



SONNWINN GmbH

Unabhängige Experten für Photovoltaik und Stromspeicher

BLENDGUTACHTEN

PV-DACHANLAGEN – B-PLAN 88.1 HALLBERGMOOS

VERSION 1.2
09.07.2026

Bearbeitet:

Sachverständiger für Photovoltaik
Mathias Röper, M. Eng.

Geprüft:

Sachverständiger für Photovoltaik
Dipl.-Ing. (FH) Marco Wilke

SONNWINN GmbH
Elbstraße 88/1
D-22880 Wedel
+49 (0) 4103 121 4221
kontakt@sonnwinn.de
www.sonnwinn.de

Revisionstabelle

Version	Änderung	Datum	Name
1.2	Ergebnismatrix erweitert	09.07.2026	Mathias Röper
1.1	Ergänzung: Batch-Analyse bzgl. der Tower	29.06.2026	Mathias Röper
1.0	Erste Fassung	22.05.2026	Mathias Röper

Das Gutachten ist nur in seiner aktuellen Fassung gültig.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Fragestellung	3
1.2	Haftungsausschluss	3
1.3	Datengrundlage	3
1.4	Methodik	3
2	Grundlagen PVA-bedingter Blendwirkungen	4
2.1	Blendwirkung von Modulen	4
2.2	Modellierung der Reflexionen.....	6
3	Herleitung der Bewertungsmethodik bzgl. Blendwirkungen im Flugverkehr	7
3.1	Relevante Immissionsorte bzw. Situationen	7
3.2	Qualitative Bewertung von Blendwirkungen	8
3.3	Relevantes Sichtfeld von Piloten	9
3.4	Sondersituation: Sonne überlagert PVA-bedingte Reflexionen.....	11
3.5	Modellierung eines Anflugs	11
4	Bewertungsmethodik als Entscheidungsbäume	12
4.1	Blendwirkungen auf Piloten.....	13
4.2	Blendwirkungen auf das Personal im Flugverkehrskontrollturm	14
5	Flughafen München.....	15
6	Übersicht der geplanten PV-Anlage.....	16
7	Auswertung	19
7.1	Anflüge	20
7.2	Flugverkehrskontrollturm (Tower).....	23
7.3	Rollen am Boden	25
8	Bewertung der Ergebnisse	27
	Literaturverzeichnis	29
	Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT	30

1 Einleitung

Die Allgemeine LANDESBODEN MUC 2 GmbH hat die SONNWINN GmbH mit der Untersuchung und Bewertung möglicher Blendwirkungen beauftragt, die von möglichen Photovoltaikflächen auf den geplanten Gebäuden im Geltungsbereich des Bebauungsplans Nr. 88.1 Hallbergmoos ausgehen und den Flugbetrieb am Flughafen München potenziell erheblich beeinträchtigen könnten.

1.1 Fragestellung

Es stellt sich die Frage, ob die Solarmodule der geplanten Photovoltaikanlagen Sonnenlicht so reflektieren, dass erhebliche Beeinträchtigungen durch Blendwirkungen für den umliegenden Flugverkehr/Flugbetrieb (Flughafen München) entstehen. Dieses Gutachten dient der Beantwortung dieser Frage und stellt dar, ob und mit welcher Häufigkeit Blendwirkungen auftreten können. Zudem werden die Ergebnisse bewertet.

Im speziellen sollen folgende Bereiche ausgewertet werden:

- Landeanflüge
- Flugverkehrskontrollturm (Tower)
- Vorfeldkontrolltürme (Ost und West)
- Piloten während des Rollens am Boden

1.2 Haftungsausschluss

Dieser Bericht wurde ausschließlich für den Gebrauch des Auftraggebers und in dessen Auftrag erstellt. Die Berechnungen und Auswertungen erfolgten nach bestem Wissen und Gewissen. Trotz sorgfältiger Durchführung können Fehler oder Irrtümer nicht vollständig ausgeschlossen werden. Für Folgeschäden, die aus der Nutzung des Gutachtens resultieren, wird keine Haftung übernommen. Die Haftung für Schadensersatz bei grober Fahrlässigkeit oder Vorsatz bleibt unberührt. Bei Weitergabe des Gutachtens an Dritte darf dieses weder verändert noch bearbeitet werden. Eine Haftung gegenüber Dritten, die sich den Inhalt dieses Gutachtens zunutze machen, ist grundsätzlich ausgeschlossen.

1.3 Datengrundlage

Tabelle 1: Verwendete Daten/Informationen und ihre Quellen

Information/Daten	Quelle
Angaben zur geplanten PVA	Auftraggeber
Umliegende Straßenverläufe	Google Earth Pro, OpenStreetMap
Umliegende Vegetation	
Umliegende Bebauung	

1.4 Methodik

Bisher existiert keine standardisierte Methodik zur Erfassung und Bewertung von Blendwirkungen durch Photovoltaikanlagen auf den Flugverkehr. Angesichts fehlender normativer Richtlinien wurde eine umfassende Bewertungsmethodik erarbeitet. Diese stützt sich maßgeblich auf das Dokument „Certification Specifications and Guidance Material for Aerodromes Design“ (CS-ADR-DSN) der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA). Die genauen Details und Herangehensweisen dieser Methodik werden im vorliegenden Bericht ausführlich erläutert.

2 Grundlagen PVA-bedingter Blendwirkungen

2.1 Blendwirkung von Modulen

Ein PV-Modul setzt sich aus zahlreichen Solarzellen zusammen, die Sonnenlicht in elektrische Energie umwandeln. Um Stabilität zu gewährleisten und vor Witterungseinflüssen zu schützen, sind die Solarzellen normalerweise hinter einer Glasscheibe (Modulglas) angebracht. Das Modulglas ist maßgeblich für mögliche Blendwirkungen verantwortlich. Da die erzeugte elektrische Energie in direktem Verhältnis zur Intensität der Sonneneinstrahlung auf die Solarzellen steht, bemühen sich Modulhersteller, Reflexionen am Modulglas zu reduzieren – je weniger Reflexionen, desto höher der Ertrag. Daher verfügt das Modulglas typischerweise über eine spezielle Oberflächentexturierung und eine sogenannte Antireflexschicht. Beide Elemente gewährleisten, dass möglichst viel Licht auf die Solarzellen trifft und Reflexionsverluste minimiert werden [1].

Daher reflektieren Solarmodule bei geringen Einfallswinkeln θ (siehe Abbildung 1) lediglich einen kleinen Teil des Sonnenlichts (etwa 5 %). Studien zeigen jedoch, dass trotz Texturierung und Antireflexbeschichtung der Anteil des reflektierten Sonnenlichts mit ansteigendem Einfallswinkel exponentiell zunimmt (siehe Abbildung 2).

Da bereits Reflexionen von weniger als 1 % des Sonnenlichts zu einer Absolutblendung führen können [2], müssen demnach Einfallswinkel berücksichtigt werden.

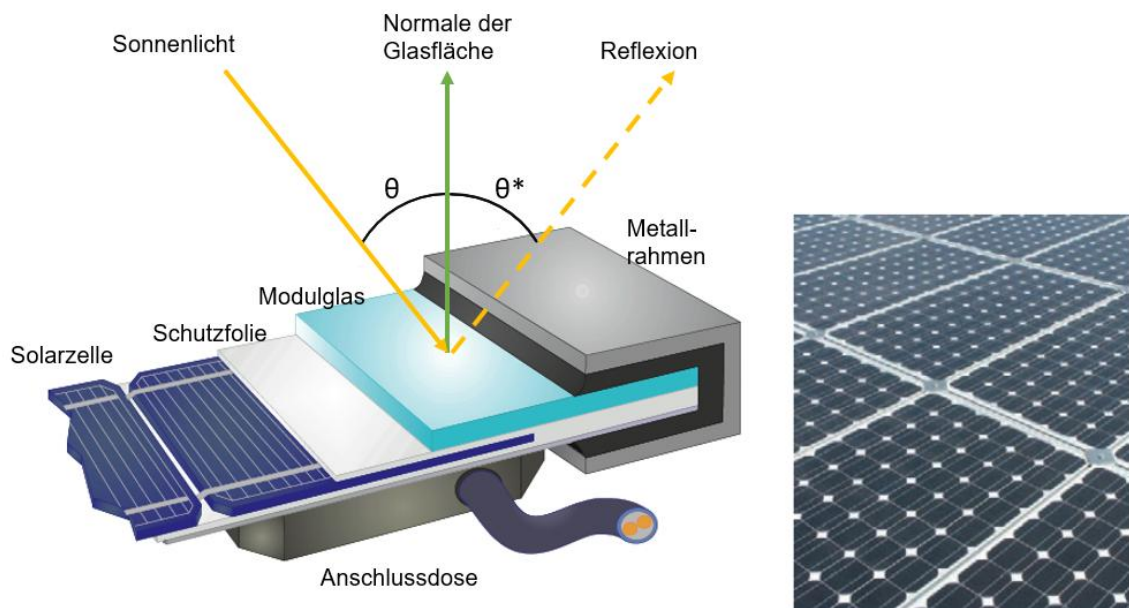


Abbildung 1: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“
– Quelle: [3] (modifiziert)

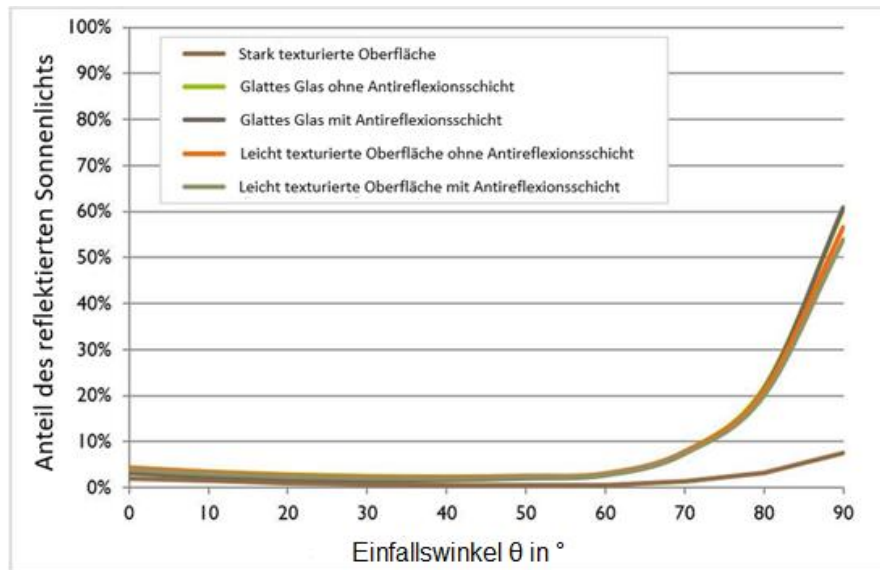


Abbildung 2: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypeen – Quelle: [4], modifiziert

Die Oberflächentexturierung des Modulglases bewirkt eine weniger intensive, aber diffuse (gestreute) Reflexion des Sonnenlichts, wodurch der Immissionsort der Reflexion vergrößert wird. Daher sind die Intensitäten von Reflexionen an Solarmodulen nicht mit denen an beispielsweise glatten Fensterscheiben vergleichbar, bei denen das Sonnenlicht gerichteter reflektiert wird. Moderne PV-Module verfügen allesamt über eine Antireflexbeschichtung und i. d. R. über eine leicht texturierte Oberfläche.



Abbildung 3: Veranschaulichung der Reflexion an einem texturierten Modulglas (mitte-links) und einem glatten Modulglas (mitte-rechts) – Quelle Aufnahme: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

2.2 Modellierung der Reflexionen

Reflexionen an PV-Modulen können geometrisch hergeleitet werden. Hierzu werden die Module, die relevanten Immissionsorte und die Sonne in einem gemeinsamen Koordinatensystem modelliert [2]. Der standortbezogene Sonnenverlauf kann für jeden Zeitpunkt im Jahr auf Basis mathematischer Funktionen ermittelt werden [5]. Durch Winkelbeziehungen und Strahlungsgesetze lässt sich nachvollziehen, wo und wann Blendwirkungen auftreten. Die Berücksichtigung von modulglasspezifischen Streuwinkeln und Reflexionskoeffizienten ermöglicht eine noch präzisere Betrachtung [4].

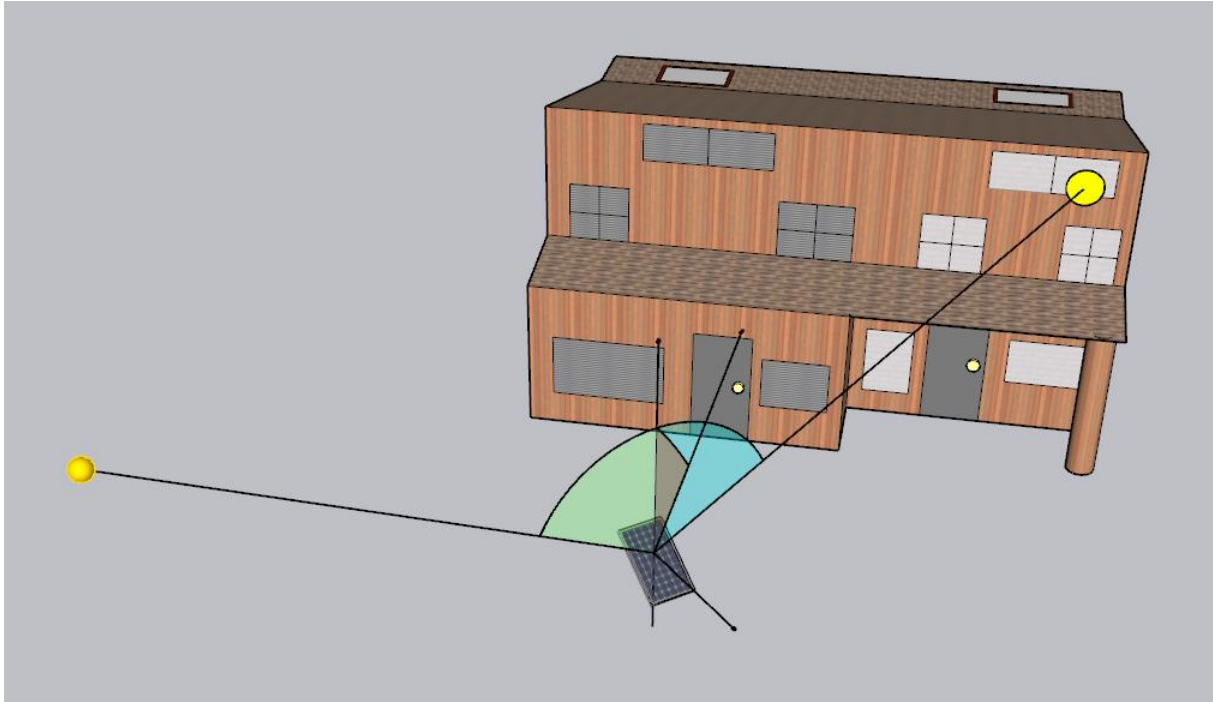


Abbildung 4: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion – Quelle: Eigene Abbildung

Für die Berechnungen der Reflexionen/Blendwirkungen wurde die Software ForgeSolar verwendet. Dabei wurden die Reflexionen/Blendwirkungen der PVA mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute für ein ganzes Jahr berechnet. Die Software basiert auf dem „Solar Glare Hazard Analysis Tool“ (SGHAT) der Sandia National Laboratories. Im Rahmen der Simulation werden die Höhendaten der PV-Fläche sowie der Immissionsorte berücksichtigt. Die Simulation basiert auf der Annahme eines immer klaren Himmels. Demnach wird ein abstrakter Worst-Case betrachtet.

Obwohl ForgeSolar zu den etabliertesten und professionellsten Programmen gehört, um PVA-bedingte Blendwirkungen zu berechnen, kann die Realität nur vereinfacht dargestellt werden. Die Limitationen der Software werden nach Möglichkeit durch zusätzliche Berechnungen kompensiert und die Ergebnisse stets validiert. Dennoch können Abweichungen von der späteren Realität nicht ausgeschlossen werden.

Eine weiterführende Auflistung der Annahmen und Einschränkungen bzgl. der Simulation befindet sich in Anhang A.

3 Herleitung der Bewertungsmethodik bzgl. Blendwirkungen im Flugverkehr

3.1 Relevante Immissionsorte bzw. Situationen

Im Kontext des Flugverkehrs wurden bestimmte Immissionsorte bzw. Situationen in Bezug auf Blendwirkungen als relevant eingeordnet. Diese wurden basierend auf den „Certification Specifications and Guidance Material for Aerodromes Design“ (CS-ADR-DSN) der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA) als relevant eingestuft [6]:

- Der Pilot darf während des Anflugs, insbesondere nachdem das Flugzeug die Entscheidungshöhe¹ unterschritten hat, keine visuellen Anhaltspunkte verlieren.
- Der Pilot darf beim Touchdown (Landung) nicht durch eine plötzliche Blendwirkung überrascht werden.
- Während des Rollens (sowohl bei Landung als auch Start) darf der Pilot keine visuellen Anhaltspunkte verlieren. Er sollte in der Lage sein, seine Umgebung klar wahrzunehmen und Abweichungen von der Mittellinie zu erkennen.
- Blendwirkungen dürfen die visuelle Wahrnehmung der Fluglotsen von Flugbetriebsabläufen auf und in der Nähe der Landebahn nicht beeinträchtigen.

Die CS-ADR-DSN trifft zudem folgende Annahmen zur Auswertung von PV-bedingten Blendwirkungen, welche im Rahmen der Begutachtung übernommen wurden:

- Bei der Auswertung kann davon ausgegangen werden, dass die Flugzeuge ihre Flugbahn konstant beibehalten und auf einer Geraden auf die Landebahn zusteuern (Flugrichtung = Verlaufsrichtung der Landebahn).

Demnach werden im Gutachten folgende Immissionsorte bzw. Situationen auf Blendwirkungen geprüft:

1. Blendwirkungen auf Piloten während direkter Anflüge (Direkt- oder Endanflüge) auf die Landebahnen (modelliert als geradlinige Anflüge entsprechend des Verlaufs der Landebahn).
2. Blendwirkungen auf das Personal im Flugverkehrskontrollturm (falls vorhanden).

¹ Die **Entscheidungshöhe** bezeichnet die spezifizierte Höhe bei einem Präzisionsinstrumentenanflug, an der der Pilot auf Basis der vorherrschenden Sichtverhältnisse entscheiden muss, ob er die Landung fortsetzt oder einen Durchstart einleitet. Falls der Pilot bis zu dieser Höhe keinen ausreichenden Sichtkontakt zum Boden oder den Landebahnlichtern hat, muss er durchstarten.

Für nicht-präzise Anflugverfahren, die oft auf kleineren Flugplätzen eingesetzt werden, wird statt einer Entscheidungshöhe von einer **Mindestsinkflughöhe** gesprochen. Dies ist die niedrigste Höhe, bis zu der der Pilot bei einem solchen Anflug ohne Sichtkontakt zur Landebahn sinken darf. Erst wenn er den notwendigen Sichtkontakt zur Landebahn oder den zugehörigen Landehilfen hat, darf er unter diese Höhe sinken, um zu landen.

3.2 Qualitative Bewertung von Blendwirkungen

In Anlehnung an das CS-ADR-DSN (EASA) kann davon ausgegangen werden, dass Reflexionen mit einer Leuchtdichte von $\leq 20.000 \text{ cd/m}^2$ vernachlässigt werden können [6]. In diesem Fall werden keine Blendwirkungen erwartet.

Eine Reflexion an einem marktüblichen Solarmodul überschreitet jedoch oft den Wert von 20.000 cd/m^2 . Die Blendwirkung einer Reflexion hängt jedoch nicht nur von ihrer Intensität (Leuchtdichte) ab, sondern auch maßgeblich von der relativen Größe der Blendquelle (reflektierender Bereich der PV-Fläche), die vom Betrachter wahrgenommen wird. Daher kann ein PV-Feld, das eine Leuchtdichte von weit über 20.000 cd/m^2 aufweist, trotzdem keine erhebliche Blendwirkung verursachen, wenn die Blendquelle nur einen sehr kleinen Teil des Sichtbereichs einnimmt. Die relative Größe der Blendquelle hängt unter anderem von der Entfernung und relativen Position des Betrachters zum PV-Feld, der Ausrichtung der Module und den Oberflächeneigenschaften des Modulglases ab.

Im vorliegenden Gutachten wird demnach der Ansatz verfolgt, dass eine Reflexion, die im relevanten Sichtbereich eines Piloten oder eines Fluglotsen emittiert wird, und eine Leuchtdichte von $> 20.000 \text{ cd/m}^2$ aufweist, unter Anwendung der publizierten Methodik zur Bewertung von Gefahren durch Blendwirkungen von Ho et al. ausgewertet wird. Bei der Bewertung nach Ho et al.² werden als Parameter die Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut sowie die relative Größe der Blendquelle berücksichtigt.

Blendwirkungen können nach Ho et al. in drei Kategorien eingeteilt werden³:

- (1) **Potenziell augenschädigend:** Die Blendwirkungen können das Sehvermögen nachhaltig schädigen. Dies ist bei PV-Anlagen jedoch vollständig auszuschließen.
- (2) **Potenziell geeignet, um temporäre Nachbilder zu verursachen:** Die Blendwirkungen können temporäre Nachbilder beim Betrachter hervorrufen. Als Nachbild wird der vorübergehende Abdruck der Blendquelle im Sichtfeld bezeichnet, hervorgerufen durch eine Überreizung der Netzhaut.
- (3) **Potenziell nicht geeignet, um temporäre Nachbilder zu verursachen:** Es besteht nur eine geringe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Nachbildern. Eine überraschend auftretende Absolutblendung (blitzartige Blendung) ist daher unwahrscheinlich.

Die Auswertung nach Ho et al. stellt lediglich einen **Teil** der gesamten (in diesem Gutachten angewendeten) Auswertungsmethodik dar. Eine übersichtliche Darstellung der Auswertungsmethodik findet sich in Kapitel 4.

² Für eine detaillierte Erklärung der Methodik wird auf die frei zugängliche Publikation von Ho et al. verwiesen: [7]

³ Es wird dabei angenommen, dass die betroffene Person nach dem Erfahren einer Blendwirkung eine typische *Blinzelreaktion* zeigt und den Blick auf die Blendquelle meidet. [7]

3.3 Relevantes Sichtfeld von Piloten

Die Bewertungsmethodik des vorliegenden Gutachtens verfolgt zudem den Ansatz, dass Reflexionen außerhalb des horizontalen Sichtfelds von Piloten von $\pm 50^\circ$ (bezogen auf die Flugrichtung/Fahrtrichtung) als unerheblich gelten. Das relevante Sichtfeld wurde im Rahmen einer Studie experimentell ermittelt [8].

Zudem ist zu beachten, dass aufgrund des Cockpits die vertikale Sicht eines Piloten in Richtung Boden eingeschränkt ist. Es wird angenommen, dass ab einem Winkel von 30° (bezogen auf die Flugrichtung) in Richtung Boden keine Sicht mehr besteht.

Die beschriebenen Sichtfelder grenzen den in diesem Gutachten als relevant bezeichneten Sichtbereich ein. Reflexionen außerhalb des relevanten Sichtbereichs gelten pauschal als irrelevant und werden auch simulationstechnisch nicht erfasst.

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die relevanten Sichtfelder.

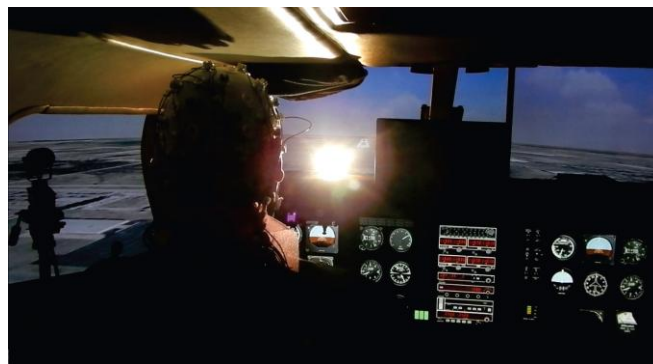


Abbildung 5: Darstellung einer Blendwirkung im relevanten Sichtfeld - Quelle: [8]

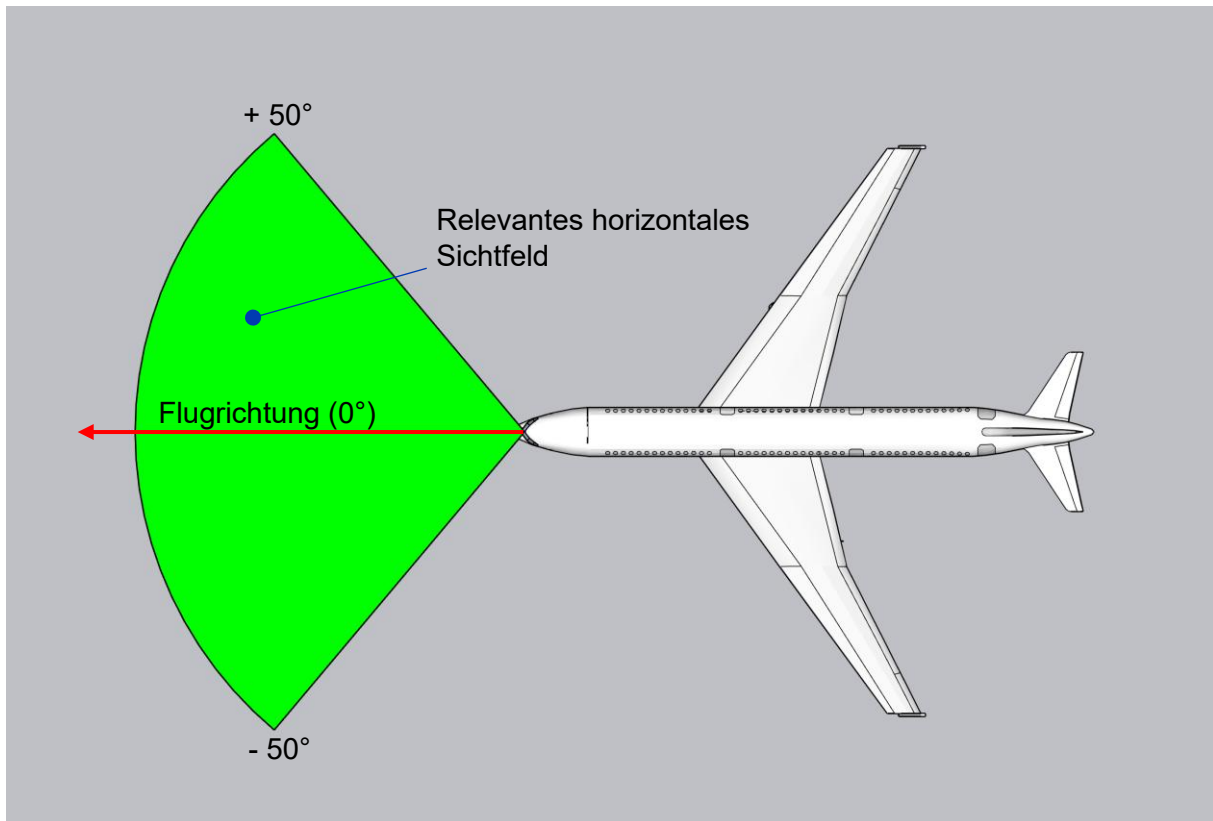


Abbildung 6: Darstellung des relevanten horizontalen Sichtfelds: Außerhalb von 50° zur Flugrichtung sind Reflexionen irrelevant. - Quelle Abbildung: Eigene Abbildung

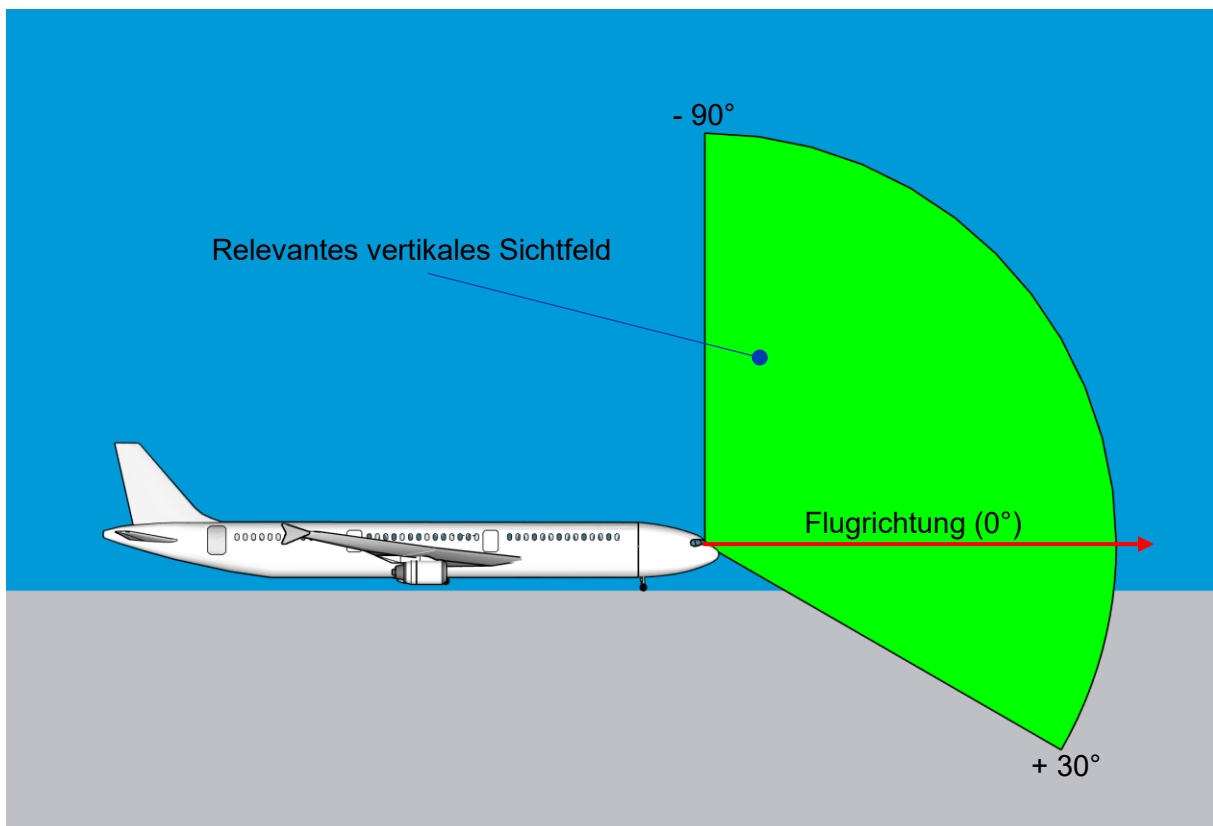


Abbildung 7: Darstellung des relevanten vertikalen Sichtfelds: Ab 30° gegen Boden ist dieses eingeschränkt. - Quelle Abbildung: Eigene Abbildung

3.4 Sondersituation: Sonne überlagert PVA-bedingte Reflexionen

In der angewendeten Bewertungsmethodik wird eine Reflexion, die in den relevanten Sichtbereich eines Piloten trifft, erst als stärkere Blendwirkung angesehen, wenn der Differenzwinkel zur direkten Sonnenstrahlung ca. 10° oder größer ist. Dieses Kriterium berücksichtigt den Umstand, dass die Blendwirkung der Sonne die Blendwirkung der PVA überlagert, wenn die Sonne tief steht und aus nahezu der gleichen Richtung wie die Reflexion scheint. Das Kriterium wurde in Anlehnung an [2] definiert.

3.5 Modellierung eines Anflugs

In der Simulation werden die Anflüge als gerade Anflüge auf die entsprechende Landebahn modelliert (Flugrichtung = Verlaufsrichtung der Landebahn). Die Anflüge werden immer über eine Strecke von genau 2 Seemeilen (3,7 km) simuliert (Boden- bzw. Kartenlänge), um sicherzustellen, dass das Erreichen der Entscheidungshöhe bzw. Mindestsinkflughöhe innerhalb des betrachteten Intervalls liegt.

Der Anflugwinkel wird mit 3° berücksichtigt. Die Landeschwelle wird im Modell bzw. in der Simulation stets mit 50 Fuß (15,2 m) überflogen.

Um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wird der Anflug stets in drei gleichgroße Abschnitte (Abschnitt 1 bis 3) unterteilt, auf die im Rahmen der Ergebnisauswertung (ggf.) Bezug genommen wird.

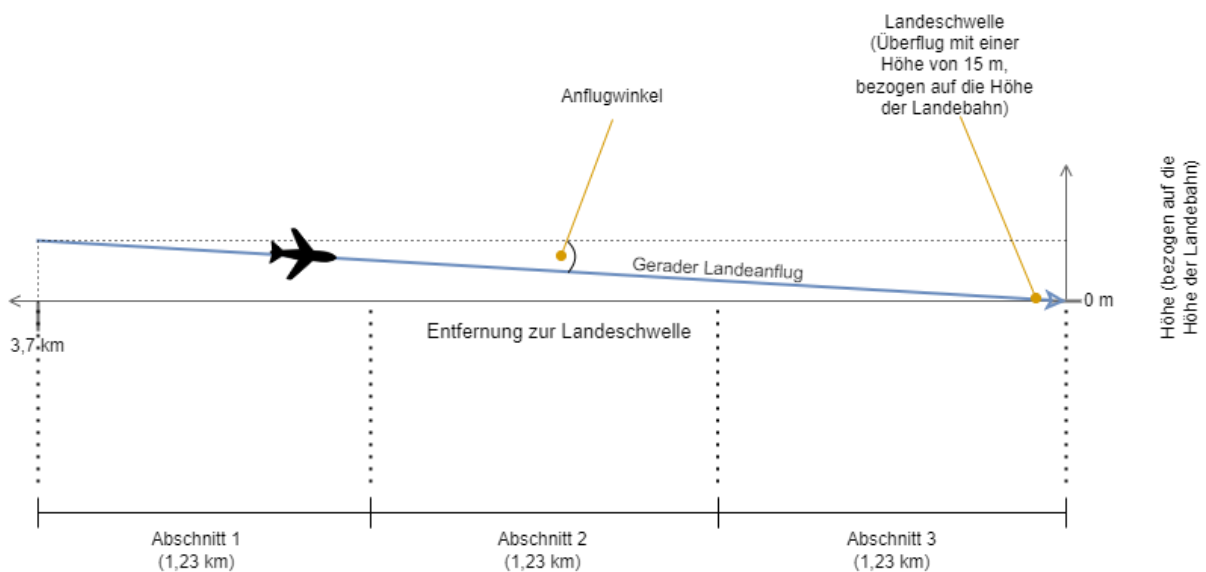


Abbildung 8: Skizze eines modellierten/simulierten Anflugs

4 Bewertungsmethodik als Entscheidungsbäume

Auf Basis der in Kapitel 3 dargestellten Informationen/Herleitungen wurde eine umfassende Bewertungsmethodik erstellt, die sich in zwei Kategorien einteilen lässt:

- Blendwirkungen auf Piloten (bei Anflügen und beim Rollen am Boden)
- Blendwirkungen auf das Personal im Flugverkehrskontrollturm

Für jede Kategorie wurde ein eigener Bewertungsablauf definiert (siehe folgende Unterkapitel).
Die Bewertungsmethodik dient der qualitativen Einordnung von Blendwirkungen.

4.1 Blendwirkungen auf Piloten

Der folgende Entscheidungsbaum dient der Bewertung (qualitative Einordnung) von PVA-bedingten Reflexionen auf Piloten während eines Landeanflugs. Zunächst wird geprüft, ob Reflexionen den relevanten Sichtbereich von Piloten erreichen können. Wenn nicht, findet keine Beeinträchtigung statt. Andernfalls wird die Leuchtdichte der Reflexion geprüft. Wenn sie $\leq 20.000 \text{ cd/m}^2$ beträgt, findet keine relevante Blendwirkung statt. Wenn sie $> 20.000 \text{ cd/m}^2$ beträgt, wird die Methodik von Ho et al. angewendet. Fällt die Blendwirkung in die dritte (3) Kategorie (schwächere Blendwirkung, nach Ho et al.), wird eine mittlere Blendwirkung erwartet. Fällt sie in die zweite (2) Kategorie, wird geprüft, ob die Reflexion von der direkten Sonnenstrahlung überlagert wird. Wenn ja, wird eine moderate Blendwirkung erwartet, wenn nein, wird eine stärkere Blendwirkung erwartet.

Erklärung der Ergebniskategorien:

- **Keine/geringfügige Blendwirkung:** Es finden keine oder nur vernachlässigbare Blendwirkungen statt.
- **Moderate Blendwirkung:** Es sind Blendwirkungen zu erwarten, die moderat störend wirken können.
- **Stärkere Blendwirkung:** Es sind Blendwirkungen zu erwarten, die erheblich störend wirken können.

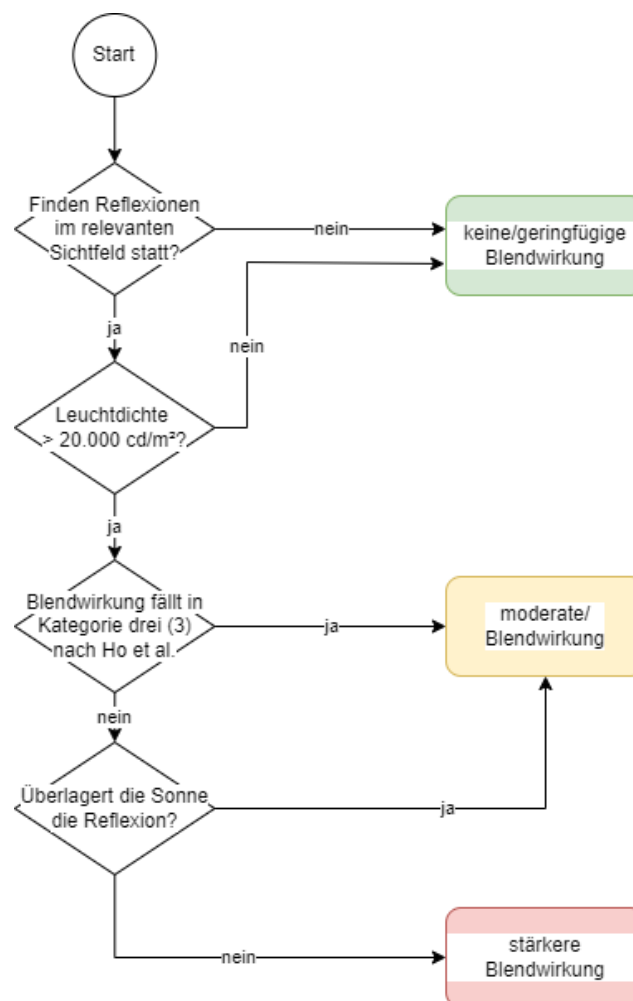


Abbildung 9: Bewertungsmethodik als Entscheidungsbaum für PVA-bedingte Blendwirkungen auf Piloten während eines Landeanflugs oder beim Rollen am Boden

4.2 Blendwirkungen auf das Personal im Flugverkehrskontrollturm

Der folgende Entscheidungsbaum dient der Bewertung (qualitative Einordnung) von PVA-bedingten Reflexionen auf Fluglotsen im Flugverkehrskontrollturm. Zunächst wird geprüft, ob Reflexionen den Arbeitsbereich des Flugverkehrskontrollturms erreichen können. Falls dies nicht der Fall ist, entsteht keine Beeinträchtigung (keine Blendwirkung). Wenn jedoch Reflexionen auftreten können, wird geprüft, ob die Leuchtdichte der Reflexionen größer als 20.000 cd/m² ist. Falls dies nicht der Fall ist, handelt es sich um eine vernachlässigbare Beeinträchtigung. Andernfalls wird geprüft, ob die Reflexionen tatsächlich die Sicht auf die Start- und Landebahnen beeinträchtigen. Wenn dies nicht der Fall ist, ist die Beeinträchtigung ebenfalls als vernachlässigbar einzustufen. Andernfalls findet eine stärkere Blendwirkung/Beeinträchtigung statt.

Erklärung der Ergebniskategorien:

- **Keine/geringfügige Blendwirkung:** Es finden keine oder nur vernachlässigbare Blendwirkungen statt.
- **Stärkere Blendwirkung:** Es sind Blendwirkungen zu erwarten, die erheblich störend wirken können.

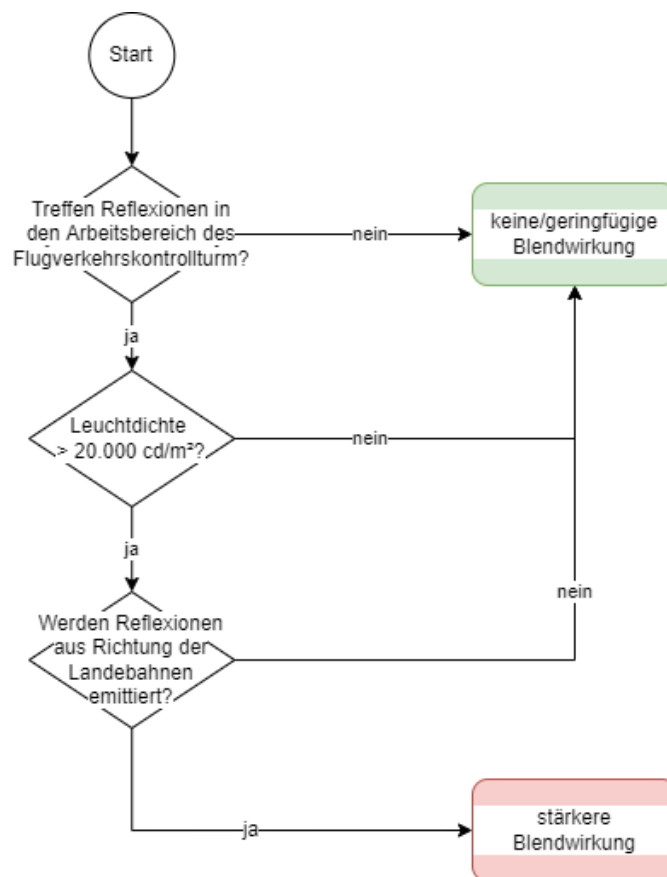


Abbildung 10: Bewertungsmethodik als Entscheidungsbaum für PVA-bedingte Blendwirkungen auf Fluglotsen im Flugverkehrskontrollturm

5 Flughafen München

Der Flughafen München besitzt zwei Lande- und Startbahnen. Die Landung aus nordöstlicher Richtung findet auf RWY 26L und 26R und aus südwestlicher Richtung auf RWY 08R und 08L statt.

Neben den linearen Anflügen werden Rollbewegungen am Boden sowie die Arbeitsbereiche der Kontrolltürme auf Blendwirkungen untersucht.

Anflugrichtungen:

- RWY 08R: 81°
- RWY 08L: 81°
- RWY 26L: 261°
- RWY 26R: 261°

Der Flugverkehrskontrollturm (Tower) wurde mittig des Flughafens verortet. Die Augenhöhe eines Fluglotsen im nördlichen Tower wurde auf 70 m über der Geländeoberkante angesetzt. Die Vorfeldkontrollen befinden sich östlich und westlich des Towers. Für die Vorfeldkontrolle Ost wurde eine Augenhöhe von 38 m und für die Vorfeldkontrolle West eine Augenhöhe von 11,5 m angesetzt. Die Höhen wurden konservativ geschätzt. Es gilt zu beachten, dass höherliegende Immissionsorte i. d. R. mehr Blendwirkungen erfahren.

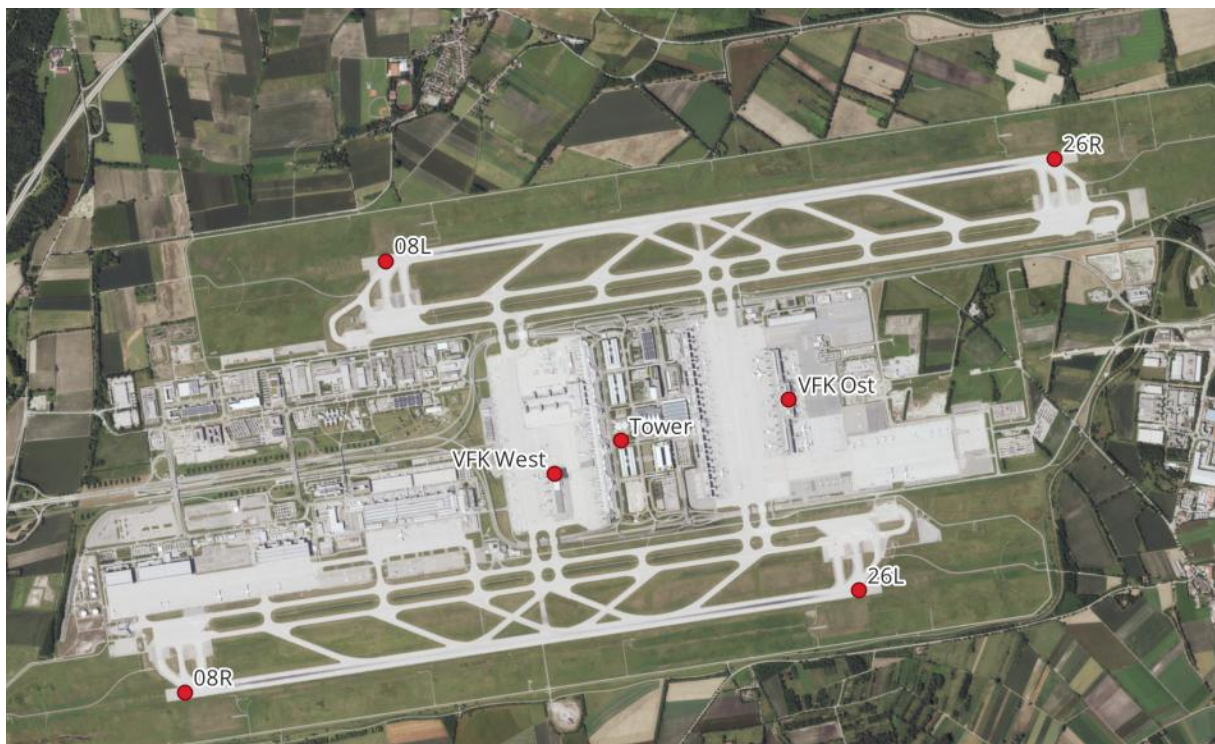


Abbildung 11: Übersicht Flughafen - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

6 Übersicht der geplanten PV-Anlage

Relevante Anlagenparameter werden in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Die geplanten PV-Dachanlagen befinden sich auf rund 20 vorgesehenen Gebäudeabschnitten innerhalb des Geltungsbereichs des Bebauungsplans Nr. 88.1 Hallbergmoos. Derzeit liegen lediglich die Gebäudeumrisse sowie die maximal zulässigen Gebäudehöhen vor. Eine konkrete Ausrichtung der geplanten PV-Module ist bislang nicht definiert, weshalb im Rahmen der Untersuchung eine Vielzahl möglicher Ausrichtungsvarianten betrachtet wird. Die geplanten PV-Dachanlagen befinden sich ca. 1.900 m südwestlich der Landeschwelle von RWY 08R.

Tabelle 2: PVA-Parameter

PVA-Parameter	Wert / Angabe
Geokoordinaten (Breite, Länge)	48.3278063,11.7304251
Art der Anlage	Dachanlagen
Modultyp	Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung
Aufständigung	Fest aufgeständert
Anzahl Module	-
Nennleistung (DC)	-
Modulausrichtung (Azimut)	360° Prüfung
Modulneigung	5° bis 45°
Max. Dachhöhe	s. Abb. 12



Abbildung 12: Darstellung der Lage der geplanten PV-Flächen inkl. Größe und max. Dachhöhe
– Quelle Karte: OpenStreetMap

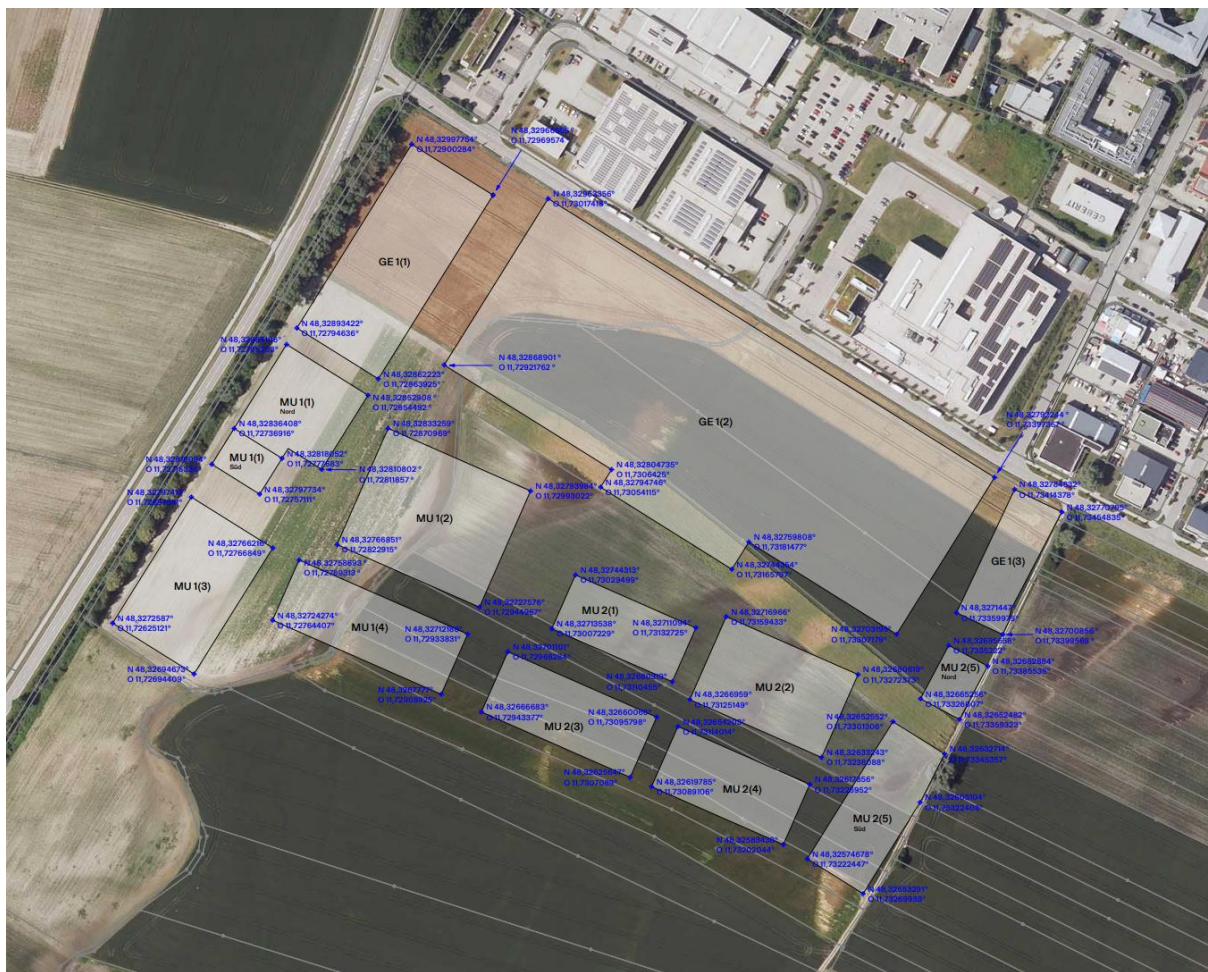


Abbildung 13: Gebäudeumrisse - Quelle: Auftraggeber

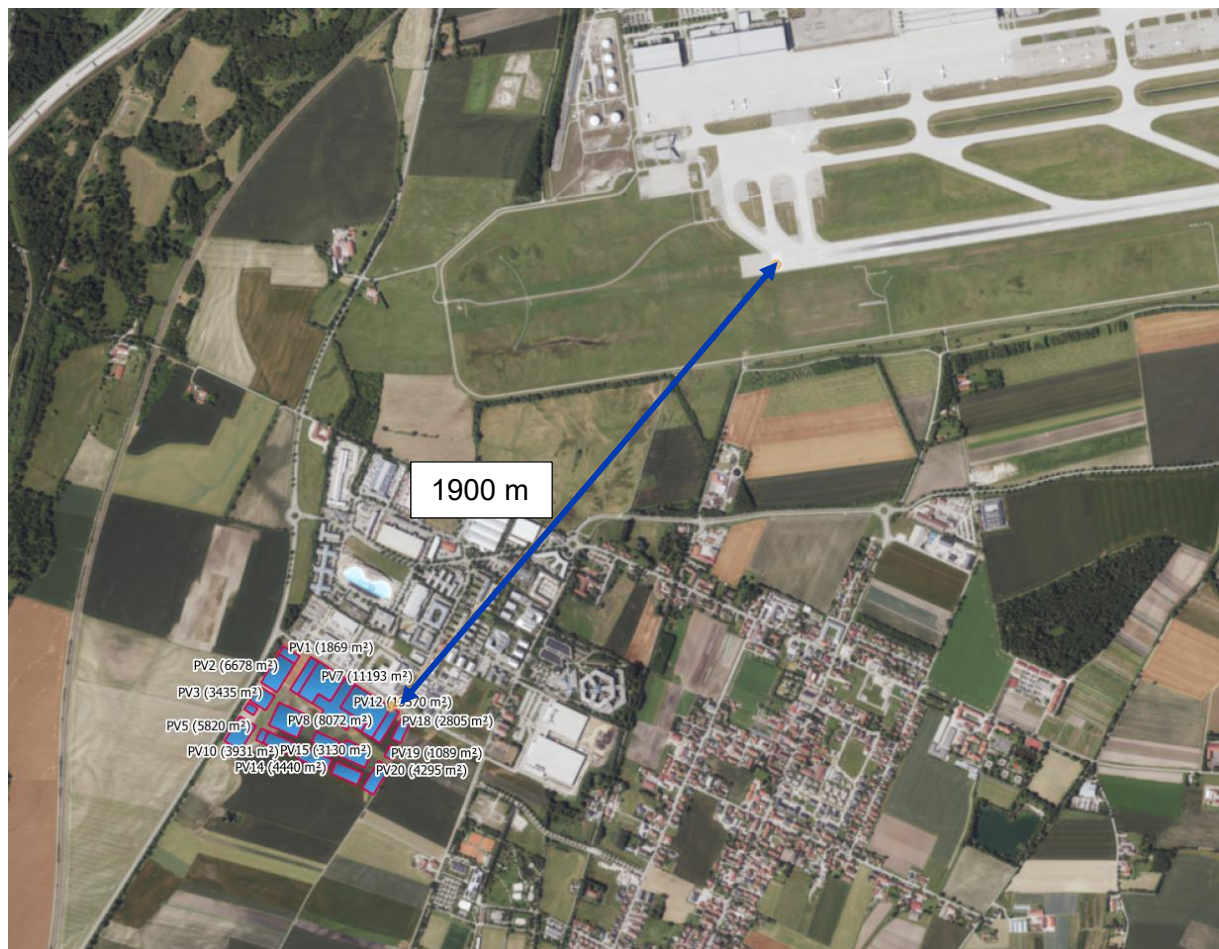


Abbildung 14: Lage der PV-Anlagen – Quelle Luftbild: Bayrische Vermessungsverwaltung

7 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung hinsichtlich möglicher Blendwirkungen dargestellt.

Alle Zeitangaben erfolgen in der Mitteleuropäischen Normalzeit (MEZ), die der deutschen Winterzeit entspricht.

Hinweis: Um die dargelegten Auswertungen nachvollziehen zu können, wird empfohlen, Kapitel 3 und 4 zu berücksichtigen.

Hindernisse wie Gebäude wurden in der Simulation nicht berücksichtigt. In der Diskussion werden Gebäude hingegen als blockierende Elemente der Sichtachse berücksichtigt.

7.1 Anflüge

Vorbetrachtung:

Nur bei Anflügen auf die Landebahn 08R befinden sich die PV-Flächen während der letzten zwei Seemeilen des Anflugs innerhalb des relevanten Sichtfelds ($\pm 50^\circ$) und zugleich in einer Entfernung, bei der potenziell störende Blendwirkungen auftreten könnten.

Bei Anflügen auf die Landebahn 08L liegen die PV-Flächen außerhalb des relevanten Sichtfelds. Für Anflüge auf die Landebahnen 26L und 26R beträgt die Entfernung zu den PV-Flächen mehr als 5,5 km, sodass relevante Blendwirkungen generell nicht erwartet werden, da die Flächen aus dieser Distanz keinen signifikanten Bereich im Sichtfeld mehr einnehmen.

Die weiterführende Detailprüfung beschränkt sich daher auf Anflüge auf die Landebahn 08R.

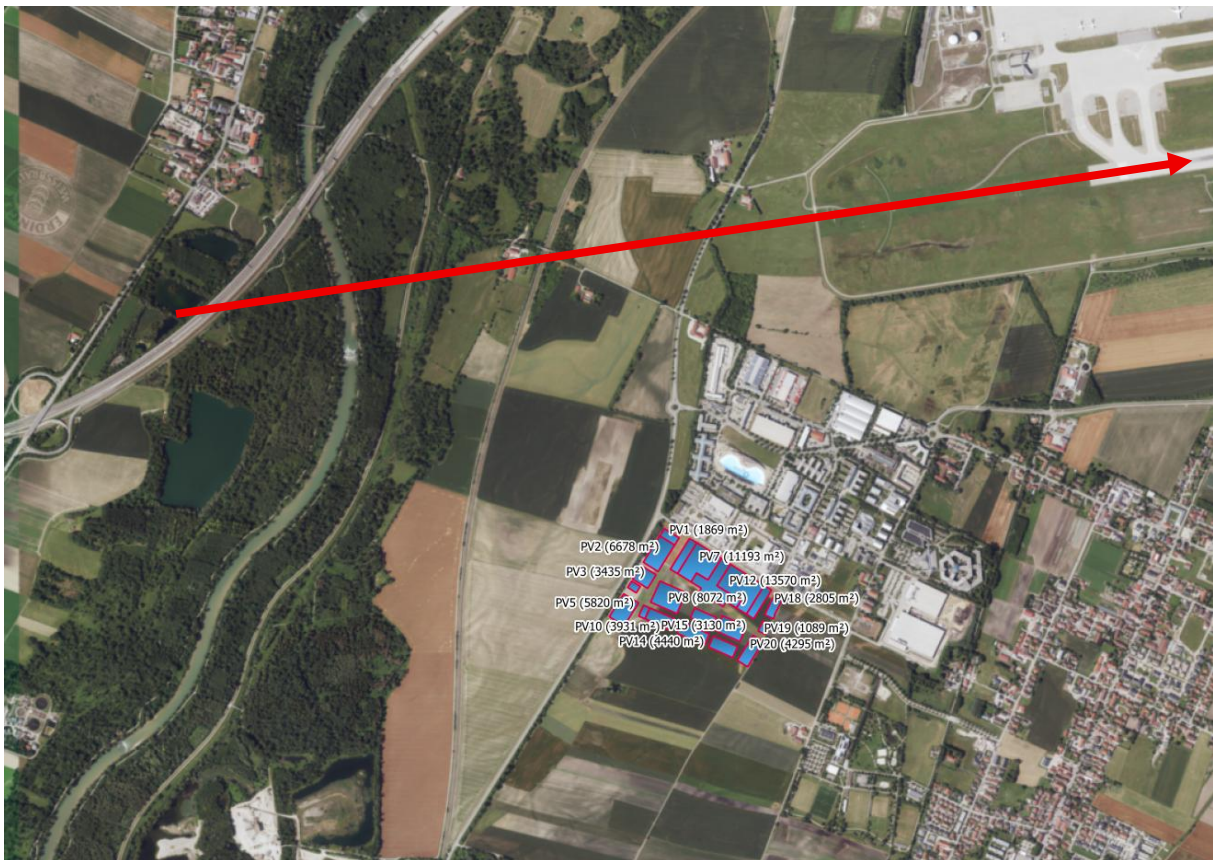


Abbildung 15: Finaler Anflug (2 Seemeilen) auf RWY 08R

Tabelle 3: Ergebnistabelle für die Reflexionen in das relevante Sichtfeld von Piloten während der Anflüge

Landeanflug auf MUC...	Anflugwinkel	Betroffener Landeanflugabschnitt (s. Kapitel 3.5)	Leuchtdichte > 20.000 cd/m²?	Blendwirkungen fallen in Kategorie drei (3) nach Ho et al.?	Überlagert die Sonne die Reflexion vollständig?	Blendwirkung
08L	3°	1,2,3	Ja	Ja	Nein	Unterschiedlich, siehe folgende Tabelle.
08R	3°	n/a (konservative Auswertung, detaillierte Betrachtung nur bei vorliegender Detailplanung der Dachflächen möglich)				Gering bis maximal Moderat (pauschal vertretbar)
26L	3°					
26R	3°					

Tabelle 4: Batch-Ergebnis bzgl. Blendwirkungen bei Anflügen auf die Landebahn 08R

		Modulneigung								
		5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
Azimut	0°									
	20°									
	40°									
	60°									
	80°									
	100°									
	120°									
	140°									
	160°									
	180°									
	200°									
	220°									
	240°									
	260°									
	280°									
	300°									
	320°									
	340°									

	Stärkere Blendwirkungen
	Moderate Blendwirkungen
	Schwache/keine Blendwirkungen

Erklärung der Ergebniskategorien:

- **Keine/geringfügige Blendwirkung:** Es finden keine oder nur vernachlässigbare Blendwirkungen statt.
- **Moderate Blendwirkung:** Es sind Blendwirkungen zu erwarten, die moderat störend wirken können.
- **Stärkere Blendwirkung:** Es sind Blendwirkungen zu erwarten, die erheblich störend wirken können.

Erklärung:

Bei Anflügen auf die Landebahn 08L liegen die PV-Flächen außerhalb des relevanten Sichtfelds. Für Anflüge auf die Landebahnen 26L und 26R beträgt die Entfernung zu den PV-Flächen mehr als 5,5 km, sodass relevante Blendwirkungen generell nicht zu erwarten sind, da die Flächen aus dieser Distanz keinen signifikanten Bereich im Sichtfeld mehr einnehmen.

Bei Anflügen auf die RWY 08R sind Blendwirkungen möglich, die gemäß den Vorgaben der EASA vermieden werden sollten. Um Blendwirkungen auf ein moderates bzw. geringes Maß zu reduzieren oder vollständig zu vermeiden, sollten die in Tabelle 4 dargestellten Ausrichtungen verwendet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, blendarme Module einzusetzen. Hierbei sollten ausschließlich hochwertige, blendreduzierte Module verwendet werden; als Orientierung kann die Definition nach Prof. Bucher herangezogen werden [9].

Detaillierte Aussagen können erst im weiteren Planungsverlauf getroffen werden, wenn die Details zu den Dachflächen und damit zu den PV-Flächen definiert sind.

7.2 Flugverkehrskontrollturm (Tower)

Tabelle 5: Ergebnistabelle für die Blendwirkungen auf die Tower

Szenario	Geprüftes Gebäude	Treten Reflexionen in der Arbeitskabine des Towers auf?	Leuchtdichte > 20.000 cd/m²?	Werden die Reflexionen aus Richtung der Start- und Landebahnen emittiert?	Blendwirkung
PV-Flächen auf Flachdach, beliebige Ausrichtung	Tower	Nein	-	-	Keine Sicht auf die PV-Flächen
	Vorfeldkontrolle West				
	Vorfeldkontrolle Ost				
Steile Dachflächen (z. B. Sheddächer) Richtung Südwesten oder Nordwesten	Tower				
	Vorfeldkontrolle West				
	Vorfeldkontrolle Ost				
Steile Dachflächen (z. B. Sheddächer) Richtung Norden bis Osten	Tower	Ja	Ja	Ja	Stärkere
	Vorfeldkontrolle West	Nein	-	-	Keine Sicht auf die PV-Flächen
	Vorfeldkontrolle Ost	Ja	Ja	Ja	Stärkere

Erklärung der Ergebniskategorien:

- **Keine/geringfügige Blendwirkung:** Es finden keine oder nur vernachlässigbare Blendwirkungen statt.
- **Stärkere Blendwirkung:** Es sind Blendwirkungen zu erwarten, die erheblich störend wirken können.

Erklärung:

Wenn die PV-Flächen auf Flachdächern oder steilen Dächern (z. B. Sheddächern) von Südosten/Süden bis nach Nordwesten ausgerichtet werden, sind relevante Reflexionen auf die Tower auszuschließen, da sie aufgrund der Entfernung nicht oder nur in nicht signifikantem Maße einsehbar sind.

Vermieden werden sollten jedoch hohe, steile Dächer (Dachneigung >10°) mit PV-Flächen in Richtung Norden bzw. Nordosten/Osten. Können die genannten Ausrichtungen nicht vermieden werden, besteht die Möglichkeit, blendarme Module einzusetzen. Hierbei sollten ausschließlich hochwertige, blendreduzierte Module verwendet werden; als Orientierung kann die Definition nach Prof. Bucher herangezogen werden [9].

Unter der Annahme, dass aufgrund der Dachform eine signifikante Einsehbarkeit der PV-Flächen besteht, ergibt sich die folgende Ergebnistabelle der Batch-Analyse. Die Ergebnisse zeigen, dass Modulausrichtungen von Südosten bis Nordwesten keine Reflexionen in Richtung der Tower emittieren können.

Tabelle 6: Batch-Analyse: Blendwirkungen auf die Tower (Annahme: Hohe Einsehbarkeit der PV-Flächen durch entsprechende Dachformen)

		Modulneigung								
		5	10	15	20	25	30	35	40	45
Azimut	0									
	20									
	40									
	60									
	80									
	100									
	120									
	140									
	160									
	180									
	200									
	220									
	240									
	260									
	280									
	300									
320										
340										

Starke Blendwirkung

Moderate Blendwirkung

Schwache/Keine Blendwirkung

7.3 Rollen am Boden

Tabelle 7: Ergebnistabelle für die Reflexionen in das relevante Sichtfeld von Piloten während des Rollens am Boden

Szenario	Lande- und Startbahnen inkl. Verbindungswege	Leuchtdichte > 20.000 cd/m²?	Blendwirkungen fallen in Kategorie drei (3) nach Ho et al.?	Überlagert die Sonne die Reflexion?	Blendwirkung
PV-Flächen auf Flachdach, beliebige Ausrichtung	alle	-	-	-	Keine Sicht auf die PV-Flächen
Steile Dachflächen (z. B. Sheddächer) Richtung Südwesten oder Nordwesten		-	-	-	Keine Sicht auf die PV-Flächen
Steile Dachflächen (z. B. Sheddächer) Richtung Norden bis Osten		-	n/a	n/a	Potenziell stärkere

Erklärung:

Wenn die PV-Flächen auf Flachdächern oder steilen Dächern (z. B. Sheddächern) nach Südwesten und Nordwesten ausgerichtet werden, sind relevante Reflexionen auf die Rollbahnen auszuschließen, da sie aufgrund der Entfernung nicht oder nur in nicht signifikantem Maße einsehbar sind.

Vermieden werden sollten jedoch hohe, steile (Dachneigung >10°) Dächer mit PV-Flächen in Richtung Norden bzw. Nordosten/Osten. Können die genannten Ausrichtungen nicht vermieden werden, besteht die Möglichkeit, blendarme Module einzusetzen. Hierbei sollten ausschließlich hochwertige, blendreduzierte Module verwendet werden; als Orientierung kann die Definition nach Prof. Bucher herangezogen werden [9].

Detaillierte Auswertungen sind erst im weiteren Planungsverlauf möglich, wenn die Geometrie der PV-Flächen bzw. der Dächer definiert sind. Die Aussagen bleiben jedoch weiterhin gültig.

Unter der Annahme, dass aufgrund der Dachform eine signifikante Einsehbarkeit der PV-Flächen besteht, gilt die Ergebnismatrix aus Kapitel 7.1.1.

8 Bewertung der Ergebnisse

Im Rahmen der Begutachtung wurden die potenziellen Blendwirkungen der geplanten Photovoltaik-Dachanlagen (PVA) im Südwesten des Flughafens München untersucht. Hierfür kam eine spezifische Bewertungsmethodik zur Anwendung, die im Bericht ausführlich erläutert wird.

Die Analyse der Anflüge bezog sich auf lineare Anflugsegmente über eine Distanz von 2 Seemeilen (ca. 3,7 km) bis zum Aufsetzpunkt, wobei ein Anflugwinkel von 3° zugrunde gelegt wurde. Darüber hinaus wurden die Tower (Flugverkehrskontrollturm sowie die Vorfeldkontrolltürme West und Ost) und die Rollbahnen betrachtet.

Zusammenfassend zeigt die Blendbetrachtung, dass relevante Blendwirkungen durch die geplanten PV-Flächen überwiegend ausgeschlossen werden können. Erhebliche Situationen (gemäß der angewandten Auswertungsmethodik) treten im Wesentlichen nur bei Anflügen auf die Landebahn 08R sowie bei bestimmten Modulausrichtungen auf. Potenziell relevante Blendwirkungen auf Tower und Rollbahnen können lediglich bei steilen Dachformen mit Ausrichtung nach Norden bzw. Nordosten/Osten entstehen (z. B. bei Sheddächern).

Um mögliche Blendwirkungen zu minimieren, sollten bestimmte Modulausrichtungen vermieden werden. Insbesondere hohe, steile (Dachneigung >10°) Dachflächen/PV-Flächen mit Ausrichtung nach Norden, Nordosten, Osten sind nach Möglichkeit zu vermeiden.

Falls potenziell blendverursachende Ausrichtungen aus planerischen Gründen erforderlich sind, wird der Einsatz hochwertiger, blendreduzierter PV-Module empfohlen. Als Orientierung kann hierbei die Definition nach Prof. Bucher herangezogen werden [9]. Zudem sollte die Eignung der Module stets vom Hersteller bestätigt werden.

Die Ergebnisse stellen eine konservative Vorbewertung dar. Detailliertere Aussagen zu möglichen Blendwirkungen können erst im weiteren Planungsverlauf getroffen werden, sobald die konkreten Dachgeometrien, Ausrichtungen und PV-Flächen definiert sind. Die Bewertungen wurden jedoch bewusst konservativ gewählt, um für den weiteren Planungsverlauf eine Orientierung zu bieten.

Im weiteren Planungsverlauf sollte eine abschließende Bewertung auf Basis konkreter Parameter durchgeführt werden. Dadurch könnten die vorgeschlagenen Maßnahmen voraussichtlich auf spezifische und klar abgegrenzte Bereiche eingegrenzt werden.

		Modulneigung in °								
		5	10	15	20	25	30	35	40	45
Azimut in °	0									
	20									
	40									
	60									
	80									
	100									
	120									
	140									
	160									
	180									
	200									
	220									
	240									
	260									
	280									
	300									
320										
340										

Starke Blendwirkung

Moderate Blendwirkung

Schwache/keine Blendwirkung

Blendgutachten

Literaturverzeichnis

- [1] K. Mertens, *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, 5. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2020.
- [2] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), *Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen (Leitfaden)*. 2012. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/lichthinweise-2015-11-03mit-formelkorrektur_aus_03_2018_1520588339.pdf
- [3] Volker Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*, 9. Aufl. Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [4] J. Yellowhair und C. K. Ho, „Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts“, San Diego, California, USA: American Society of Mechanical Engineers, Juni 2015, S. V002T11A003. doi: 10.1115/ES2015-49481.
- [5] J. A. Duffie und W. A. Beckman, „Solar Engineering of Thermal Processes“, Bd. 4, 2013.
- [6] European Aviation Safety Agency, „Certification Specifications and Guidance Material for Aerodromes Design CS-ADR-DSN“. 2021. Zugegriffen: 7. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/document-library/certification-specifications/cs-adr-dsn-issue-6>
- [7] C. K. Ho, C. M. Ghanbari, und R. B. Diver, „Methodology to Assess Potential Glint and Glare Hazards From Concentrating Solar Power Plants: Analytical Models and Experimental Validation“, *Journal of Solar Energy Engineering*, Bd. 133, Nr. 3, S. 031021, Aug. 2011, doi: 10.1115/1.4004349.
- [8] Jason A- Rogers, Clifford K. Ho, Andrew Mead, Angel Millan, Melissa Beben, und Gena Drechsler, „Evaluation of Glare as a Hazard for General Aviation Pilots on Final Approach“. 2015. Zugegriffen: 15. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/2010s/media/201512.pdf
- [9] Peter Toggweiler, Dr. Andreas Bohren, Prof. Dr. Christof Bucher, und Thomas Rechsteiner, „Stand der Technik zu blendarmen Oberflächen bei PV-Modulen“. EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWWRtaW4uY2gvZGUVcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmVvYWQvMTE5OTY=.html>

Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT



4. Assumptions and Limitations

Below is a list of assumptions and limitations of the models and methods used in SGHAT:

- The software currently only applies to flat reflective surfaces. For curved surfaces (e.g., focused mirrors such as parabolic troughs or dishes used in concentrating solar power systems), methods and models derived by Ho et al. (2011) [1] can be used and are currently being evaluated for implementation into future versions SGHAT.
- SGHAT does not rigorously represent the detailed geometry of a system; detailed features such as gaps between modules, variable height of the PV array, and support structures may impact actual glare results. However, we have validated our models against several systems, including a PV array causing glare to the air-traffic control tower at Manchester-Boston Regional Airport and several sites in Albuquerque, and the tool accurately predicted the occurrence and intensity of glare at different times and days of the year.
- SGHAT assumes that the PV array is aligned with a plane defined by the total heights of the coordinates outlined in the Google map. For more accuracy, the user should perform runs using minimum and maximum values for the vertex heights to bound the height of the plane containing the solar array. Doing so will expand the range of observed solar glare when compared to results using a single height value.
- SGHAT does not consider obstacles (either man-made or natural) between the observation points and the prescribed solar installation that may obstruct observed glare, such as trees, hills, buildings, etc.
- The variable direct normal irradiance (DNI) feature (if selected) scales the user-prescribed peak DNI using a typical clear-day irradiance profile. This profile has a lower DNI in the mornings and evenings and a maximum at solar noon. The scaling uses a clear-day irradiance profile based on a normalized time relative to sunrise, solar noon, and sunset, which are prescribed by a sun-position algorithm [2] and the latitude and longitude obtained from Google maps. The actual DNI on any given day can be affected by cloud cover, atmospheric attenuation, and other environmental factors.
- The ocular hazard predicted by the tool depends on a number of environmental, optical, and human factors, which can be uncertain. We provide input fields and typical ranges of values for these factors so that the user can vary these parameters to see if they have an impact on the results. The speed of SGHAT allows expedited sensitivity and parametric analyses.
- Single- and dual-axis tracking compute the panel normal vector based on the position of the sun once it is above the horizon. Dual-axis tracking does not place a limit on the angle of rotation, unless the sun is below the horizon. For single-axis tracking, a maximum angle of rotation can be applied to both the clockwise and counterclockwise directions.

Ausschnitt wurde dem SGHAT-Handbuch (Solar Glare Hazard Analysis Tool) entnommen. Das vollständige Handbuch kann unter folgendem Link gefunden werden:

https://forgesolar.com/static/docs/SGHAT3-GlareGauge_user_manual_v1.pdf