen, FGSV 2012
- ▶ RAL R1 – Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RAS 06, FGSV 2006
- ▶ Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung; Deutsche Fassung EN 12665:2018, Ausgabe 2018-08
- ▶ Wittlich, M.: Blendung – Theoretischer Hintergrund, Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA); Sankt Augustin 2010
- ▶ Hinweise der LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz) zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen (LAI-Richtlinie); Stand 3.11.2015
- ▶ Leitlinie des Brandenburger Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen (Licht-Leitlinie) vom 16. April 2014
- ▶ Eicker, U.: Solare Technologien für Gebäude; 1. Aufl. B. G. Teubner GmbH Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2001
- ▶ Reidenbach H.-D., Dollinger K., Ott G., Janßen M., Brose M. (2008): Blendung durch optische Strahlungsquellen. Bericht der BAUA, Forschung Projekt 2185
- ▶ Empfehlungen der Strahlenschutzkommission: Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren, Februar 2006
- ▶ DIN 5034-2:2021-08 Tageslicht in Innenräumen – Teil 2: Grundlagen



9 *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 1: Lage der geplanten PV-Anlage (PV-Modultischreihen blau eingezeichnet)	4
Abbildung 2: Auswirkung des Einfallwinkels auf den Transmissionsgrad für Modulgläser	8
Abbildung 3: Darstellung des Reflexionsstrahls anhand von Azimut und Höhenwinkel wie in den Berechnungen verwendet und des Abstandswinkels zwischen den Blickrichtungen zur Sonne und zum Reflexionspunkt.....	11
Abbildung 4: Beispielhaftes Reflexionsdiagramm mit roter Umrandung der potenziellen Blendrichtungen und -zeiten.....	12
Abbildung 5: Beispielhaftes Reflexionsdiagramm mit Sichtbeziehung zu Fahrzeugführenden.....	14
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung eines Reflexionsdiagramms für schützenswerte Nutzungen (oben) mit einer Detailansicht in 3-minütiger Auflösung der Tagesganglinien und schwarzer Umrandung des maximalen Immissionszeitraums (unten)	15
Abbildung 7: Belegungsplan der PV-Anlage Wulkow (Modultischreihen in blau)	16
Abbildung 8: Reflexionsdiagramm für PV-Tische auf ebenem Gelände.....	17
Abbildung 9: Mögliche Blendrichtungen (gelb), angezeichnet an ausgewählte Reflexionspunkte und die für die Blendanalyse gewählten Blickpunkte (cyanfarbene Kreise).....	18
Abbildung 10: Für die Blendanalyse modellierte Reflexions- und Blickpunkte in der x-y-Ebene mit Angabe der Augenpunkthöhen und Blickrichtung am Blickpunkt	19
Abbildung 11: Reflexionsdiagramm am Blickpunkt BP_Bahn für PV-Module mit 2,0° Querneigung.	20
Abbildung 12: Reflexionsdiagramm am Blickpunkt VKvSüd_01 für PV-Module auf ebenem Baufeld	21
Abbildung 13: Reflexionsdiagramm am Blickpunkt VKvSüd_01 für PV-Module mit 2,0° Querneigung	22
Abbildung 14: Reflexionsdiagramm am Blickpunkt VKvSüd_02 für PV-Module auf ebenem Baufeld	23



10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Systemangaben Freiflächen-Photovoltaikanlage Wulkow	17
----------------------------------------------------------------------	----