SONNWINN GmbH
Unabhängige Experten für Photovoltaik und Stromspeicher

BLENDGUTACHTEN

PVA HÜRTGENWALD FLUGVERKEHR
VERSION 1.0

Bearbeitet:

SONNWINN GmbH
Sachverständiger für Photovoltaik
Mathias Röper, M. Eng.

Achter de Schün 1
25436 Moorrege
+49 (0) 4122 509100
mathias.roeper@sonnwinn.de
www.sonnwinn.de

Moorrege, 26.08.2025

Revisionstabelle

Version	Änderung	Datum	Name
1.0	Erste Fassung	26.08.2025	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 Flugplatz Düren-Hürtgenwald 15
6 Übersicht der geplanten PV-Anlage 16
7 Auswertung 17
7.1 Flugbetrachtung 17
7.2 Anflüge 18
7.3 Rollen am Boden 24
8 Zusammenfassung 25
9 Literaturverzeichnis 27
Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT 28

1 Einleitung

Die VDH Projektmanagement GmbH hat die SONNWINN GmbH damit beauftragt, die potenziellen Blendwirkungen der geplanten PVA in Hürtgenwald im Hinblick auf den Flugbetrieb des Flugplatzes Düren-Hürtgenwald zu untersuchen und zu bewerten.

1.1 Fragestellung

Es gilt zu klären, ob die Solarmodule der geplanten Photovoltaikanlage Sonnenlicht so reflektieren, dass dadurch erhebliche Beeinträchtigungen für den umliegenden Flugverkehr bzw. den Flugbetrieb entstehen könnten. Dieses Gutachten verfolgt das Ziel, diese Frage zu beantworten und darzulegen, ob sowie mit welcher Häufigkeit Blendwirkungen auftreten können. Darüber hinaus werden die Ergebnisse entsprechend bewertet.

Im speziellen sollen folgende Bereiche ausgewertet werden:

- Platzrunden
- 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.

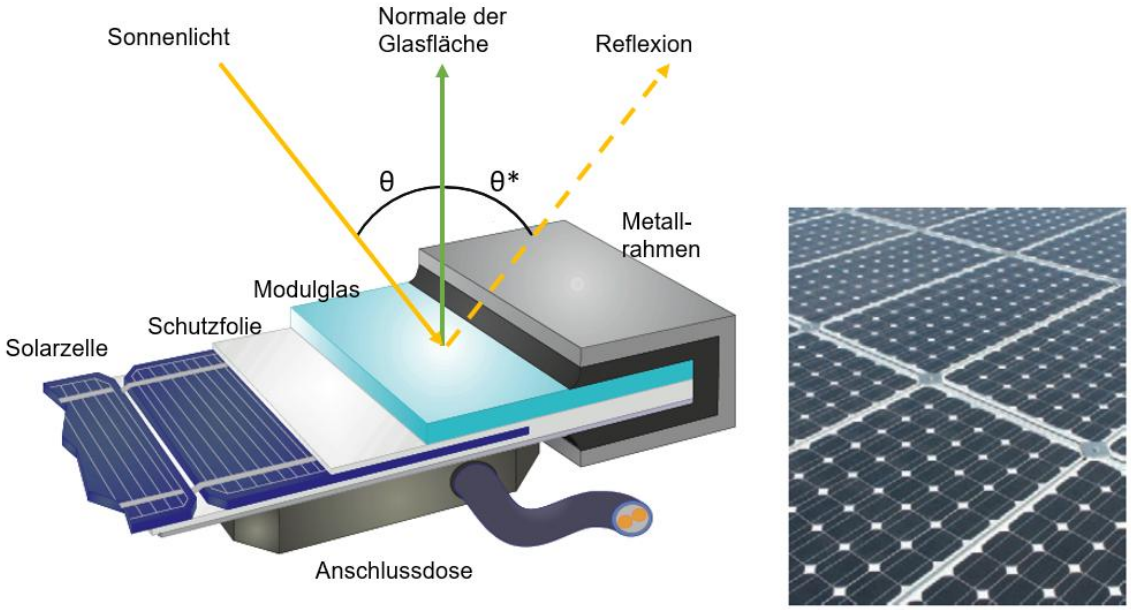


Abbildung 1: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ – Quelle: [3] (modifiziert)

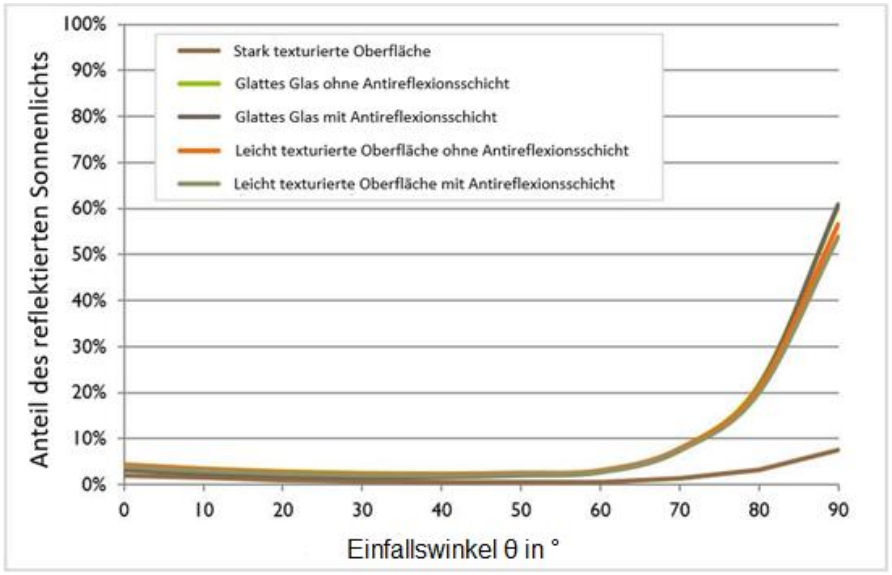


Abbildung 2: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypen – Quelle: [4], modifiziert

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].

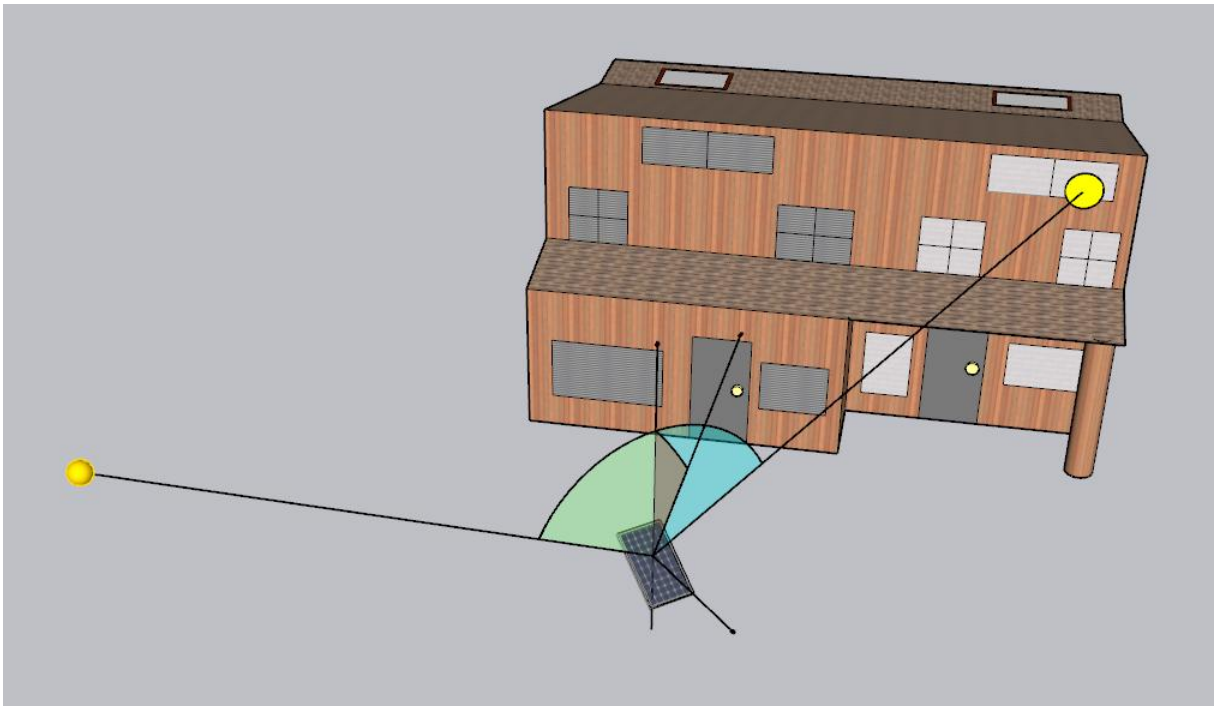


Abbildung 4: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion – Quelle: Eigene Abbildung

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 Entscheidungshöhe[1] 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 fest, 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 Piloten während des Rollens auf den Start- und Landebahnen.
3. 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 ≤ 20.000 cd/m² 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/m². 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/m² 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 cd/m² 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 werden[3]:

(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 vorrübergehende 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 ± 50° (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 werde auch simulationstechnisch nicht erfasst.

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die relevanten Sichtfelder.



Abbildung 5: Darstellung einer Blendwirkung im relevanten Sichtfeld - Quelle: [9]

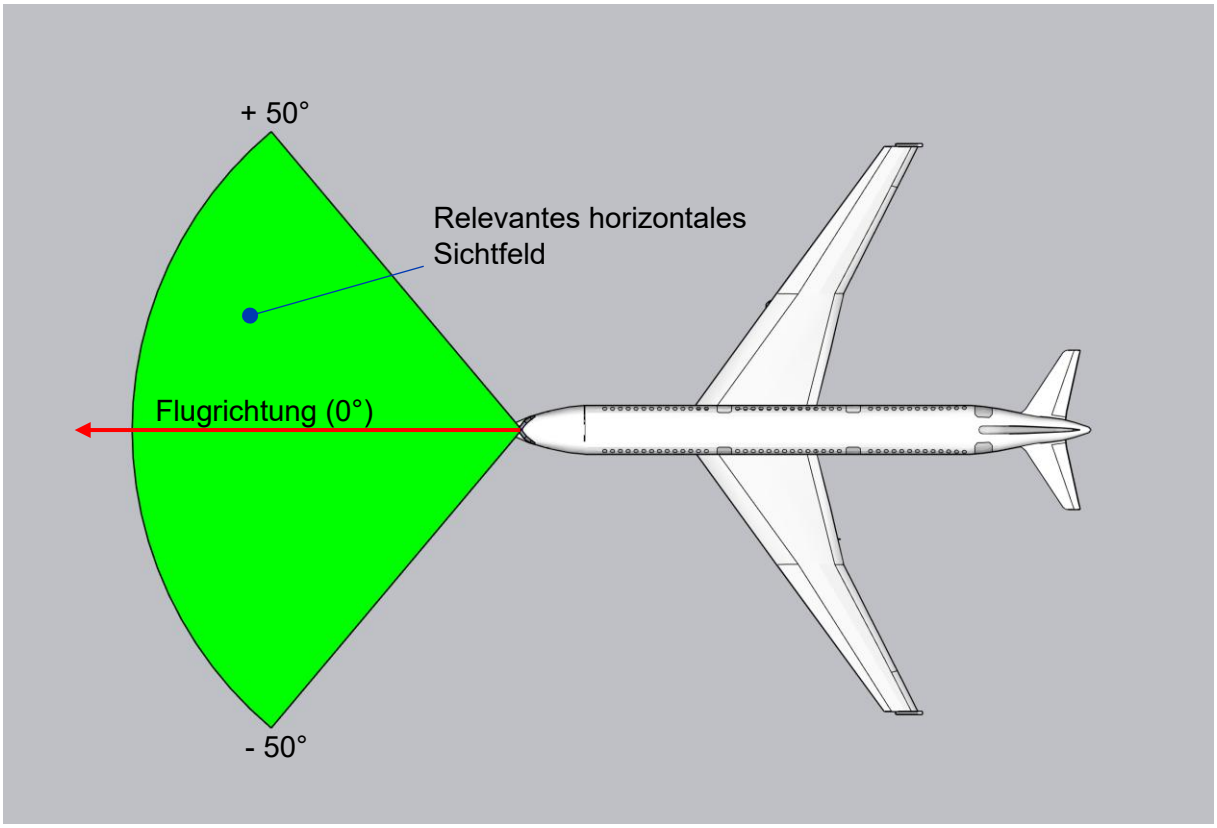


Abbildung 6: Darstellung des relevanten horizontalen Sichtfelds: Außerhalb von 50° zur Flugrichtung sind Reflexionen irrelevant. - Quelle Abbildung: Eigene Abbildung

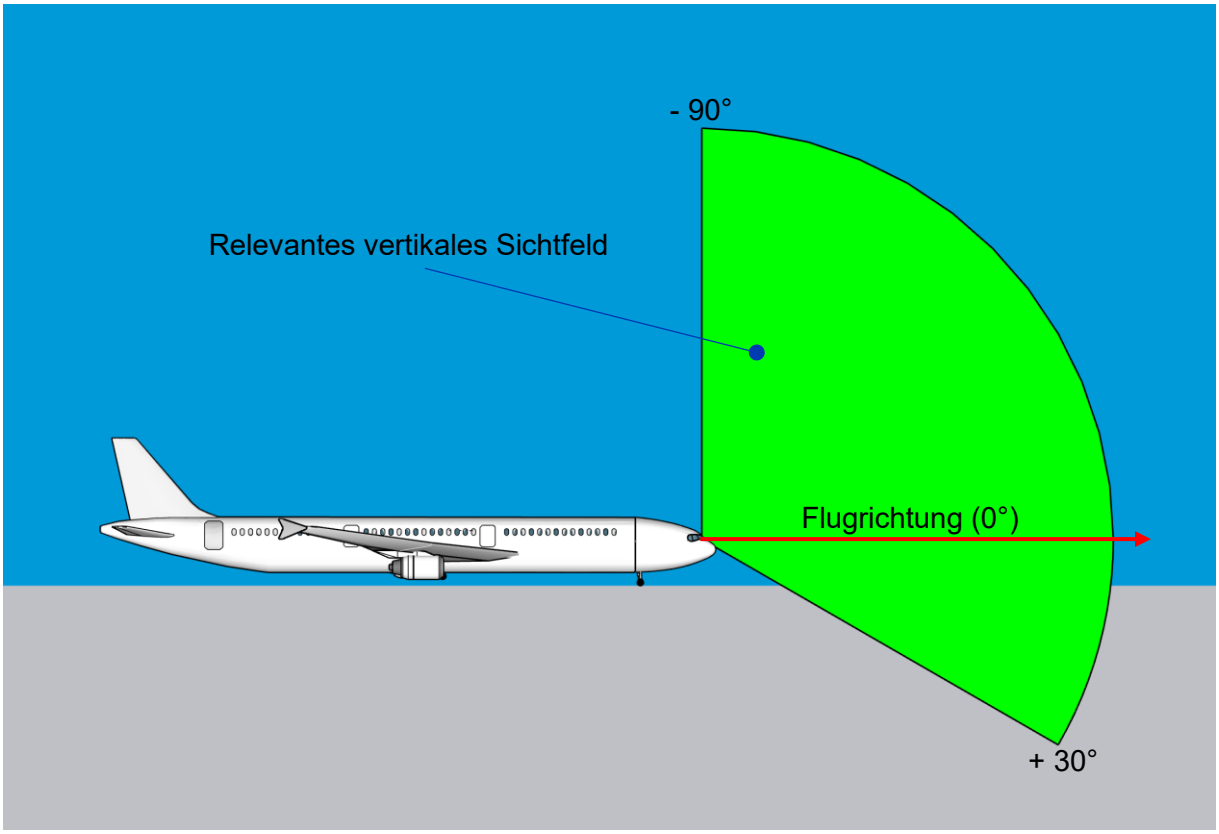


Abbildung 7: Darstellung des relevanten vertikalen Sichtfelds: Ab 30° gegen Boden ist dieses eingeschränkt. - Quelle Abbildung: Eigene Abbildung

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.

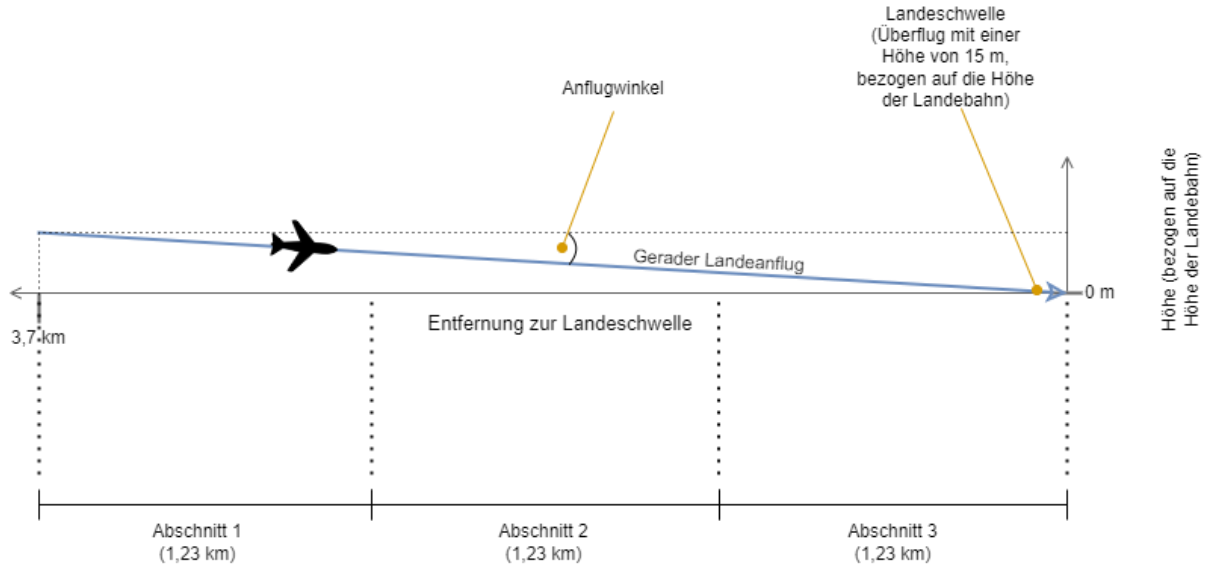


Abbildung 8: Skizze eines modellierten/simulierten Anflugs

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 ≤ 20.000 cd/m² beträgt, findet keine relevante Blendwirkung statt. Wenn sie > 20.000 cd/m² 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.

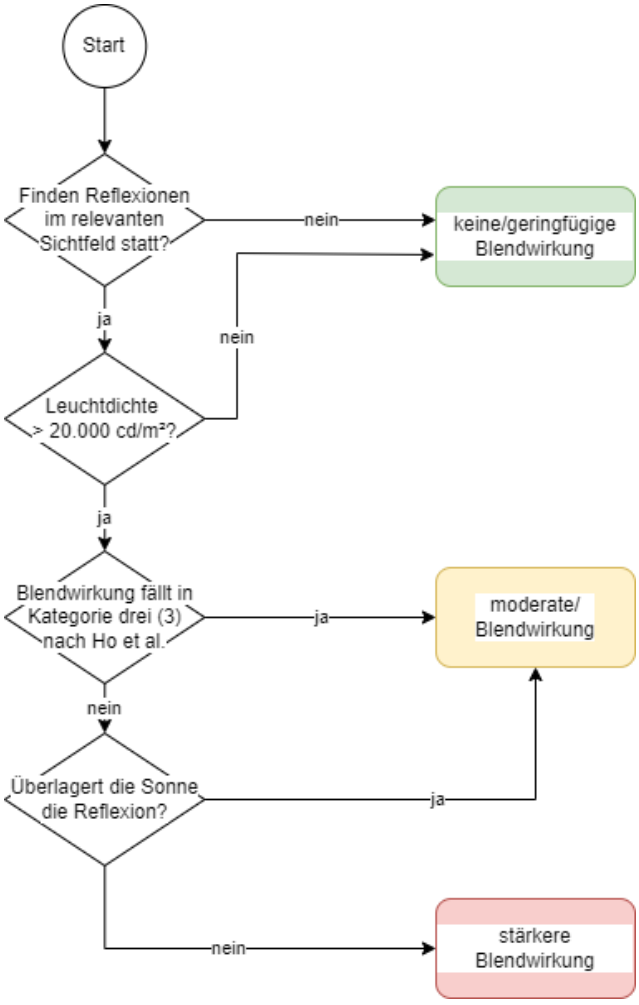


Abbildung 9: Bewertungsmethodik als Entscheidungsbaum für PVA-bedingte Blendwirkungen auf Piloten während eines Landeanflugs oder beim Rollen am Boden

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.

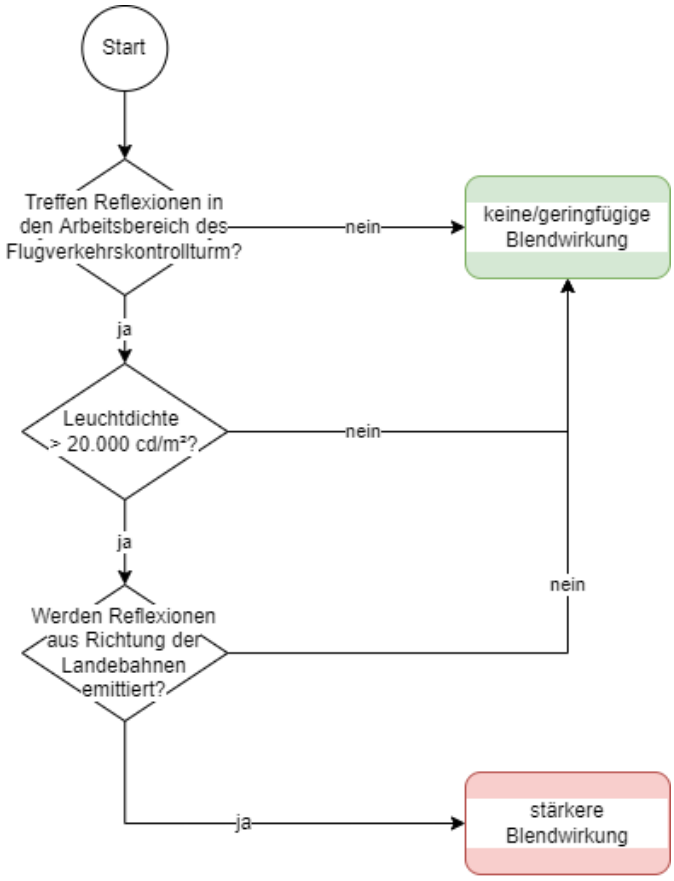


Abbildung 10: Bewertungsmethodik als Entscheidungsbaum für PVA-bedingte Blendwirkungen auf Fluglotsen im Flugverkehrskontrollturm

5 Flugplatz Düren-Hürtgenwald

Der Flugplatz Düren-Hürtgenwald besitzt eine Start- und Landebahn. Eine Landebahn wird je nach Anflugrichtung unterschiedlich benannt.

(1) 06/24: 920 m × 30 m Gras

Neben den linearen Anflügen werden die Rollbahn sowie die Platzrunden für den Segel- und Motorflug auf Blendwirkungen hin untersucht.

Im Folgenden sind die Anflugrichtungen auf die Landebahnen aufgeführt. (Norden = 0°):

- RWY 06: 58°
- RWY 24: 238°

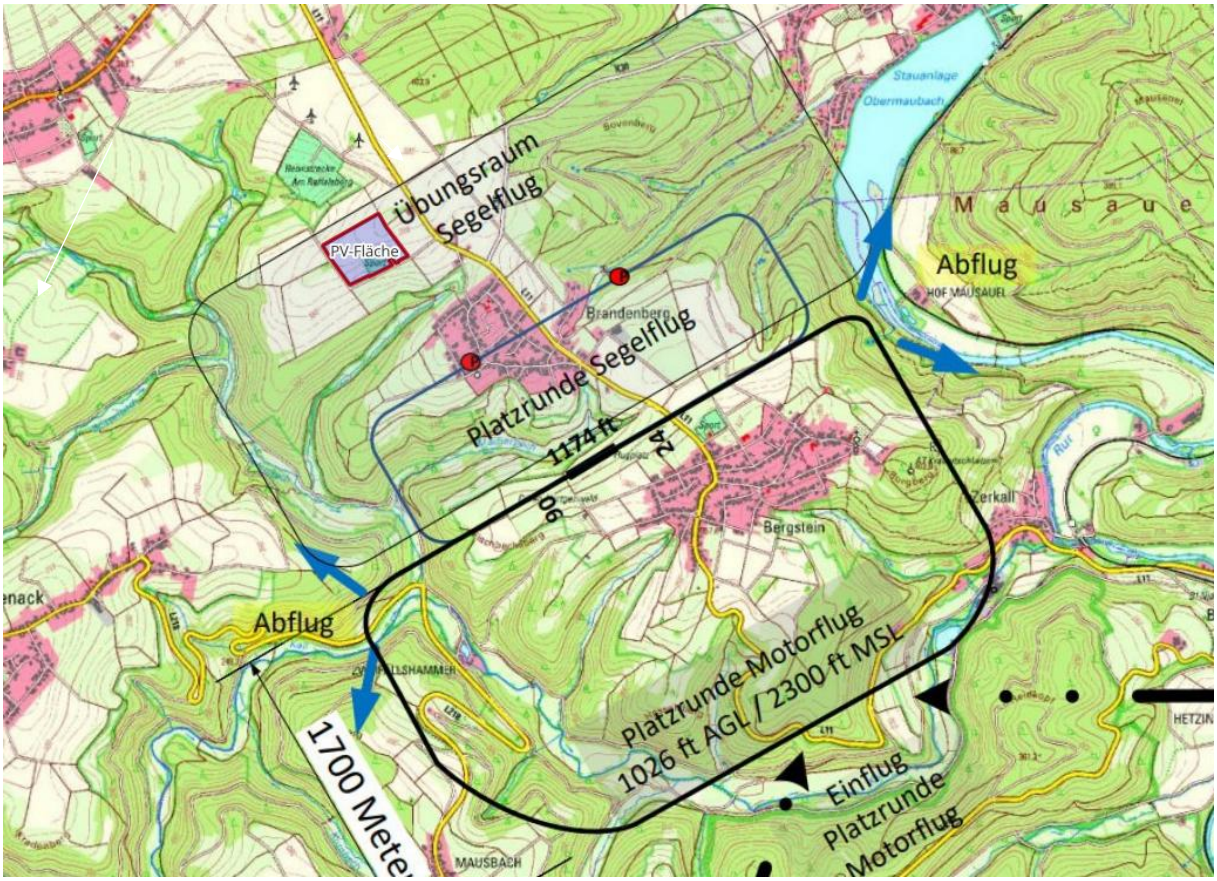


Abbildung 11: Übersicht Flughafen samt Platzrunden und PV-Fläche - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

6 Übersicht der geplanten PV-Anlage

Geplant ist eine Freiflächen-PVA ca. 1400 Meter nordwestlich der Start- und Landebahn.

Tabelle 2: PVA-Parameter

PVA-Parameter	Wert / Angabe
Geokoordinaten (Breite, Länge)	50.704346, 6.402947
Art der Anlage	Freiflächenanlage
Modultyp	Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung
Aufständerung	Fest aufgeständert
PV-Fläche	ca. 8,5 ha
Nennleistung (DC)	-
Modulausrichtung (Azimut)	150° Südost
Modulneigung	18°
Höhe Modulunterkante	angenommen: 0,8 m (es wird angenommen, dass die Tische entsprechend der Modulunterkante an die Topografie angepasst werden, sodass die Moduloberkanten variabel und entsprechend ggf. höher ausfallen)
Höhe Moduloberkante	angenommen: ca. 3 m (bei flachem Terrain)

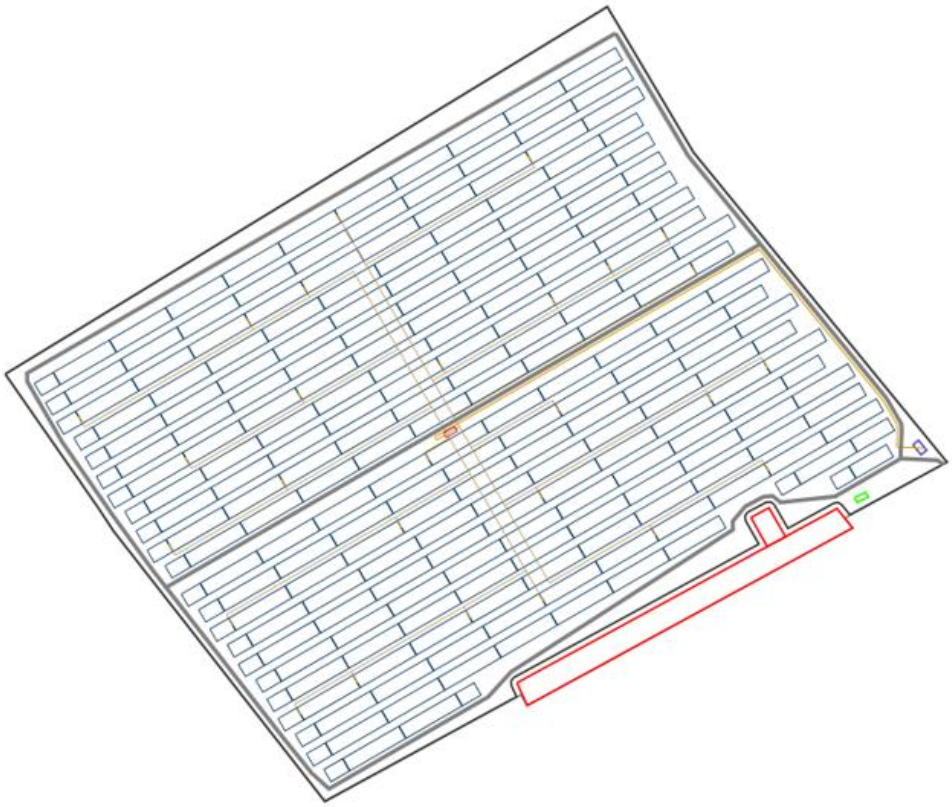


Abbildung 12: Belegungsplan – Quelle: Auftraggeber

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 Flugbetrachtung

Zur Bewertung der Blendwirkungen auf die Platzrunden wurden spezifische „Observationspunkte“ (OP) definiert, die in der Simulation als Detektionspunkte für auftreffende Reflexionen dienen.

Insgesamt wurden 20 OP zur Analyse der Blendwirkungen auf die Verkehrswege festgelegt:

- OP F1 bis F10 für die Platzrunde Segelflug bei Flügen in Richtung PVA.
- OP F11 und F12 für den Abflug und Endanflug.
- OP F13 bis F20 für die Platzrunde Motorflug bei Flügen in Richtung PVA.

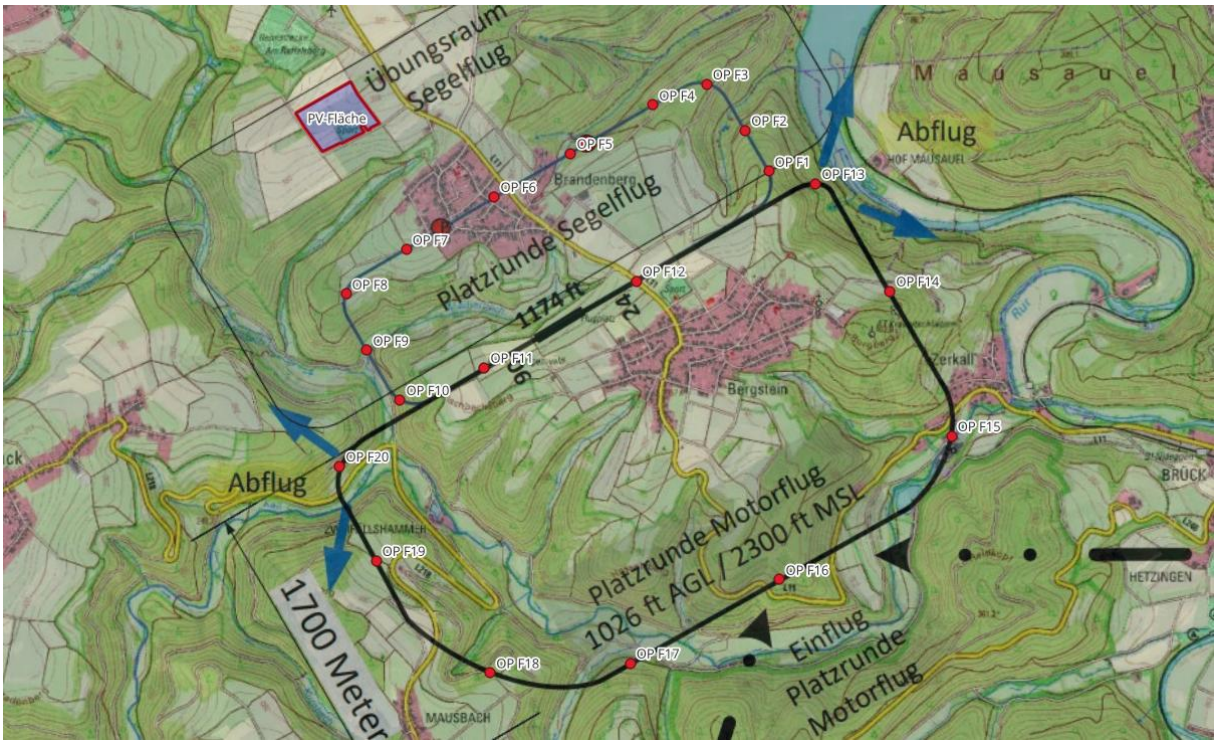


Abbildung 13: Position der Observationspunkte OP Fx entlang der Platzrunden

7.2 Anflüge

Tabelle 3: Ergebnistabelle für die Reflexionen in das relevante Sichtfeld von Piloten während der Platzrunde samt An- und Abflügen

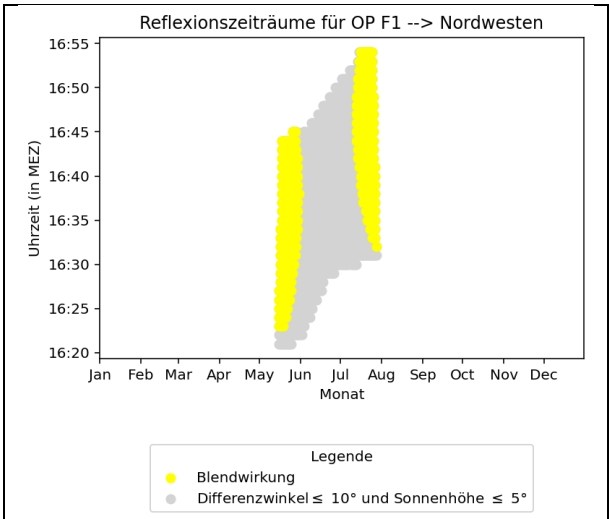
OP	Angenommene Flughöhe	Min. Winkel zwischen Fahrtrichtung und Blendquelle (ca.)	Leucht-dichte > 20.000 cd/m²?	Blend-wirkungen fallen in Kategorie drei (3) nach Ho et al.?	Über-lagert die Sonne die Reflexion ?	Blendwirkung
F1	100 m	45°	ja	ja	nein	Moderate Blendwirkungen
F2	150 m	49°	ja	ja	ja	Geringfügige Blendwirkungen
F3	150 m	4°	ja	ja	nein	Moderate Blendwirkungen
F4	150 m	17°	ja	ja	nein	Moderate Blendwirkungen
F5	150 m	25°	ja	ja	nein	Moderate Blendwirkungen
F6	150 m	39°	ja	ja	nein	Moderate Blendwirkungen
F7	150 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F8	150 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F9	150 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F10	100 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F11	100 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F12	100 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F13	100 m	8°	ja	ja	nein	Moderate Blendwirkungen
F14	150 m	46°	ja	ja	nein	Moderate Blendwirkungen
F15	150 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F16	150 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F17	150 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F18	150 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F19	150 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen
F20	100 m	-	-	-	-	Keine Blendwirkungen

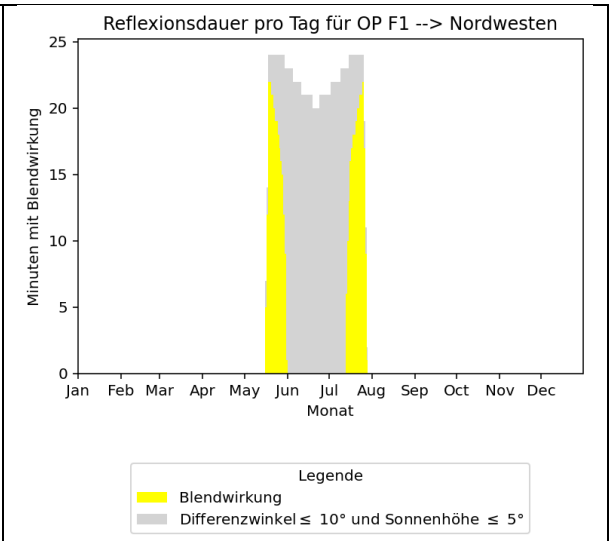
Erklärung der Ergebniskategorien:

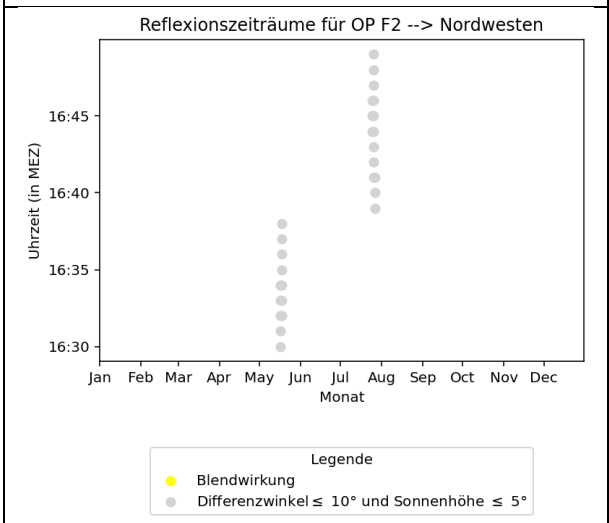
- **Keine/geringfügige Blendwirkung**: Es finden keine oder nur vernachlässigbare Blendwirkungen statt.
- **Moderate Blendwirkung**: Es sind Blendwirkungen zu erwarten, die moderat störend wirken können.
- **Stärkere Blendwirkung**: Es sind Blendwirkungen zu erwarten, die erheblich störend wirken können.

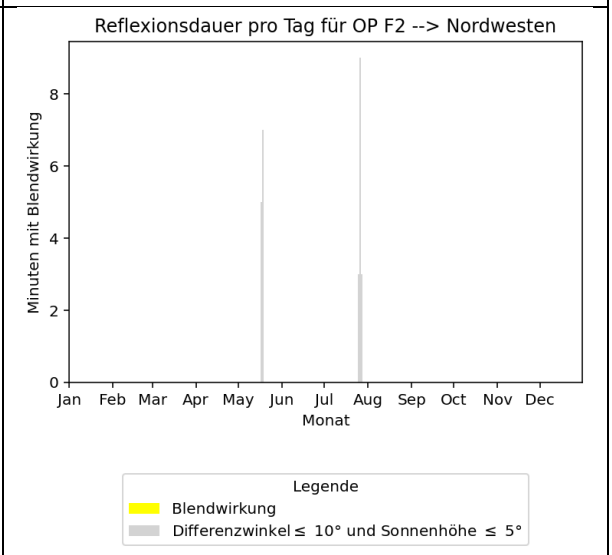
Erklärung:
Es werden Reflexionen mit moderater Blendwirkungen in die Cockpits von Flugzeugen auf den Platzrunden emittiert. Hauptsächlich betroffen ist der Abschnitt südöstlicher der PVA in Flugrichtung Nordwesten bzw. Südwesten.

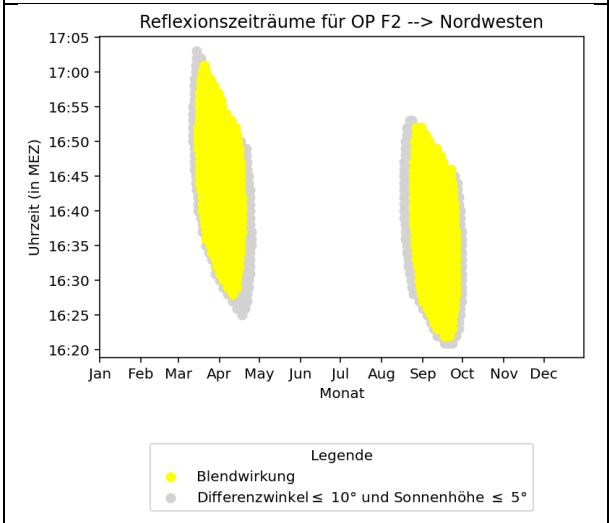
Tabelle 4: Reflexionszeiträume in das relevante Sichtfeld von Piloten während der Platzrunden samt An- und Abflügen

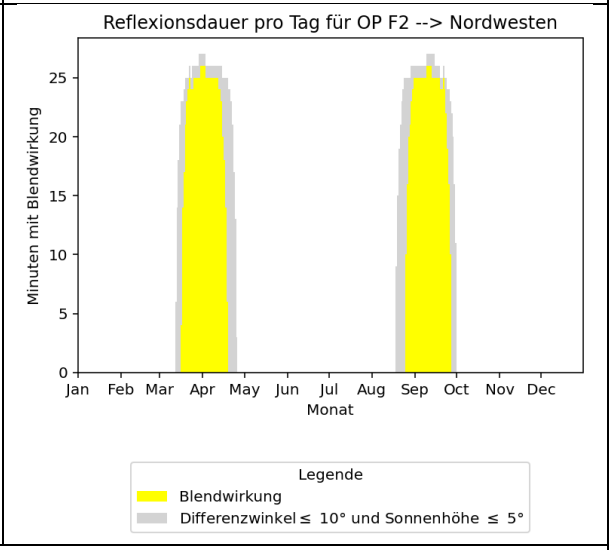




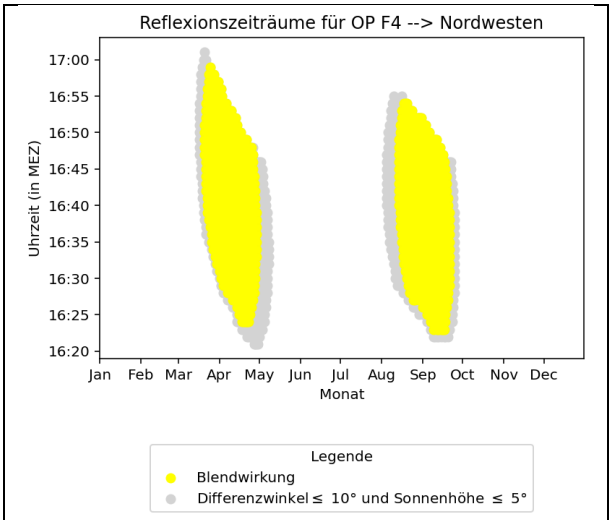


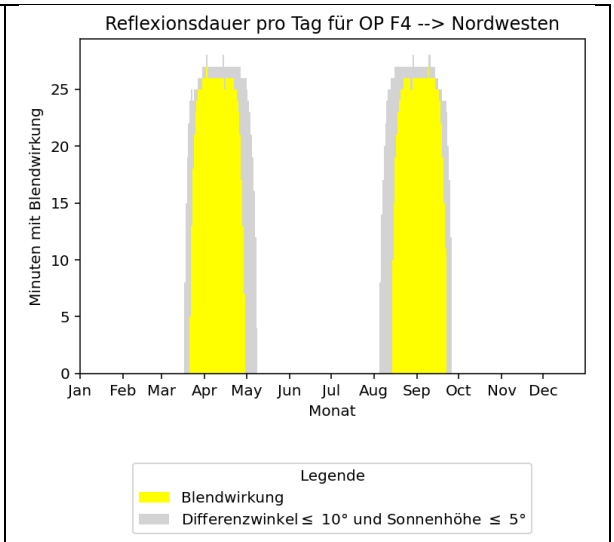


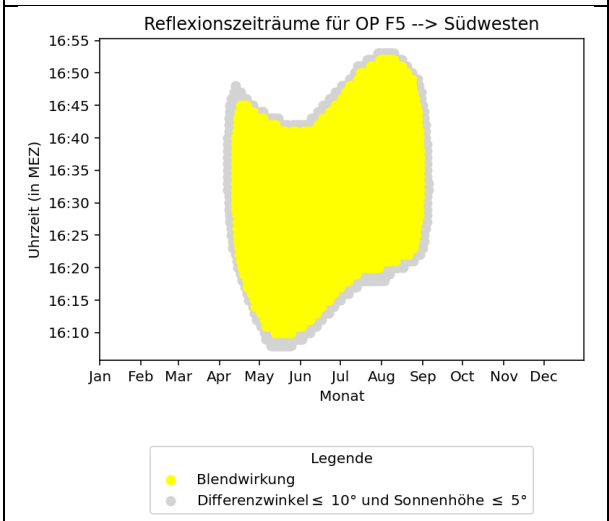


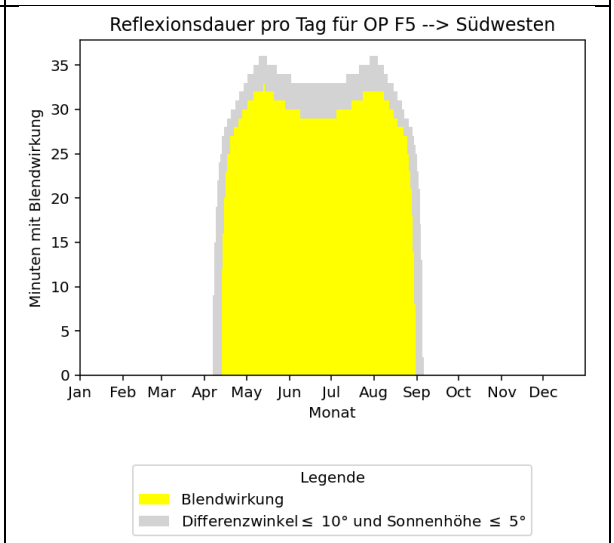


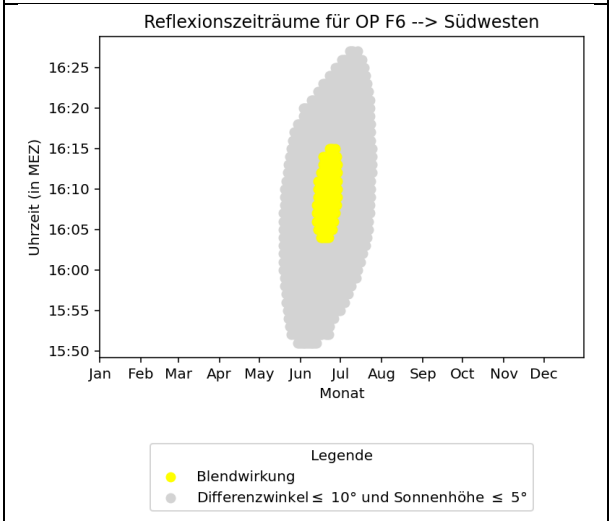
Fortsetzung auf der folgenden Seite.

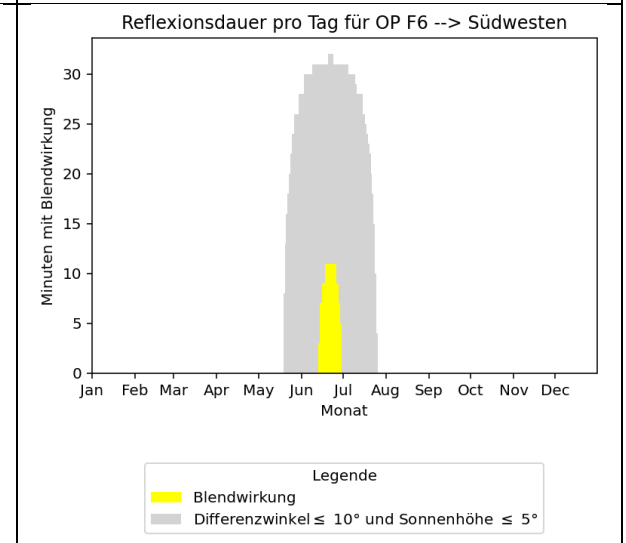












Fortsetzung auf der folgenden Seite.

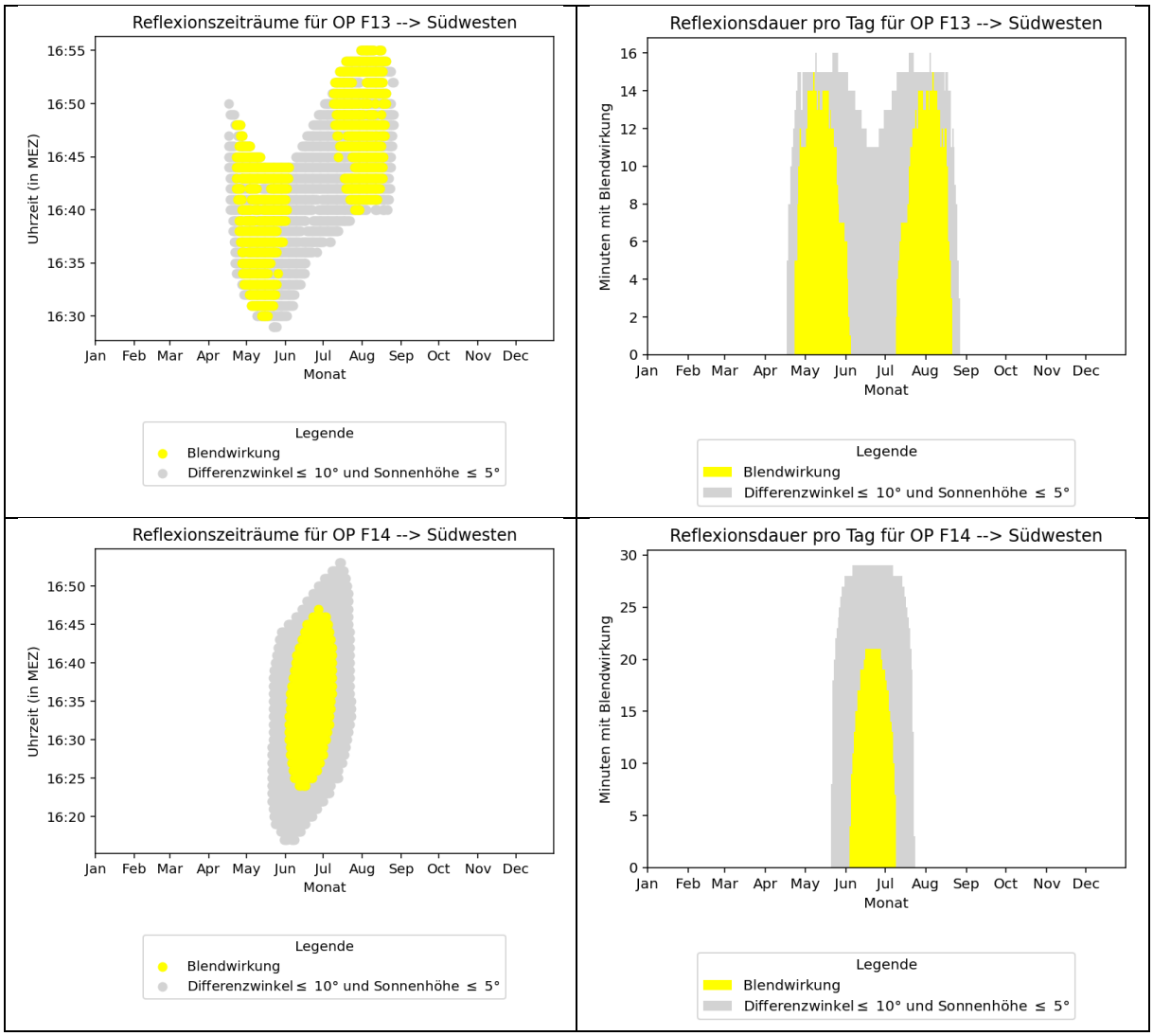
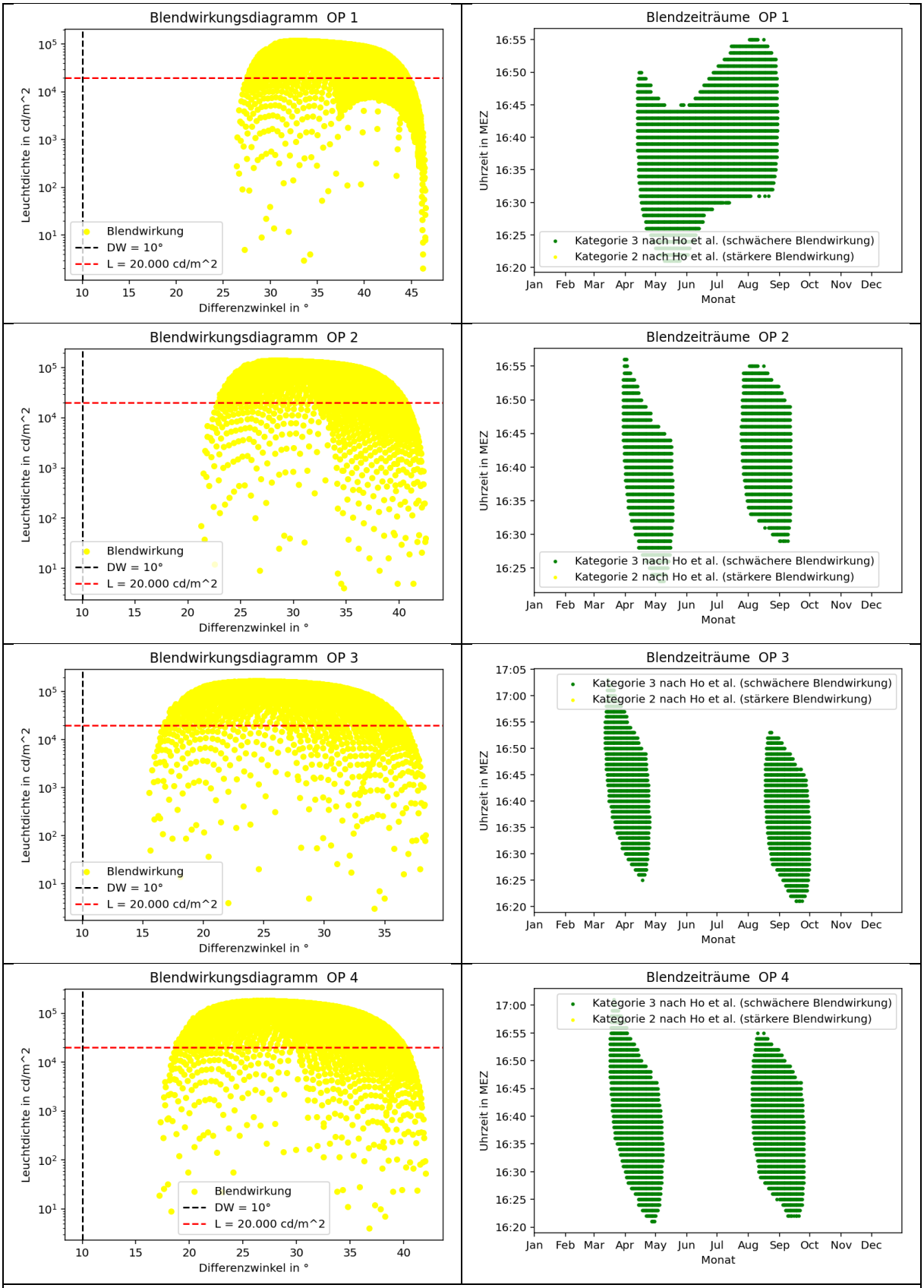
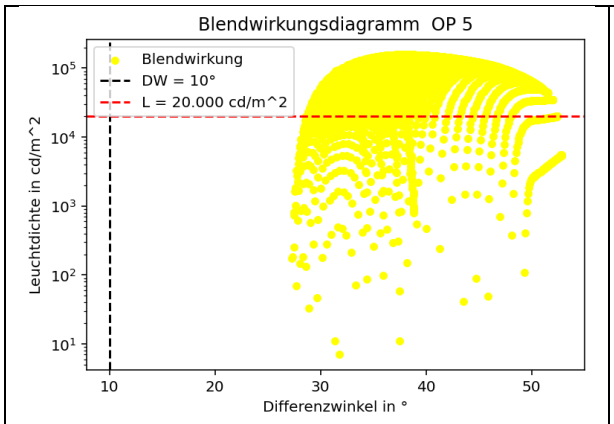
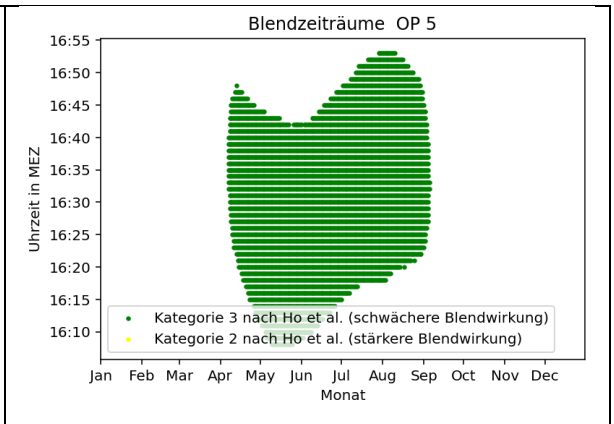

Reflexionszeiträume für OP F13 --> Südwesten
Uhrzeit (in MEZ)
16:55
16:50
16:45
16:40
16:35
16:30
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
Monat
Legende
Blendwirkung
Differenzwinkel ≤ 10° und Sonnenhöhe ≤ 5°
Reflexionsdauer pro Tag für OP F13 --> Südwesten
Minuten mit Blendwirkung
16
14
12
10
8
6
4
2
0
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
Monat
Legende
Blendwirkung
Differenzwinkel ≤ 10° und Sonnenhöhe ≤ 5°
Reflexionszeiträume für OP F14 --> Südwesten
Uhrzeit (in MEZ)
16:50
16:45
16:40
16:35
16:30
16:25
16:20
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
Monat
Legende
Blendwirkung
Differenzwinkel ≤ 10° und Sonnenhöhe ≤ 5°
Reflexionsdauer pro Tag für OP F14 --> Südwesten
Minuten mit Blendwirkung
30
25
20
15
10
5
0
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
Monat
Legende
Blendwirkung
Differenzwinkel ≤ 10° und Sonnenhöhe ≤ 5°

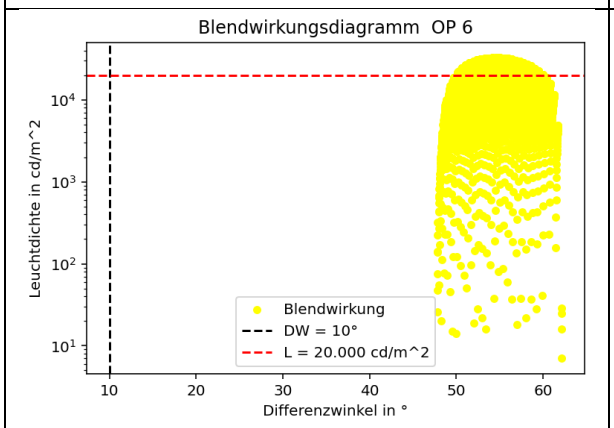
*Tabelle 5: Blendwirkungsdiagramme bei den Observationspunkten **ohne** Berücksichtigung der Blick/Flugrichtung auf den Platzrunden samt An- und Abflügen*

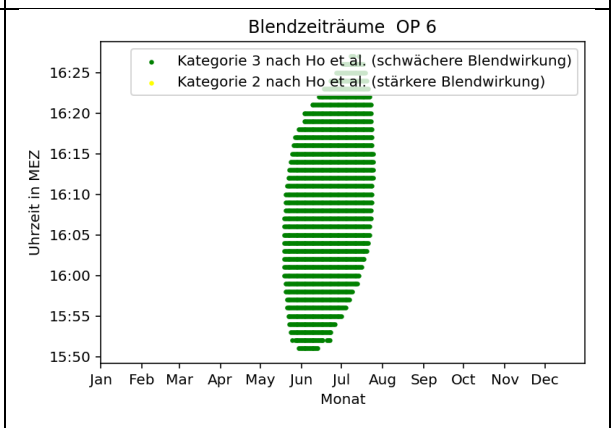


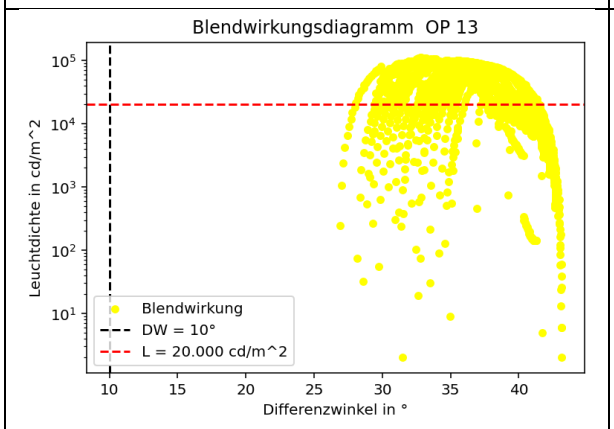
Fortsetzung auf der folgenden Seite.

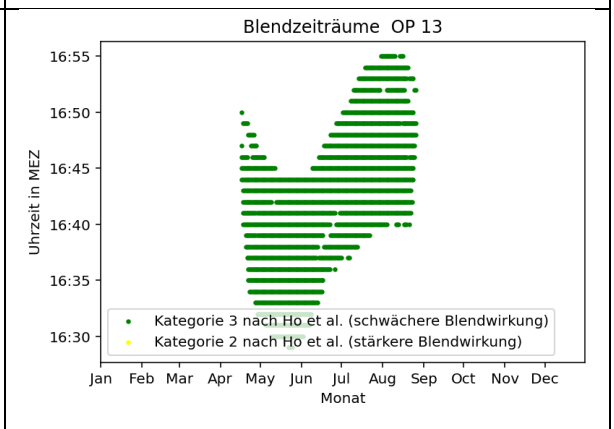

Blendwirkungsdiagramm OP 5
Blendwirkung
DW = 10°
L = 20.000 cd/m^2
Leuchtdichte in cd/m^2
Differenzwinkel in °

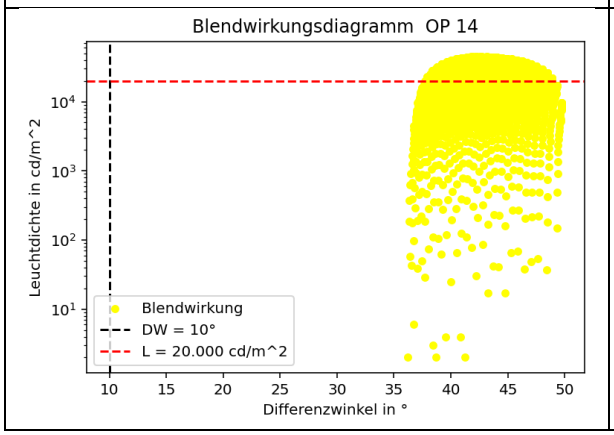

Blendzeiträume OP 5
Kategorie 3 nach Ho et al. (schwächere Blendwirkung)
Kategorie 2 nach Ho et al. (stärkere Blendwirkung)
Uhrzeit in MEZ
Monat

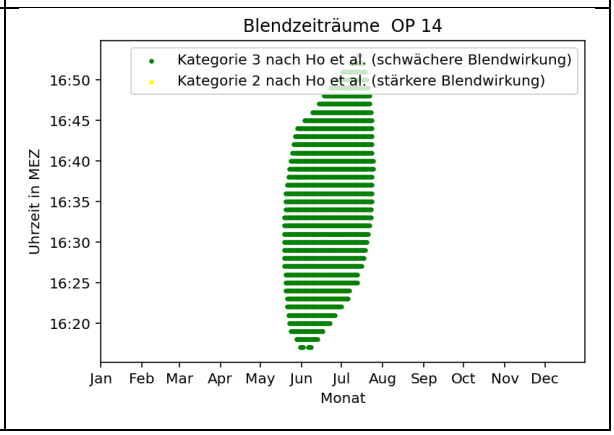

Blendwirkungsdiagramm OP 6
Blendwirkung
DW = 10°
L = 20.000 cd/m^2
Leuchtdichte in cd/m^2
Differenzwinkel in °


Blendzeiträume OP 6
Kategorie 3 nach Ho et al. (schwächere Blendwirkung)
Kategorie 2 nach Ho et al. (stärkere Blendwirkung)
Uhrzeit in MEZ
Monat


Blendwirkungsdiagramm OP 13
Blendwirkung
DW = 10°
L = 20.000 cd/m^2
Leuchtdichte in cd/m^2
Differenzwinkel in °


Blendzeiträume OP 13
Kategorie 3 nach Ho et al. (schwächere Blendwirkung)
Kategorie 2 nach Ho et al. (stärkere Blendwirkung)
Uhrzeit in MEZ
Monat


Blendwirkungsdiagramm OP 14
Blendwirkung
DW = 10°
L = 20.000 cd/m^2
Leuchtdichte in cd/m^2
Differenzwinkel in °


Blendzeiträume OP 14
Kategorie 3 nach Ho et al. (schwächere Blendwirkung)
Kategorie 2 nach Ho et al. (stärkere Blendwirkung)
Uhrzeit in MEZ
Monat

7.3 Rollen am Boden

Tabelle 6: Ergebnistabelle für die Reflexionen in das relevante Sichtfeld von Piloten während des Rollens am Boden

Lande- und Startbahnen inkl. Verbindungswege	Leuchtdichte > 20.000 cd/m²?	Blend-wirkungen fallen in Kategorie drei (3) nach Ho et al.?	Überlagert die Sonne die Reflexion?	Blendwirkung
alle	-	-	-	keine relevanten Blendwirkungen

Erklärung:
Die Sichtlinie auf die PVA ist nahezu durchgehend von der Topografie unterbrochen. Selbst ohne Berücksichtigung der Topografie und der Vegetation nimmt die PVA nur einen schmalen Streifen am Horizont ein, sodass Reflexionen als vernachlässigbar zu betrachten sind. Relevante Blendwirkungen können daher ausgeschlossen werden.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen der Begutachtung wurden die potenziellen Blendwirkungen der geplanten Photovoltaikanlage in Hürtgenwald auf den Flugbetrieb des Flugplatzes Düren-Hürtgenwald untersucht. Ziel war es festzustellen, ob durch Reflexionen der Solarmodule erhebliche Beeinträchtigungen für den Flugbetrieb entstehen könnten. Hierfür wurde eine spezifische Bewertungsmethodik angewendet, die die relevanten Szenarien systematisch berücksichtigt. In diesem Kontext existiert derzeit keine offizielle Richtlinie oder Norm, die eine allgemeingültige Bewertungsgrundlage bietet.

Platzrunde

Piloten während der Platzrunde können moderate (im Sinne der dargestellten Methodik) Blendwirkungen im relevanten Sichtfeld erfahren. Es ist ausschließlich der Bereich südöstlich der PVA bei Flugrichtung Nordwesten bzw. Südwesten betroffen (die Zeiten können dem Kapitel 7.2 entnommen werden). Die amerikanische Flugaufsichtsbehörde beschreibt PV-bedingte Blendwirkungen auf Piloten als vergleichbar mit Reflexionen an stillen und großen Wasserkörpern oder großen Glasfassaden [10]. Auch Glasdächer und Glaskuppeln können ähnliche Blendwirkungen hervorrufen. Es handelt sich daher nicht pauschal um ein neuartiges Phänomen für Piloten. Die Blendwirkungen während der Flüge nach Nordwesten bzw. Südwesten werden somit als potenziell störend eingestuft, jedoch nicht als pauschal kritisch, da sie nicht während des Endanflugs (im relevanten Sichtfeld) auftreten.

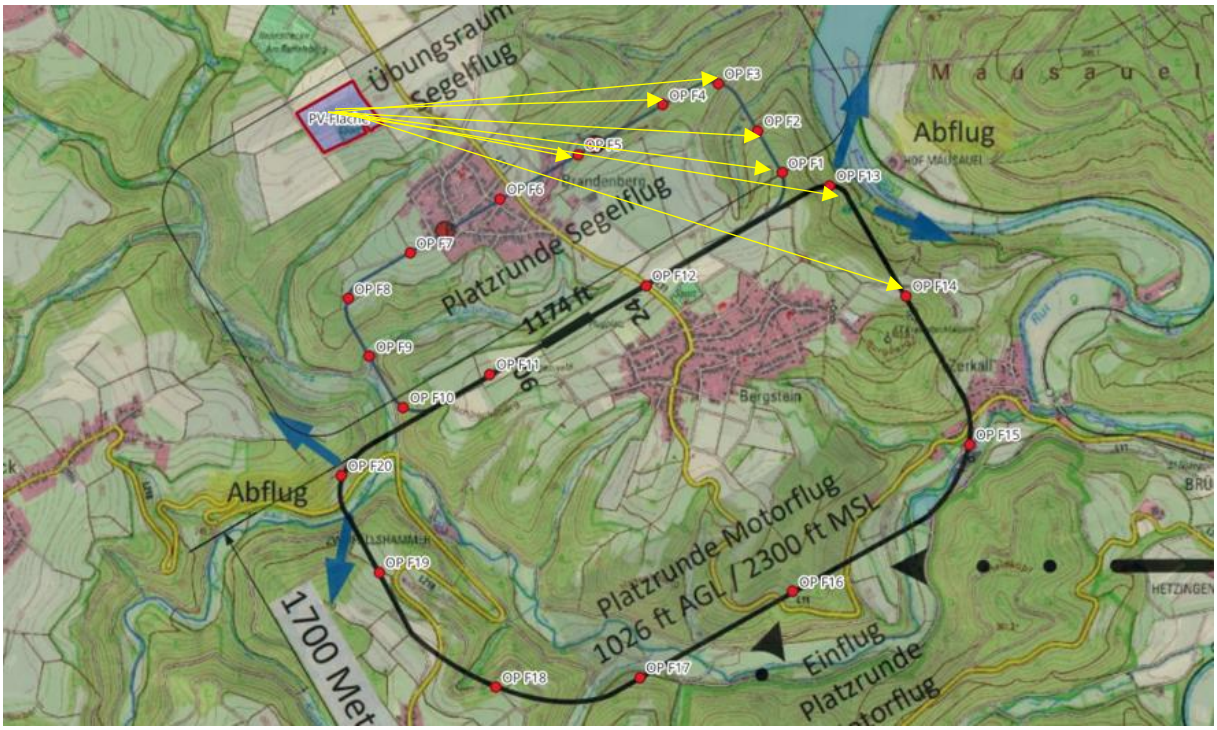


Abbildung 14: Skizze der störenden Reflexionen

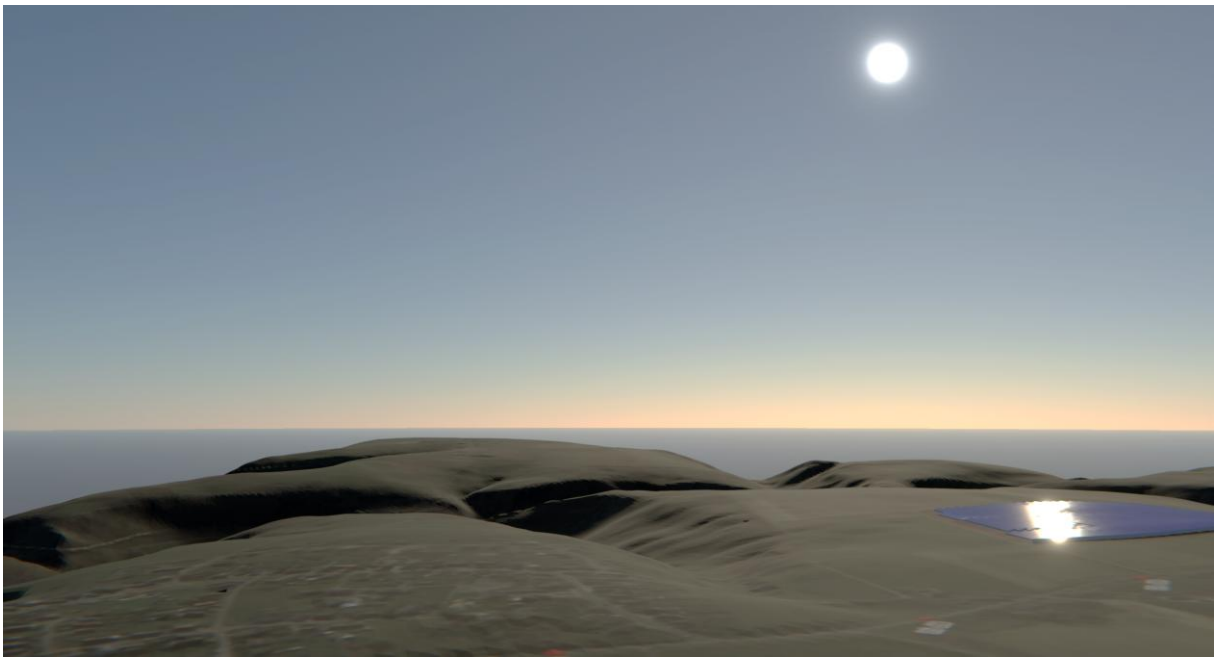


Abbildung 15: Beispielhaftes 3D-Modell der PVA aus Sicht von OP F5 (29.06 um 16.11 Uhr Winterzeit)

Piloten am Boden

Die Sichtlinie auf die PVA ist nahezu durchgehend von der Topografie unterbrochen. Selbst ohne Berücksichtigung der Topografie und der Vegetation nimmt die PVA nur einen schmalen Streifen am Horizont ein, sodass Reflexionen als vernachlässigbar zu betrachten sind. Relevante Blendwirkungen am Boden können daher ausgeschlossen werden.

Gesamtbewertung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die geplante PVA moderate Blendwirkungen auf den Flugbetrieb des Flugplatzes Düren-Hürtgenwald haben wird. Die Situation wird insgesamt noch als vertretbar eingeschätzt, sollte jedoch mit dem Flugplatzbetreiber bzw. der zuständigen Luftaufsichtsbehörde abgestimmt werden.

9 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 Quaschning, *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] 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

[10] DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Federal Aviation Administration, „Federal Register Vol. 86, No. 89: Federal Aviation Administration Policy: Review of Solar Energy System Projects on Federally-Obligated Airports“. 2021.

Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY — Sandia National Laboratories

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.

5 | Page

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