

Ingenieurbüro Eva Jenennchen

JERA

Jenennchen - Energie : Regenerative / Alternative

Blendanalyse

PV-Kraftwerk Dossow

Freilandanlage

Auftraggeber:

Bastian Fiedler
Trianel Energieprojekte GmbH & Co. KG
Krefelder Straße 203
52070 Aachen

Ilmenau, 20.06.2019

Version Nr.: 1.0

Gutachtennummer: BAL-K0102-19032-V10

Auftragnehmer:

Ingenieurbüro JERA
Heydaer Straße 5
98704 Ilmenau

Dipl.-Ing. Eva Jenennchen
(Bearbeiter und Teamleitung)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis	1
1. Beauftragung	2
2. Grundlagen	3
3. Rahmenbedingungen am Standort	4
4. Fazit	5
5. mögliche Immissionsorte	6
6. Situation am Anlagenstandort – Berechnung der Lichttechnik.....	8
a. Straße	8
b. Hallen Südlich	9
c. Gebäude westlich	10
d. Wohngebäude südlich	11
e. Blendmaß	12
7. Gewährleistung	14
8. Tabellenverzeichnis	14
9. Abbildungsverzeichnis	14

2. Grundlagen

Die physikalischen Grundlagen einer Blendung liegen in der Optik. Die Ursache ist die Reflektion von Strahlung an einer glatten Oberfläche. Die Oberfläche eines PV-Moduls besteht aus gehärtetem Glas, dies ist eine glatte Oberfläche welche eine Reflektion von einfallender Strahlung verursacht.

Das Reflexionsgesetz besagt, dass der Ausfallswinkel (auch Reflexionswinkel) genau so groß wie der Einfallswinkel ist, $\alpha = \beta$, und beide mit dem Lot in einer Ebene, der Einfallsebene, liegen.

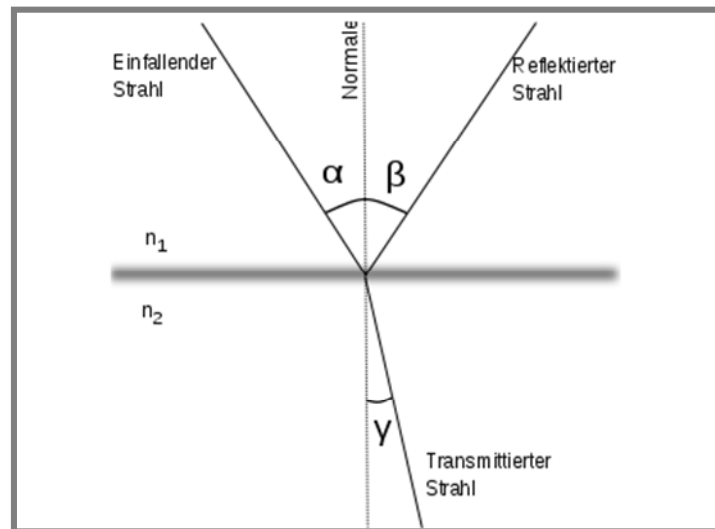


Abbildung 2: Prinzip Reflexionsgesetz

[Quelle: Tim Hellwig, Wikipedia]

Mathematische Berechnungsmethode

Zur Berechnung der Reflektion im Dreidimensionalen Raum kommen die mathematischen Grundlagen der Vektorberechnung zum Einsatz.

Das Koordinatensystem wird als kartesisches Koordinatensystem mit x-, y- und z-Achse angenommen. Der Sonneneinfallsstrahl wird als Vektor **S** dargestellt, die Modulebene als M. Auf der Modulebene M wird ein Hilfsvektor **h** eingeführt, welcher durch den Koordinatenursprung verläuft, senkrecht zu **S** steht und Element von M ist. **h** und der Normalenvektor von M spannen eine Ebene auf. Diese Ebene ist die Spiegelungsebene SE zum Sonneneinfallsvektor **S** und steht in Abhängigkeit der Sonnenneigung, des Sonnenazimuts und der Modulneigung.

Es wird ein beliebiger Punkt (A) auf **S** gewählt und dieser an SE gespiegelt – es folgt A'. Der Koordinatenursprung und A' beschreiben den Spiegelungsvektor **S'**. Mit diesem Vektor lassen sich der Ausfallswinkel der Spiegelung als Azimut und Neigung ablesen.

3. Rahmenbedingungen am Standort

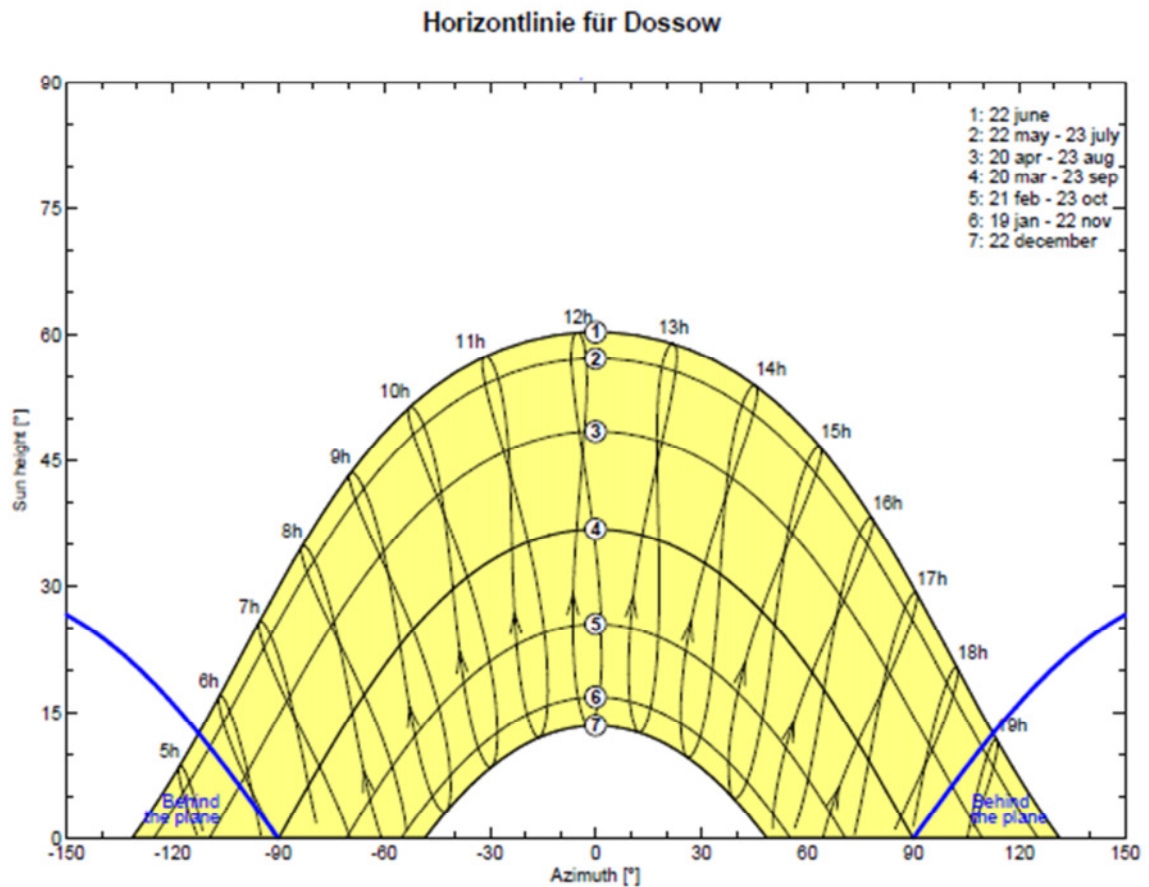


Abbildung 3: Sonnenlaufbahn mit Horizontlinie am Anlagenstandort

Abbildung 3 zeigt die Sonnenlaufbahn am Anlagenstandort. Aus diesem Diagramm lässt sich der jeweilige Einfallswinkel der Sonne auf die Horizontale Ebene auslesen. Am Anlagenstandort ist demnach ein Sonnenhöchststand von ca. 60° möglich.

4. Fazit

Eine Blendung wird an einer reflektierenden Oberfläche verursacht. Die verwendeten Module sind mit reflexionsarmen Solar-Sicherheitsglas ausgestattet.

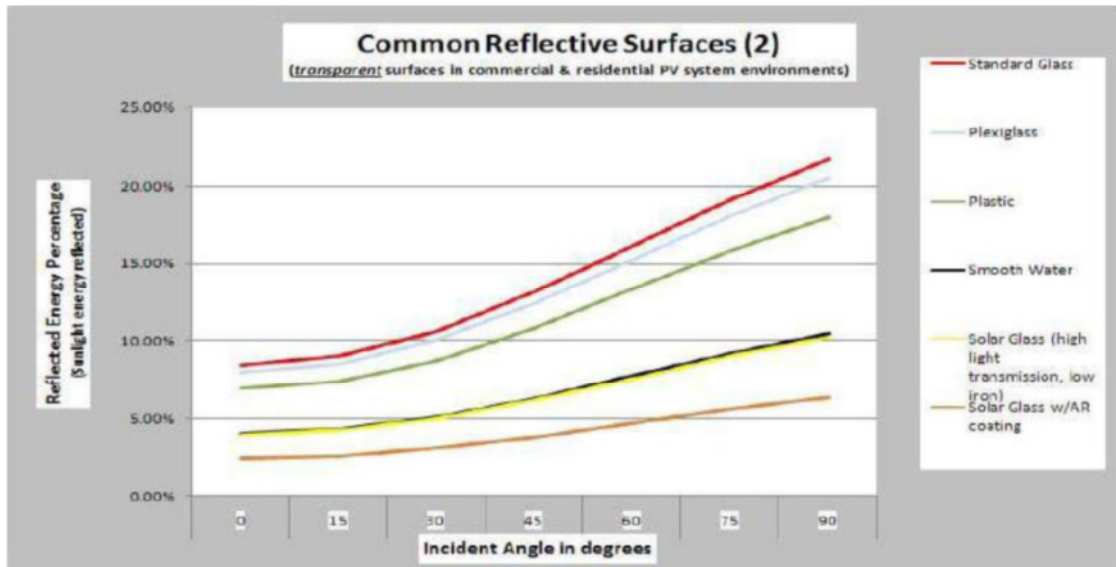


Abbildung 4: Reflexion von Solarmodulen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel solarer Einstrahlung /
Quelle: Deutsche Flugsicherung (DFS): Aeronautical Information Publication -
Luftfahrthandbuch AIP VFR.

Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass nasse PV-Oberflächen deutlich veränderte Reflexionseigenschaften aufweisen. Allerdings führt die Neigung der Oberfläche der Module zu einem raschen Abfließen des Wassers, so dass nach einem Regenereignis keine erhebliche Beeinträchtigung zu erwarten ist. Die Entwicklung bei Solarmodulen zielte in der Vergangenheit unter anderem auf eine weitestgehende Minimierung der Strahlungsverluste durch Reflexionen ab. Hierzu sind Solarmodule nach dem Stand der Technik (wie das hier verwendete Modul) mit Antireflexausrüstungen durch Oberflächenstrukturierungen (mikrotexturierte Oberflächen) und weitere Entspiegelungstechniken ausgestattet. Die Reflexionen werden dabei weitestgehend minimiert. Diese Konstruktion führt zu einer erheblichen Aufweitung des reflektierten Strahls. Fokussierte, gebündelte Blendstrahlen können hierdurch nicht entstehen, es kommt allenfalls zu einem flächenhaften Lichteindruck, ähnlich Gewässerflächen. [Quelle: Dr.-Ing. Frank Dröscher, Beurteilung der möglichen Blendwirkung eines Solarparks und dessen thermischen Effekte am Verkehrslandeplatz Eberswalde-Finow].

The screenshot displays the 'Mausnavigation' software interface. At the top, there is a menu bar with options: 'Linie', 'Pfad', 'Polygon', 'Kreis', '3D-Pfad', and '3D-Poly'. Below this, a text box contains the instruction 'Strecke zwischen zwei Punkten am Boden messen'. Underneath, there are three input fields: 'Kartenlänge:' with the value '34,48' and a unit dropdown set to 'Meter'; 'Länge am Boden:' with the value '34,48'; and 'Richtung:' with the value '222,84 Grad'. At the bottom of the interface, there is a checked checkbox for 'Mausnavigation' and two buttons labeled 'Speichern' and 'Löschen'. The main area of the software shows an aerial map. A yellow line is drawn on the map, connecting two points. The area around the line is highlighted in blue. The map includes labels for 'Draußenberg' and several numbers: '163', '189', '158', and '101'.

Die nord-westlich gelegene Straße Draußenberg und die Lagerhallen südlich können als möglicher Immissionsort benannt werden. Die minimale Entfernung der Fahrbahn (Draußenberg) zum PV-Modul in Reflektionslinie beträgt 10 m und der Lagerhallen - 34m.

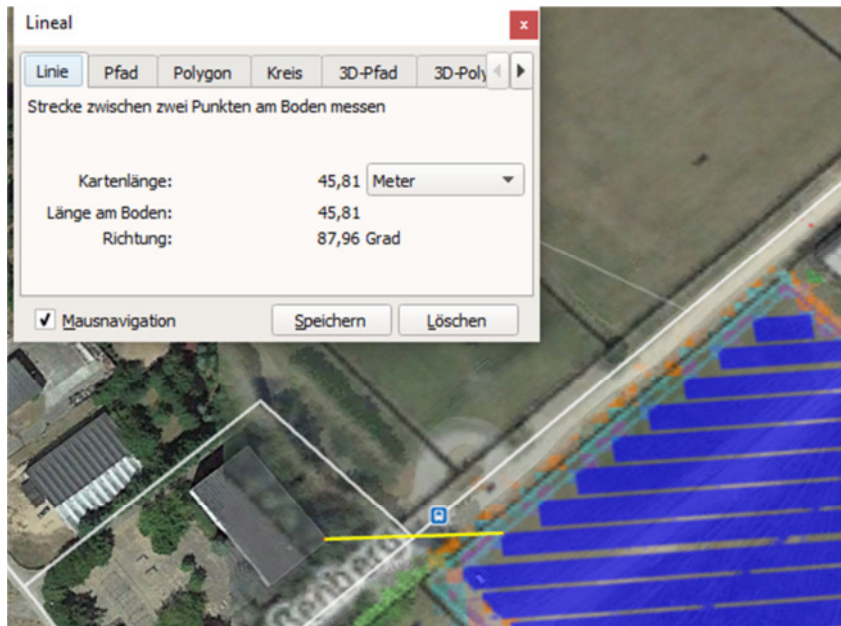


Abbildung 7: Entfernung Gebäude westlich

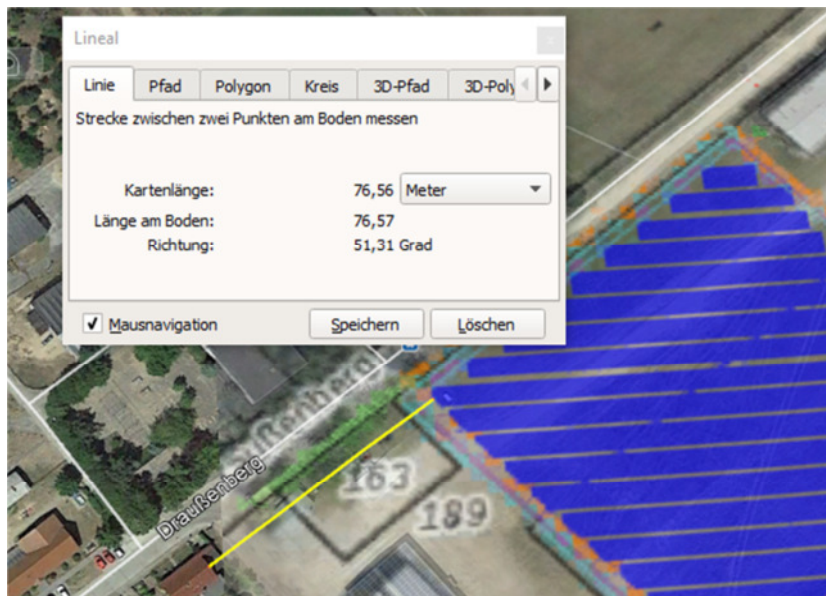


Abbildung 8: Entfernung Wohngebäude südlich

Weitere mögliche Immissionsorte ist das Gebäude westlich (min. Entfernung 45 m) und das Wohnhaus südlich (min. Entfernung 75 m)

6. Situation am Anlagenstandort – Berechnung der Lichttechnik

a. Straße

Eine Berechnung der resultierenden Leuchtdichte des Solarmoduls auf einen Betrachter (Straße) am Anlagenstandort Dossow ist wie folgt möglich:

Leuchtdichte der Sonne – zwischen Sonne am Horizont und Mittagssonne

$$L_S(5^\circ) = 6 \times 10^6 \left[\frac{cd}{m^2} \right] < L_S < L_S(60^\circ) 1,5 \times 10^9 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Minimaler Abstand Modul zu Betrachter bei möglicher Blendung

$$r = 10 [m]$$

Am Anlagenstandort wird ein Sonnenhöchststand von 60° erreicht. Somit wird die max. Leuchtdichte der Sonne zum Zeitpunkt der Blendung (höchster möglicher Sonnenazimut bei Blendung bei 25°) auf den linear ermittelten Wert bei Azimut 25° zwischen Leuchtdichte der Sonne am Horizont und der Mittagssonne gesetzt und resultiert zu:

$$L_S = 5,5 \times 10^8 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Nach Abbildung 4 resultiert für die Oberfläche des Solarmoduls eine Reflexionsrate von 7 %. Die abstrahlende Lichtstärke des Moduls folgt dann zu:

$$I_M = 38,5 \times 10^6 [cd] < 3,9 \times 10^7 [cd]$$

Durch die Antireflexbeschichtung des Moduls tritt keine optimal spiegelnde Reflexion auf, sondern eine diffuse. Diese diffuse Reflexion wird auch Lambertreflexion genannt. Die Blendquelle erscheint also als Lambertstrahler. Aus dieser Annahme folgt:

Die Leuchtdichte des Moduls beim Betrachter am minimal entfernten Punkt von Betrachter zu Modul folgt zu:

$$L_B = \frac{I_M}{A} = \frac{I_M}{2\pi r^2} = \frac{3,9 \times 10^7}{6,3 \times 10^2} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \cong 6,2 \times 10^4 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

wobei A die Fläche der Halbkugel aufgespannt bei r (minimale Entfernung des Betrachters) ist.

Dies ist eine deutliche Aufhellung im Vergleich zur vorherrschenden Umgebungsleuchtdichte (zwischen $10^2 < L_U < 10^3$), liegt aber noch unter dem Grenzwert der Absolutblendung L_A .

$$L_B = 6,2 \times 10^4 \left[\frac{cd}{m^2} \right] < L_A = 1,0 \times 10^5 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

b. Hallen Südlich

Eine Berechnung der resultierenden Leuchtdichte des Solarmoduls auf einen Betrachter (südliche Hallen) am Anlagenstandort Dossow ist wie folgt möglich:

$$L_S(5^\circ) = 6 \times 10^6 \left[\frac{cd}{m^2} \right] < L_S < L_S(60^\circ) 1,5 \times 10^9 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Minimaler Abstand Modul zu Betrachter bei möglicher Blendung

$$r = 34 [m]$$

Am Anlagenstandort wird ein Sonnenhöchststand von 60° erreicht. Somit wird die max. Leuchtdichte der Sonne zum Zeitpunkt der Blendung (höchster möglicher Sonnenazimut bei Blendung bei 25°) auf den linear ermittelten Wert bei Azimut 25° zwischen Leuchtdichte der Sonne am Horizont und der Mittagssonne gesetzt und resultiert zu:

$$L_S = 5,5 \times 10^8 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Nach Abbildung 4 resultiert für die Oberfläche des Solarmoduls eine Reflexionsrate von 7 %. Die abstrahlende Lichtstärke des Moduls folgt dann zu:

$$I_M = 38,5 \times 10^6 [cd] < 3,9 \times 10^7 [cd]$$

Durch die Antireflexbeschichtung des Moduls tritt keine optimal spiegelnde Reflexion auf, sondern eine diffuse. Diese diffuse Reflexion wird auch Lambertreflexion genannt. Die Blendquelle erscheint also als Lambertstrahler. Aus dieser Annahme folgt:

Die Leuchtdichte des Moduls beim Betrachter am minimal entfernten Punkt von Betrachter zu Modul folgt zu:

$$L_B = \frac{I_M}{A} = \frac{I_M}{2\pi r^2} = \frac{3,9 \times 10^7}{7,3 \times 10^3} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \cong 5,3 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

wobei A die Fläche der Halbkugel aufgespannt bei r (minimale Entfernung des Betrachters) ist.

Dies liegt leicht über dem Bereich der vorherrschenden Umgebungsleuchtdichte (zwischen $10^2 < L_U < 10^3$), liegt aber weit unter dem Grenzwert der Absolutblendung L_A .

$$L_B = 5,3 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right] \ll L_A = 1,0 \times 10^5 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

c. Gebäude westlich

Eine Berechnung der resultierenden Leuchtdichte des Solarmoduls auf einen Betrachter (Gebäude westlich) am Anlagenstandort Dossow ist wie folgt möglich:

Leuchtdichte der Sonne – zwischen Sonne am Horizont und Mittagssonne

$$6 \times 10^6 \left[\frac{cd}{m^2} \right] < L_S < 1,5 \times 10^9 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Minimaler Abstand Modul zu Betrachter bei möglicher Blendung

$$r = 45 [m]$$

Am Anlagenstandort wird ein Sonnenhöchststand von 60° erreicht. Somit wird die max. Leuchtdichte der Sonne zum Zeitpunkt der Blendung (höchster möglicher Sonnenazimut bei Blendung bei 25°) auf den linear ermittelten Wert bei Azimut 25° zwischen Leuchtdichte der Sonne am Horizont und der Mittagssonne gesetzt und resultiert zu:

$$L_S = 5,5 \times 10^8 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Nach Abbildung 4 resultiert für die Oberfläche des Solarmoduls eine Reflexionsrate von 7 %. Die abstrahlende Lichtstärke des Moduls folgt dann zu:

$$I_M = 38,5 \times 10^6 [cd] < 3,9 \times 10^7 [cd]$$

Durch die Antireflexbeschichtung des Moduls tritt keine optimal spiegelnde Reflexion auf, sondern eine diffuse. Diese diffuse Reflexion wird auch Lambertreflexion genannt. Die Blendquelle erscheint also als Lambertstrahler. Aus dieser Annahme folgt:

Die Leuchtdichte des Moduls beim Betrachter am minimal entfernten Punkt von Betrachter zu Modul folgt zu:

$$L_B = \frac{I_M}{A} = \frac{I_M}{2\pi r^2} = \frac{3,9 \times 10^7}{1,3 \times 10^4} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \cong 3,0 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

wobei A die Fläche der Halbkugel aufgespannt bei r (minimale Entfernung des Betrachters) ist.

Dies liegt leicht über dem Bereich der vorherrschenden Umgebungsleuchtdichte (zwischen $10^2 < L_U < 10^3$), liegt aber weit unter dem Grenzwert der Absolutblendung L_A .

$$L_B = 3,0 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right] \ll L_A = 1,0 \times 10^5 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

d. Wohngebäude südlich

Eine Berechnung der resultierenden Leuchtdichte des Solarmoduls auf einen Betrachter (Wohngebäude südlich) am Anlagenstandort Dossow ist wie folgt möglich:

Leuchtdichte der Sonne – zwischen Sonne am Horizont und Mittagssonne

$$6 \times 10^6 \left[\frac{cd}{m^2} \right] < L_S < 1,5 \times 10^9 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Minimaler Abstand Modul zu Betrachter bei möglicher Blendung

$$r = 75 [m]$$

Am Anlagenstandort wird ein Sonnenhöchststand von 60° erreicht. Somit wird die max. Leuchtdichte der Sonne zum Zeitpunkt der Blendung (höchster möglicher Sonnenazimut bei Blendung bei 25°) auf den linear ermittelten Wert bei Azimut 25° zwischen Leuchtdichte der Sonne am Horizont und der Mittagssonne gesetzt und resultiert zu:

$$L_S = 5,5 \times 10^8 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Nach Abbildung 4 resultiert für die Oberfläche des Solarmoduls eine Reflexionsrate von 7 %. Die abstrahlende Lichtstärke des Moduls folgt dann zu:

$$I_M = 38,5 \times 10^6 [cd] < 3,9 \times 10^7 [cd]$$

Durch die Antireflexbeschichtung des Moduls tritt keine optimal spiegelnde Reflexion auf, sondern eine diffuse. Diese diffuse Reflexion wird auch Lambertreflexion genannt. Die Blendquelle erscheint also als Lambertstrahler. Aus dieser Annahme folgt:

Die Leuchtdichte des Moduls beim Betrachter am minimal entfernten Punkt von Betrachter zu Modul folgt zu:

$$L_B = \frac{I_M}{A} = \frac{I_M}{2\pi r^2} = \frac{3,9 \times 10^7}{3,5 \times 10^4} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \cong 1,1 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

wobei A die Fläche der Halbkugel aufgespannt bei r (minimale Entfernung des Betrachters) ist.

Dies liegt leicht über dem Bereich der vorherrschenden Umgebungsleuchtdichte (zwischen $10^2 < L_U < 10^3$), liegt aber weit unter dem Grenzwert der Absolutblendung L_A .

$$L_B = 1,1 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right] \ll L_A = 1,0 \times 10^5 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Die Leuchtdichte der Solarmodule beim Betrachter (alle möglichen Immissionsorte) ist jeweils bedeutend kleiner als die Leuchtdichte, die bei der Absolutblendung auftreten kann.

e. Blendmaß

Somit ist die physiologische Blendung ausgeschlossen. Die LAI unterscheidet zwischen physiologischer und psychologischer Blendung. Die psychologische Blendung beschreibt die Belästigung der Immission durch Ablenkung. Für die psychologische Blendung gelten in besonders schutzwürdigen Räumen zeitlich begrenzte Schwellwerte. Als besonders schutzwürdige Räume sind Wohnhäuser zu betrachten. Zur Festlegung der Stärke der Beurteilung wird das Blendmaß k berechnet.

$$k = 0,1 \times \frac{L_B}{\sqrt{L_U}}$$

Im vorliegenden Fall wird das Blendmaß für das Wohnhaus südlich mit einer Entfernung von 75 m zur PVA berechnet.

$$L_B = 1,1 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

$$k = 0,1 \times \frac{1,1 \times 10^3}{\sqrt{10^2}} = 11$$

Das Blendmaß k hat nach Gebietsart gegliederte Schwellwerte nach folgender Tabelle:

	Immissionsort (Einwirkungsort) (Gebietsart nach § BauNVO) [2]	Immissionsrichtwert k für Blendung		
		6 h bis 20 h	20 h bis 22 h	22 h bis 6 h
1	Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten (§ 3) ¹⁾	32	32	32
2	reine Wohngebiete allgemeine Wohngebiete (§ 4) besondere Wohngebiete (§ 4a) Kleinsiedlungsgebiete (§ 2) Erholungsgebiete (§ 10)	96	64	32
3	Dorfgebiete (§ 5) Mischgebiete (§ 6)	160	160	32
4	Kerngebiete (§ 7) ²⁾ Ge- werbegebiete (§ 8) In- dustriegebiete (§ 9)	-	-	160

Tabelle 2: Immissionsrichtwert k zur Festlegung der maximal zulässigen Blendung durch technische Lichtquellen

Das Blendmaß k unterschreitet deutlich alle Schwellwerte.

Somit ist die psychologische Blendung im Wohnhaus südlich ebenfalls ausgeschlossen.

Die Lagerhallen südlich zählen zur Kategorie 4. Im hier angegebenen Zeitraum von 22.00-06.00 Uhr ist eine Blendung durch Reflektion von Sonnenlicht nur zwischen 05.30 Uhr und 06.00 Uhr möglich (siehe Abbildung 3).

Somit wird die max. Leuchtdichte der Sonne zum Zeitpunkt der Blendung (höchster möglicher Sonnenazimut bei Blendung bei 15°) auf den linear ermittelten Wert bei Azimut 15° zwischen Leuchtdichte der Sonne am Horizont und der Mittagssonne gesetzt und resultiert zu:

$$L_S = 2,8 \times 10^8 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Nach Abbildung 4 resultiert für die Oberfläche des Solarmoduls eine Reflexionsrate von 7 %. Die abstrahlende Lichtstärke des Moduls folgt dann zu:

$$I_M = 19,6 \times 10^6 [cd] < 2,0 \times 10^7 [cd]$$

$$L_B = \frac{I_M}{A} = \frac{I_M}{2\pi r^2} = \frac{2,0 \times 10^7}{7,3 \times 10^3} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \cong 2,7 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

$$k = 0,1 \times \frac{L_B}{\sqrt{L_U}}$$

$$k = 0,1 \times \frac{2,7 \times 10^3}{\sqrt{10^2}} = 27$$

Somit ist die psychologische Blendung in den Lagerhallen südlich ebenfalls ausgeschlossen.

Blendmaß für das Gebäude westlich mit einer Entfernung von 45 m:

$$k = 0,1 \times \frac{L_B}{\sqrt{L_U}}$$

$$L_B = 3,0 \times 10^3 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

$$k = 0,1 \times \frac{3,0 \times 10^3}{\sqrt{10^2}} = 30$$

Das Blendmaß k unterschreitet deutlich alle Schwellwerte.

Die LAI beschreibt im Anhang 2 im Besonderen die Blendwirkung von Photovoltaikanlagen. Die festgelegten Schwellwerte für die zulässige Einwirkdauer gelten nur bei Absolutblendung, welche im vorliegenden Fall ausgeschlossen ist.

7. Gewährleistung

Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen unter Verwendung der zugearbeiteten Unterlagen mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Die für die Berechnungen verwendeten Hilfsmittel befinden sich auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik. Dennoch können Irrtümer oder Abweichungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Hierfür wird von uns ausdrücklich keine Haftung übernommen. Gewährleistungen jeder Art sind ausgeschlossen.

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beauftragung	2
Tabelle 2: Immissionsrichtwert k zur Festlegung der maximal zulässigen Blendung durch technische Lichtquellen.....	12

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Satellitenbild mit eingebettetem Modulbelegungsplan des Anlagenstandortes.....	2
Abbildung 2: Prinzip Reflexionsgesetz	3
Abbildung 3: Sonnenlaufbahn mit Horizontlinie am Anlagenstandort	4
Abbildung 4: Reflexion von Solarmodulen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel solarer Einstrahlung / Quelle: Deutsche Flugsicherung (DFS): Aeronautical Information Publication - Luftfahrthandbuch AIP VFR.	5
Abbildung 5: Entfernung zur Straße Draußenberg kürzeste Reflexionslinie.....	6
Abbildung 6: Angabe kürzeste Entfernung zu Hallen südlich.....	6
Abbildung 7: Entfernung Gebäude westlich.....	7
Abbildung 8: Entfernung Wohngebäude südlich	7