SONNWINN GmbH
Unabhängige Experten für Photovoltaik und Stromspeicher

BLENDGUTACHTEN

SOLARPARK JESSEN

SONDERBETRACHTUNG FLUGVERKEHR

VERSION 1.0

23.03.2026

Bearbeitet:

Sachverständiger für Photovoltaik
Dr.-Ing. Stefan Bofinger

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
1.0	Erste Fassung	23.03.2026	Dr.-Ing. Stefan Bofinger, Mathias Röper

Das Gutachten ist nur in seiner aktuellen Fassung gültig.

Hinweis: Das vorliegende Gutachten besteht aus zwei unabhängigen Teilgutachten. Der erste Teil betrachtet direkte Anflüge auf den Fliegerhorst Schönewalde/Holzdorf. Der zweite Teil betrachtet beliebige Hubschrauberbewegungen im Umfeld des Clusters (PV-Flächen) Holzdorf.

Inhaltsverzeichnis

1 Direkte Anflüge Fliegerhorst Schönewalde/Holzdorf 3

1.1 Einleitung 3

1.2 Grundlagen PVA-bedingter Blendwirkungen 4

1.3 Herleitung der Bewertungsmethodik bzgl. Blendwirkungen im Flugverkehr 7

1.4 Bewertungsmethodik als Entscheidungsbäume 12

1.5 Fliegerhorst Schönewalde/Holzdorf 15

1.6 Übersicht der geplanten PV-Anlage 17

1.7 Auswertung 20

1.8 Zusammenfassung 24

1.9 Fazit 24

2 Betrachtung Hubschrauberverkehr 25

2.1 Einleitung 25

2.2 Anlagenbeschreibung 27

2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse 30

2.4 Grundlagen 31

2.5 Blendwirkungen auf beliebige Flugpfade 34

2.6 Diskussion der Ergebnisse 53

3 Literaturverzeichnis 58

Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT 59

Anhang B: Grafiken Süd, 50 m-Zylinder, über Grund 60

Anhang C: Grafiken Süd, 400 m-Zylinder, über Grund 61

Anhang D: Grafiken Ost-West, 50 m-Zylinder, über Grund 62

Anhang E: Grafiken Ost-West, 50 m-Zylinder, über Grund 63

Anhang F: Grafiken Süd, 50 m-Zylinder, über NN 64

Anhang G: Grafiken Süd, 400 m-Zylinder, über NN 65

Anhang H: Grafiken Ost-West, 50 m-Zylinder, über NN 66

Anhang I: Grafiken Ost-West, 50 m-Zylinder, über NN 67

1 Direkte Anflüge Fliegerhorst Schönewalde/Holzdorf

1.1 Einleitung

Die Yokk Solar GmbH hat die SONNWINN GmbH beauftragt, die potenziellen Blendwirkungen der geplanten PV-Freiflächenanlage Jessen auf den Fliegerhorst Schönewalde/Holzdorf im Hinblick auf den Flugbetrieb zu untersuchen und zu bewerten.

1.1.1 Fragestellung

Es ist zu klären, ob die Solarmodule der geplanten Photovoltaikanlage Sonnenlicht so reflektieren, dass dadurch erhebliche Beeinträchtigungen für den umliegenden Flugverkehr bzw. den Flugbetrieb am Fliegerhorst Schönewalde/Holzdorf, insbesondere bei direkten Präzisionsanflügen, entstehen könnten. Ziel dieses Gutachtens ist es, diese Fragestellung 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:

- Landeanflüge
- Flugverkehrskontrollturm
- Piloten während des Rollens am Boden

1.1.2 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.

1.1.3 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	

1.1.4 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.

1.2 Grundlagen PVA-bedingter Blendwirkungen

1.2.1 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 19) 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 20).

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

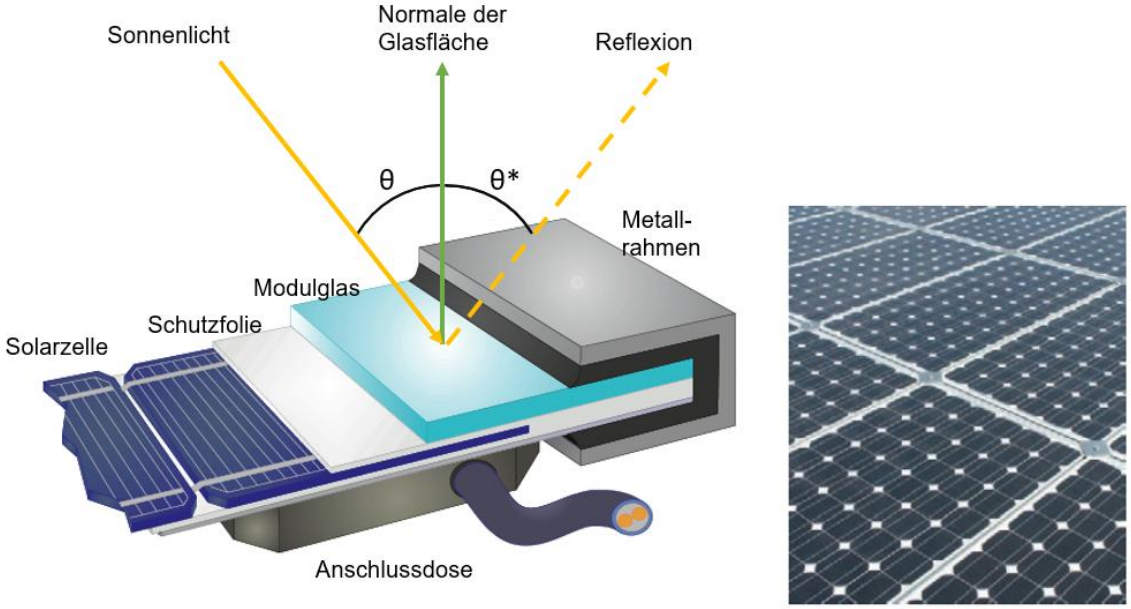


Abbildung 1: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ – Quelle: [3] (modifiziert)

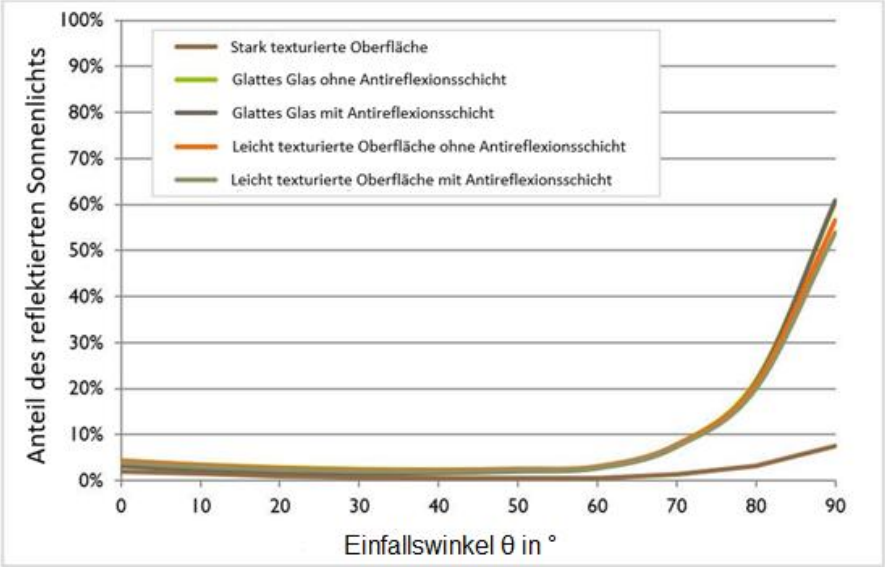


Abbildung 2: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypen – Quelle: [4], modifiziert

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

1.2.2 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].

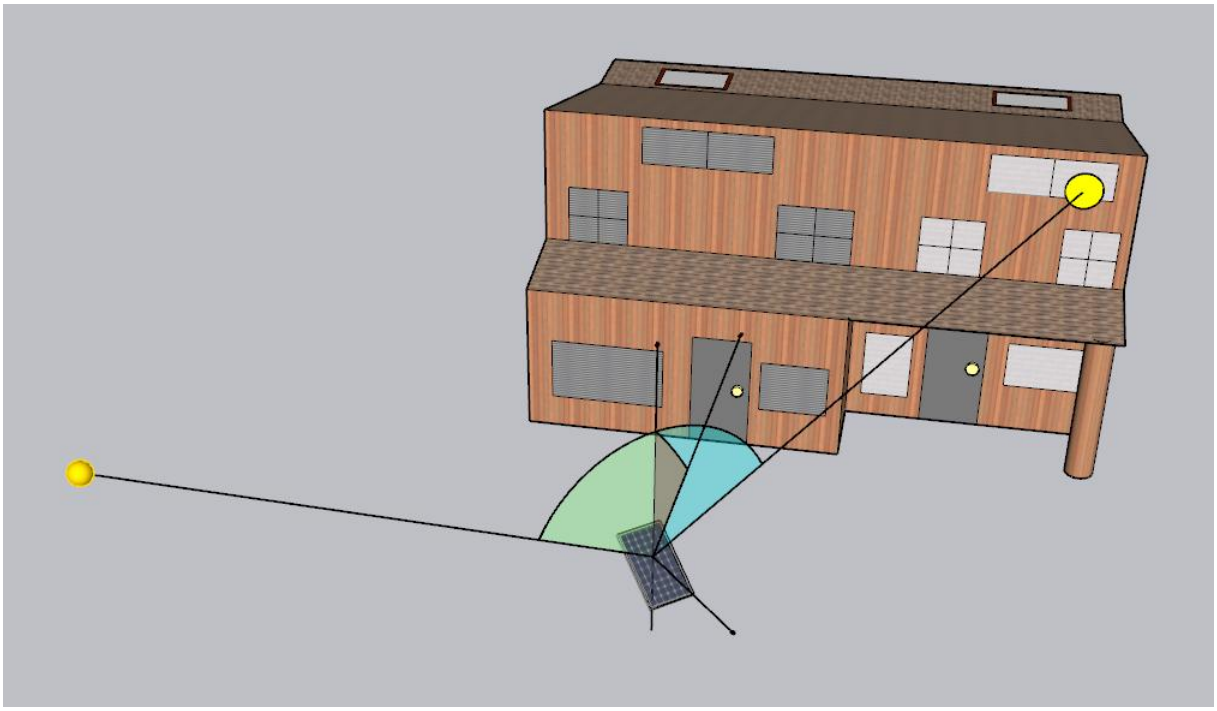


Abbildung 4: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion – Quelle: Eigene Abbildung

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.

1.3 Herleitung der Bewertungsmethodik bzgl. Blendwirkungen im Flugverkehr

1.3.1 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.

1.3.2 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 1.4.

[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]

1.3.3 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]

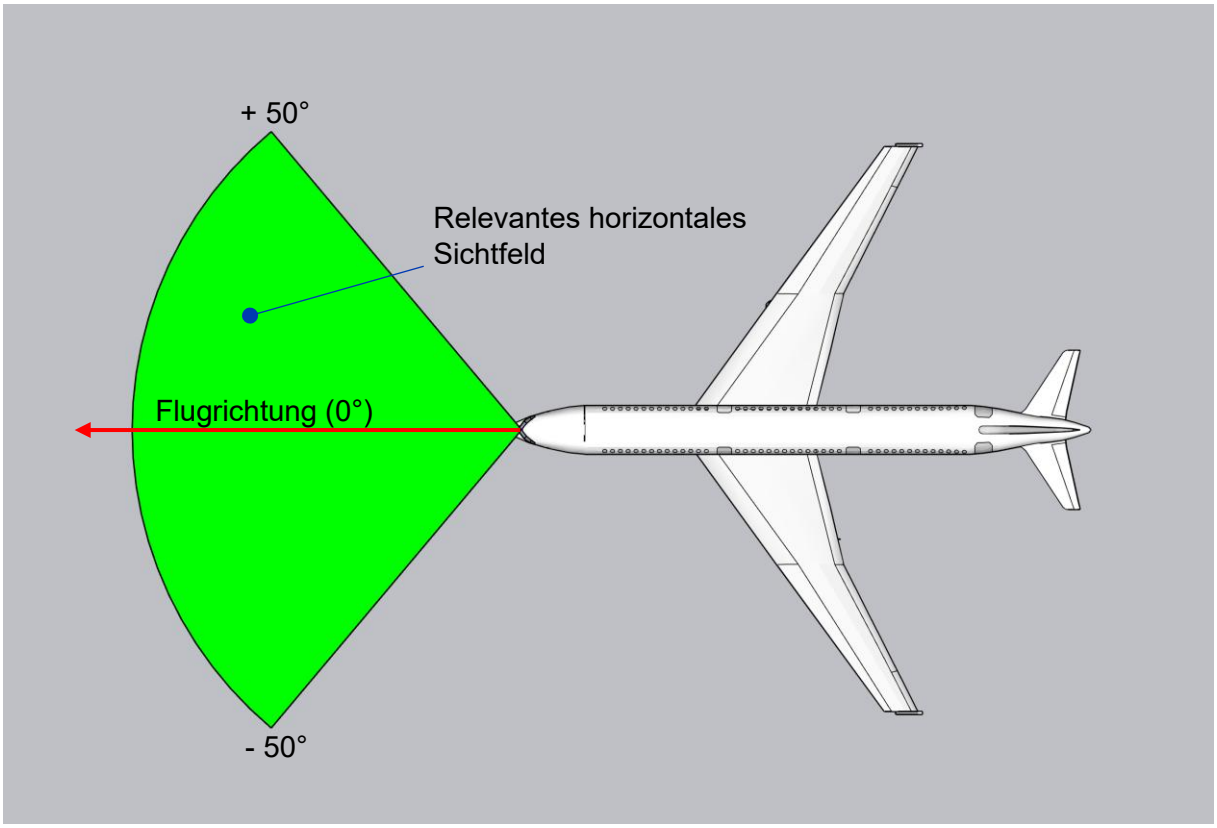


Abbildung 6: Darstellung des relevanten horizontalen Sichtfelds: Außerhalb von 50° zur Flugrichtung sind Reflexionen irrelevant. - Quelle Abbildung: Eigene Abbildung

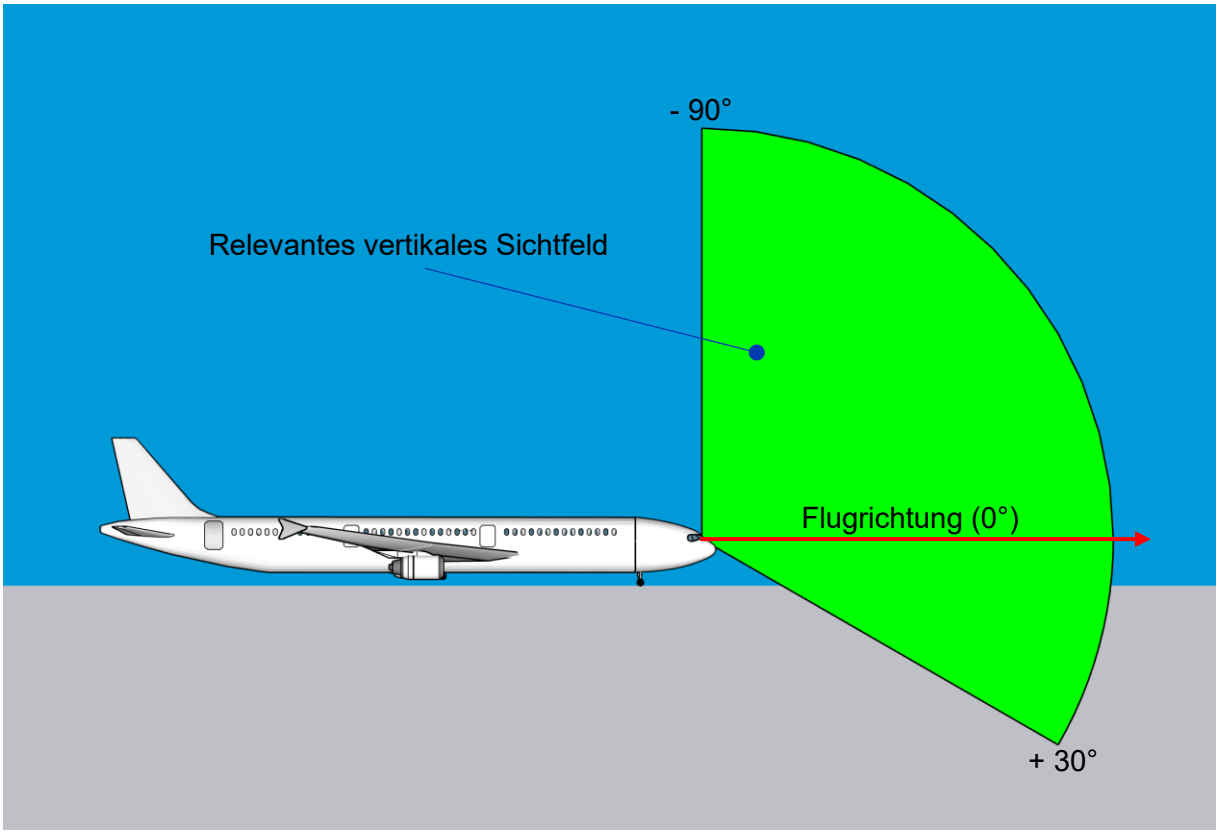


Abbildung 7: Darstellung des relevanten vertikalen Sichtfelds: Ab 30° gegen Boden ist dieses eingeschränkt. - Quelle Abbildung: Eigene Abbildung

1.3.4 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.

1.3.5 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°, 6° und 9°** 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.

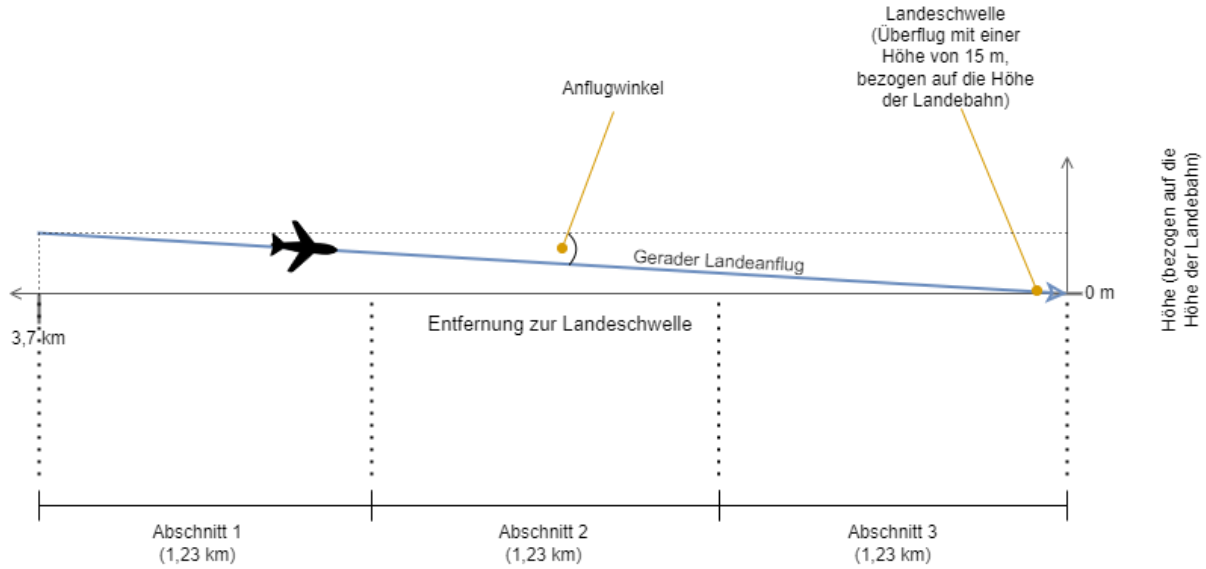


Abbildung 8: Skizze eines modellierten/simulierten Anflugs

1.4 Bewertungsmethodik als Entscheidungsbäume

Auf Basis der in Kapitel 1.3 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.

1.4.1 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.

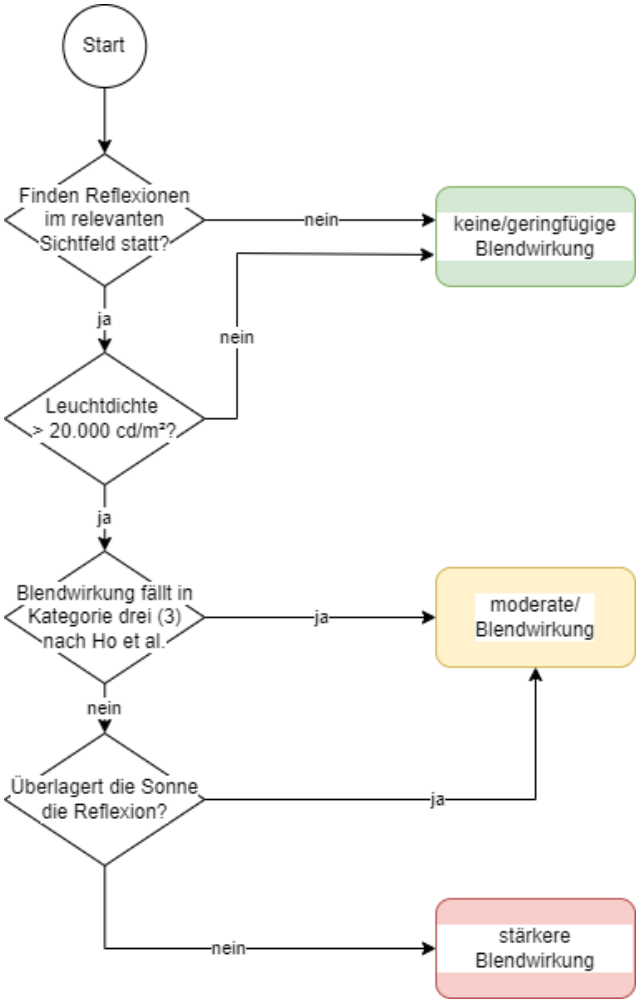


Abbildung 9: Bewertungsmethodik als Entscheidungsbaum für PVA-bedingte Blendwirkungen auf Piloten während eines Landeanflugs oder beim Rollen am Boden

1.4.2 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.

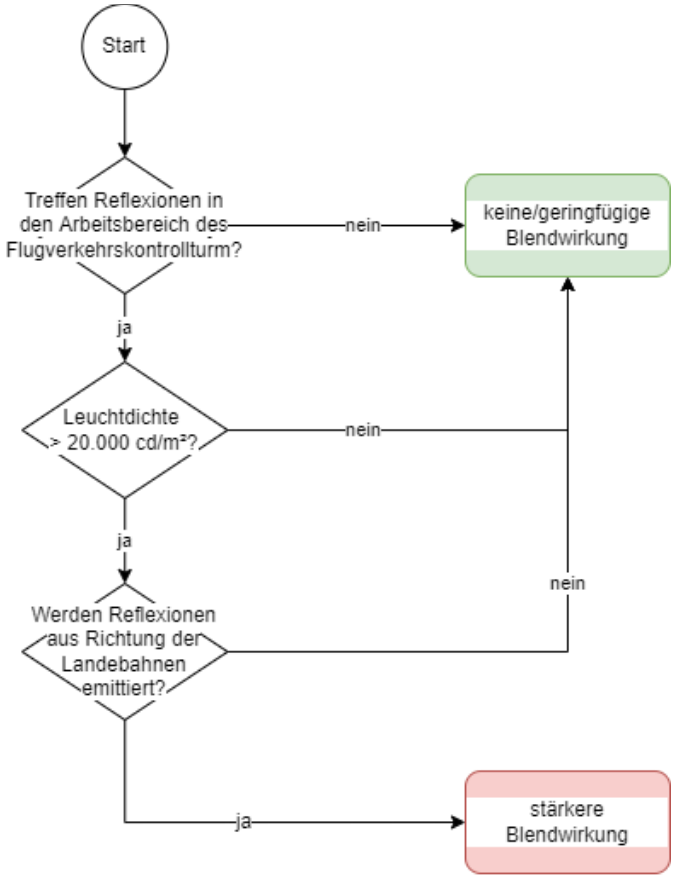


Abbildung 10: Bewertungsmethodik als Entscheidungsbaum für PVA-bedingte Blendwirkungen auf Fluglotsen im Flugverkehrskontrollturm

1.5 Fliegerhorst Schönewalde/Holzdorf

Der Fliegerhorst Holzdorf, auch bekannt als Fliegerhorst Schönewalde/Holzdorf (ICAO-Code: ETSH), ist ein Militärflugplatz der Luftwaffe. Er befindet sich an der Landesgrenze zwischen Sachsen-Anhalt und Brandenburg, östlich von Jessen (Sachsen-Anhalt) und nördlich von Herzberg (Brandenburg). Der Großteil des Flugplatzes liegt im brandenburgischen Schönewalde und grenzt im Norden an die Bundesstraße 187.

Der Flugplatz besitzt eine 2.419 m lange und asphaltierte Start- und Landebahn: RWY 09/27.

Anflugrichtungen:

- Anflug aus Westen: 093° → Runway (RWY) 09
- Anflug aus Osten: 273° → Runway (RWY) 27

Neben den Direkt-/Endanflügen werden auch relevante Betriebsbereiche des Flugplatzes, im Wesentlichen die Rollbahnen sowie der Flugverkehrskontrollturm (Tower), hinsichtlich potenzieller Blendwirkungen untersucht.

Flugverkehrskontrollturm (Tower):

Der Flugverkehrskontrollturm befindet sich südlich der Landebahn. Die Augenhöhe eines Fluglotsen wurde auf ca. 30 m über der Geländeoberkante angesetzt. Diese Höhe wurde konservativ geschätzt. Es ist zu beachten, dass höher gelegene Immissionsorte in der Regel stärkeren Blendwirkungen ausgesetzt sind.



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



Abbildung 12: Aufnahme vom Tower - Quelle: luftfahrtwelt.de

1.6 Übersicht der geplanten PV-Anlage

Die geplante PVA besteht aus sechs PV-Flächen.

Tabelle 2: Relevante Anlagenparameter

Parameter	Angabe/Wert
Geokoordinaten (Breite, Länge)	51.806668469, 13.126907173
Art der Anlage	Freiflächenanlage
Modultyp	Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung
Aufständerung	Fest aufgeständert
Nennleistung (DC)	ca. 70 MWp
Modulausrichtung (Azimut, Norden = 0°)	Buschkuhnsdorf 1 (1,2): ca. 90°/270° Buschkuhnsdorf 2 (3,4): ca. 81°/261° Holzdorf (Feld 5,6): ca. 75°/255°
Modulneigung	15°
Höhe Modulunterkante	0,8 m
Höhe Moduloberkante	2,8 m

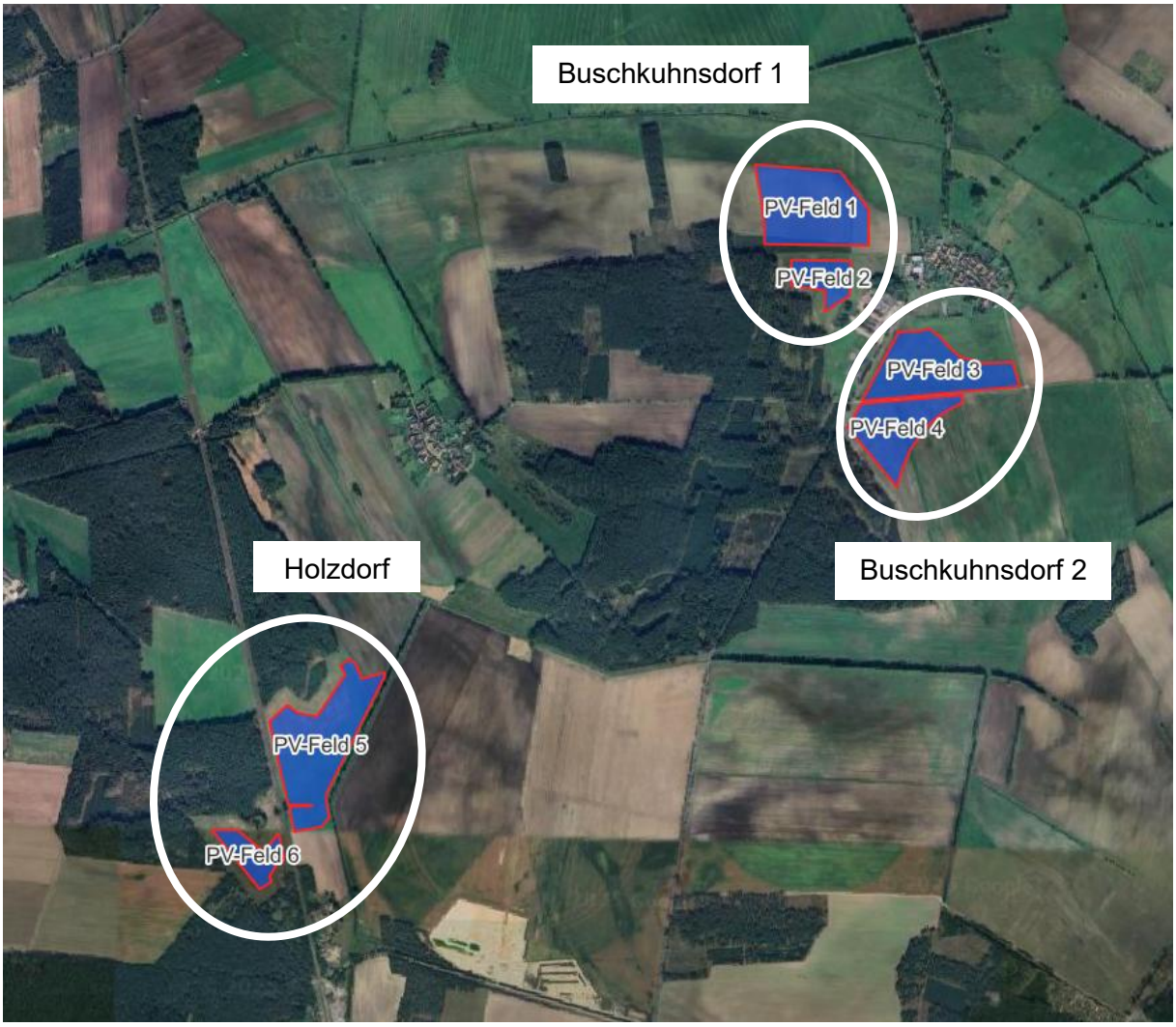


Abbildung 13: Grundriss der PV-Flächen - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

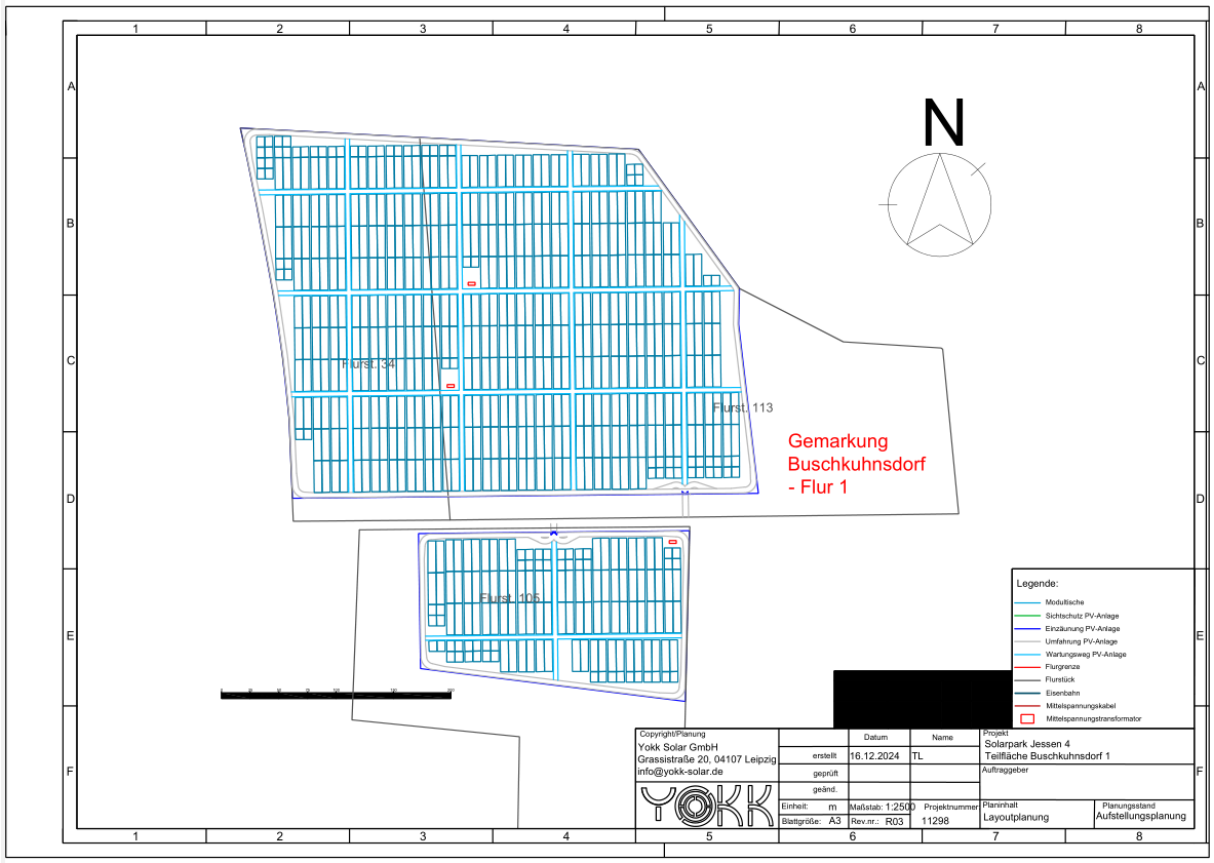


Abbildung 14: Belegungsplan für Feld 1 und 2 - Quelle: Auftraggeber

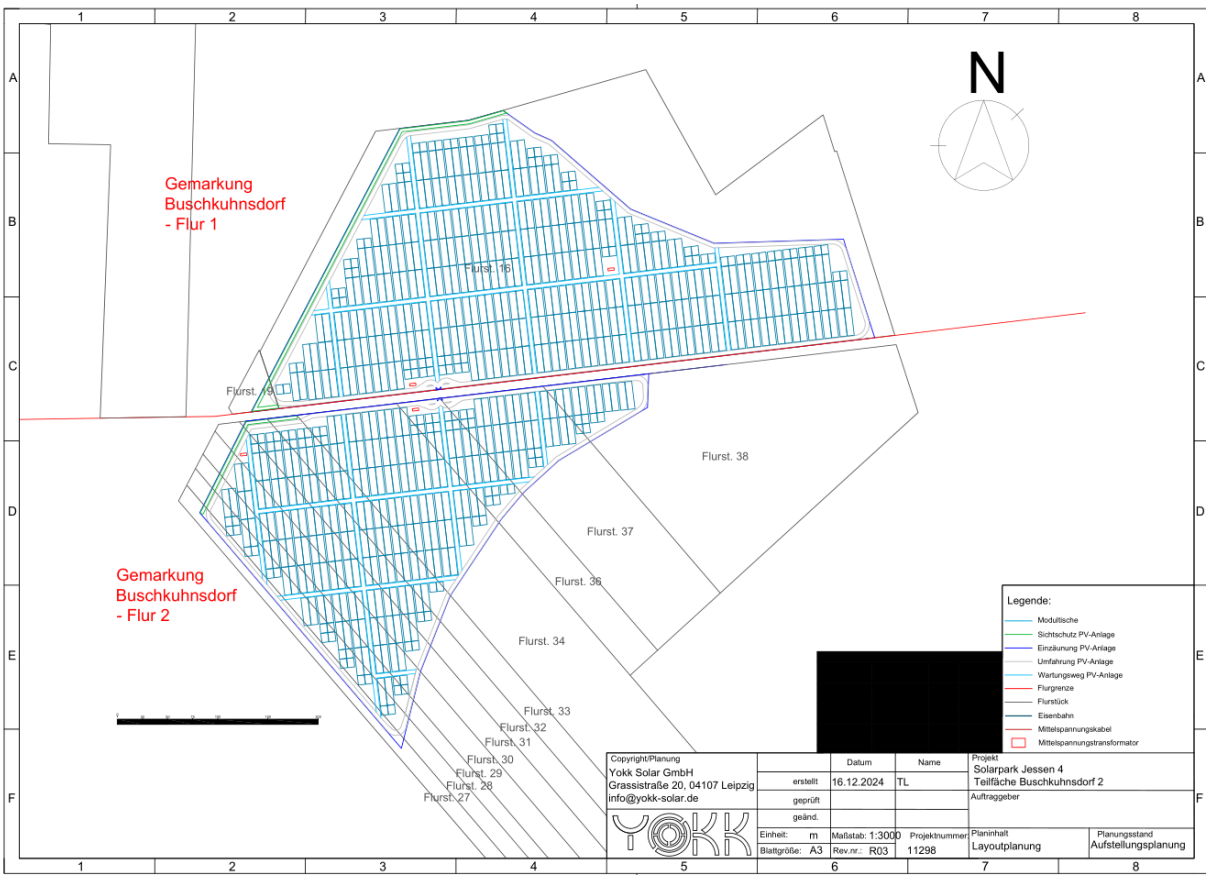


Abbildung 15: Belegungsplan für Feld 3 und 4 – Quelle: Auftraggeber

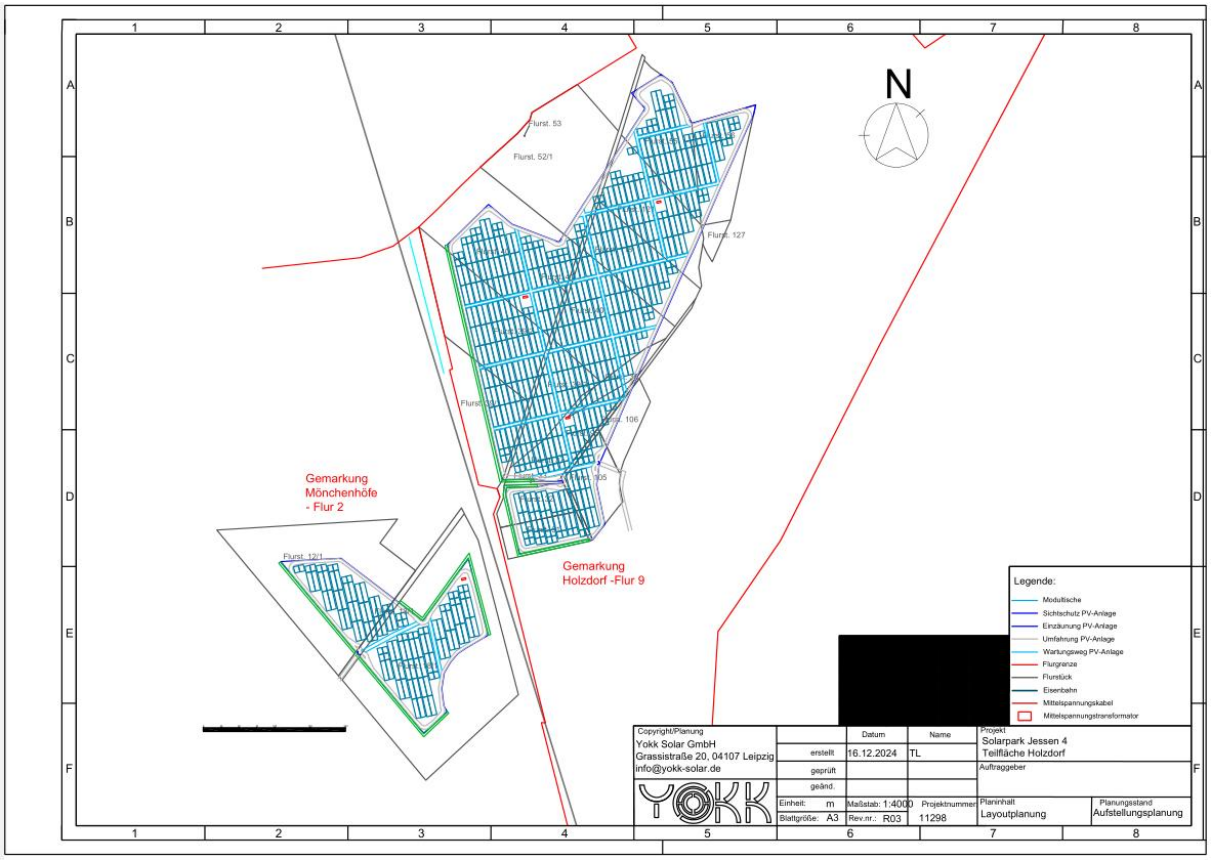


Abbildung 16: Belegungsplan für Feld 5 und 6 – Quelle: Auftraggeber

1.7 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.

1.7.1 Anflüge

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

Landeanflug auf RWY…	Anflug-winkel	Betroffener Landeanflug -abschnitt (s. Kapitel 3.5)	Leucht-dichte > 20.000 cd/m²?	Blend-wirk-ungen fallen in Kategorie drei (3) nach Ho et al.?	Über-lagert die Sonne die Reflexion ?	Blendwirkung
09	3°	-	-	-	-	Keine Reflexionen
27	3°	-	-	-	-	
09	6°	-	-	-	-	
27	6°	-	-	-	-	
09	9°	-	-	-	-	
27	9°	-	-	-	-	

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:
Die Simulation ergab, dass während der untersuchten Landeanflüge (End- und Direktanflüge) in den letzten zwei Seemeilen bis zum Aufsetzen keine Reflexionen im Sichtfeld der Piloten auftreten werden.

1.7.2 Flugverkehrskontrollturm (Tower)

Tabelle 4: Ergebnistabelle für die Blendwirkungen auf die Tower bei voller Belegung

Tower	Treten Reflexionen in der Arbeitskabine des Towers auf?	Leuchtdichte > 20.000 cd/m²?	Werden die Reflexionen aus Richtung der Start- und Landebahnen emittiert?	Blendwirkung
ATCT	nein	-	-	Keine Reflexionen

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:
Keine Reflexionen werden von der PVA bis zum Tower gelangen.

1.7.3 Rollen am Boden

Tabelle 5: 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 Reflexionen

Erklärung:
Die PVA wird keine Reflexionen in das Gelände des Flugplatzes emittieren.

1.8 Zusammenfassung

Im Rahmen der Begutachtung wurden die potenziellen Blendwirkungen der geplanten Photovoltaikanlage – bestehend aus sechs teilweise nicht direkt nebeneinander liegenden Generatorfeldern – auf den Flugverkehr des Fliegerhorsts Schönewalde/Holzdorf untersucht.

Dabei wurden Direkt- und Endanflüge, der Tower sowie das Rollen am Boden berücksichtigt. Die angewandte Bewertungsmethodik wird im Bericht ausführlich erläutert.

Die Analyse der Anflüge erstreckte sich über eine Distanz von zwei Seemeilen (ca. 3,7 km) bis zum Aufsetzen, wobei Anflugwinkel (Gleitwinkel) von 3°, 6° und 9° angenommen wurden. Im gesamten untersuchten Anflugbereich treten keine Reflexionen der Photovoltaikanlage auf, die das relevante Sichtfeld der Piloten beeinträchtigen könnten.

Weitere Ergebnisse:

- **Tower:** Keine Reflexionen der PVA treffen auf den Tower.
- **Piloten am Boden:** Das gesamte Flugplatzgelände bleibt frei von PVA-bedingten Reflexionen.

1.9 Fazit

Während der Anflüge auf die Landebahnen – aus Westen (Richtung 093° → RWY 09) und aus Osten (Richtung 273° → RWY 27) – sowie auf dem gesamten Flugplatzgelände, einschließlich des Towers, sind keine PVA-bedingten Reflexionen/Blendwirkungen zu erwarten.

2 Betrachtung Hubschrauberverkehr

2.1 Einleitung

Die SONNWINN GmbH wurde beauftragt, die möglichen Blendwirkungen auf beliebige Hubschrauberflüge folgender Photovoltaikanlage (PVA) zu untersuchen und zu bewerten:

Tabelle 6: Projektübersicht

Auftraggeber	Yokk Solar GmbH
Projektname	Solarpark Jessen
Adresse PVA	06917 Jessen
Stand der Projektierung	☐ Bestand | ☐ Im Bau | ☒ Planung

2.1.1 Fragestellung

Es stellt sich die Frage, ob die Solarmodule der geplanten Photovoltaikanlage Sonnenlicht in einer Weise reflektieren, dass im Zusammenhang mit militärischen Tiefflugübungen von Hubschraubern Blendwirkungen für Piloten auftreten können.

Dieses Gutachten dient der Klärung dieser Fragestellung. Es untersucht, ob und mit welcher Häufigkeit potenziell beeinträchtigende Blendwirkungen auftreten können.

Einleitend ist festzuhalten, dass seitens der Bundeswehr eine spezifische Fragestellung formuliert wurde, die über eine klassische Blendbewertung hinausgeht. Ziel ist es, potenzielle Blendwirkungen in Abhängigkeit von räumlicher Position, Flughöhe und Flugrichtung systematisch zu erfassen und darzustellen. Hintergrund sind militärische Übungsflüge, die grundsätzlich aus nahezu jeder Richtung sowie zu unterschiedlichen Zeiten und in variierenden Höhen über den Photovoltaikflächen stattfinden können.

Zu diesem Zweck wurde ein methodischer Ansatz gewählt, der eine flächenhafte sowie höhenabhängige Analyse potenzieller Beobachtungspunkte im Luftraum ermöglicht. Auf dieser Grundlage lässt sich für unterschiedliche Flugmanöver nachvollziehen, in welchen räumlichen und zeitlichen Konstellationen Blendwirkungen auftreten können.

Die vorliegenden Ergebnisse bilden eine Grundlage, um potenzielle Blendwirkungen nicht nur statisch darzustellen, sondern auch hinsichtlich ihrer zeitlichen und räumlichen Verteilung im Luftraum differenziert zu bewerten.

2.1.2 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.

2.1.3 Datengrundlage

Tabelle 7: Verwendete Daten/Informationen und ihre Quellen

Information/Daten	Quelle
Angaben zur geplanten PVA	Auftraggeber
Umliegende Vegetation	Google Earth Pro, OpenStreetMap
Umliegende Bebauung	
Höhendaten (DGM1)	Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt

2.2 Anlagenbeschreibung

Für die vorliegende Analyse wurde seitens des Auftraggebers ausschließlich eine Untersuchung des Clusters PVA Holzdorf (PV-Flächen) beauftragt. Hintergrund ist, dass die Bundeswehr Übungsflüge in der Nähe von Siedlungsgebieten in der Regel meidet, sodass die Cluster Buschkuhnsdorf 1 und Buschkuhnsdorf 2 nicht bzw. nur in geringem Umfang überflogen werden. Im vorliegenden Gutachten wird daher ausschließlich das Cluster Holzdorf betrachtet. Das Cluster Holzdorf wird einmal als nach Süden ausgerichtete und einmal als Ost-West-Anlage geprüft (zwei Ausrichtungsvarianten).

Tabelle 8: Relevante Anlagenparameter

Parameter	Angabe/Wert
Geokoordinaten (Breite, Länge)	51.806668469, 13.126907173
Art der Anlage	Freiflächenanlage
Modultyp	Si-kristallines Modul mit Antireflexbeschichtung
Aufständerung	Fest aufgeständert, Süd und Ost-West-Ausrichtung
Nennleistung (DC)	ca. 70 MWp
Modulausrichtung (Azimut, Norden = 0°)	Buschkuhnsdorf 1 (1,2): ca. 90°/270° Buschkuhnsdorf 2 (3,4): ca. 81°/261° **Holzdorf (Feld 5,6):** Variante 1: ca. 75°/255° (Ost-West) Variante 2: 180 Süd
Modulneigung	15°
Höhe Modulunterkante	0,8 m
Höhe Moduloberkante	2,8 m

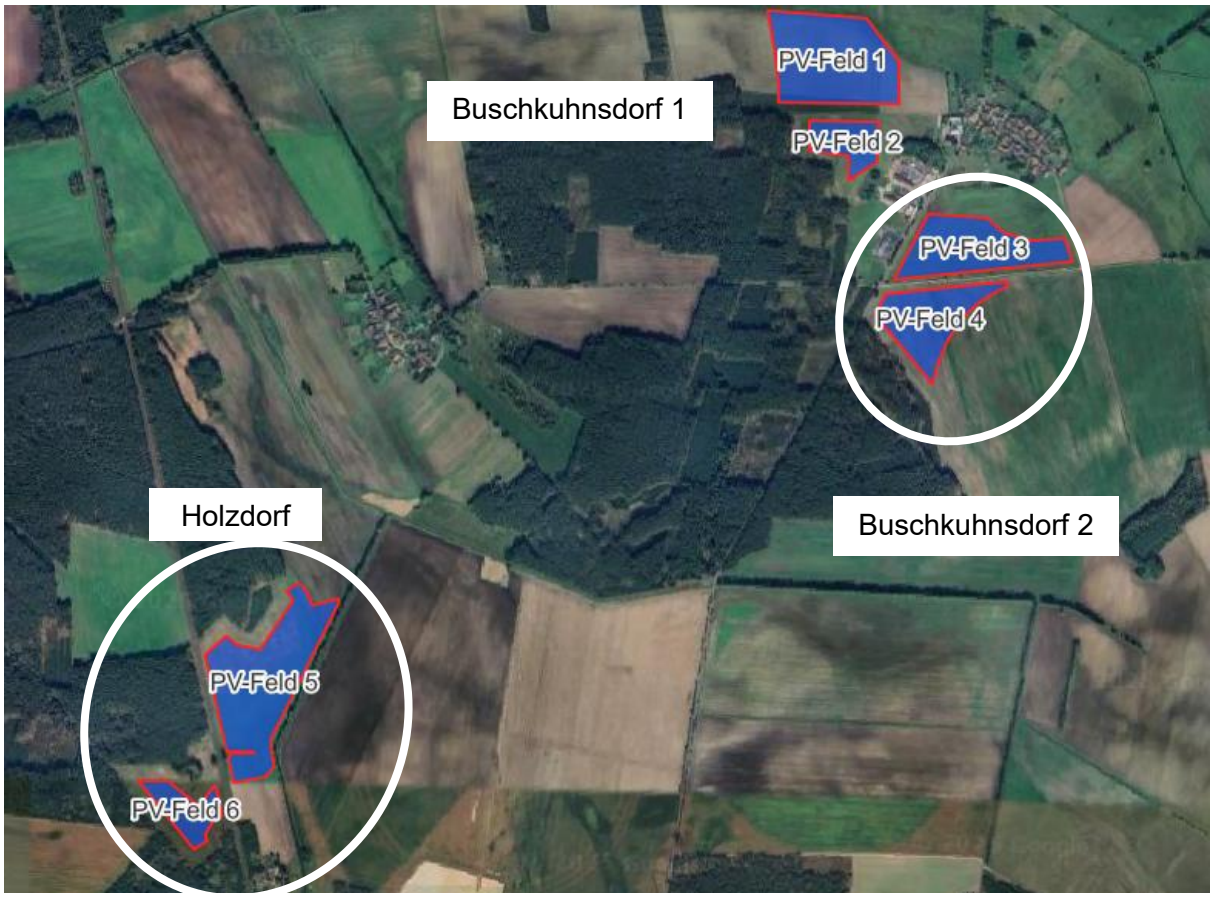


Abbildung 17: Grundriss der PV-Flächen - Quelle Satellitenbild: Google Earth Pro

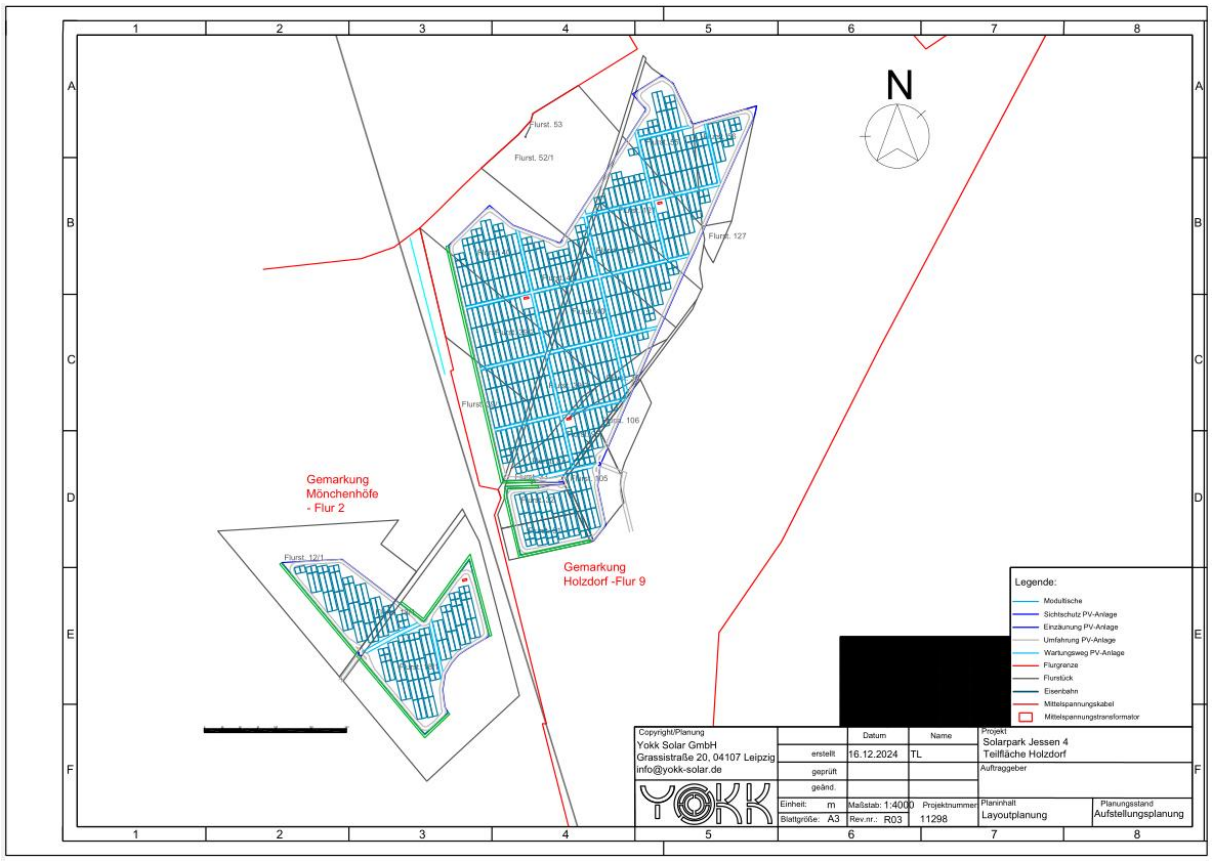


Abbildung 18: Belegungsplan für Feld 5 und 6 – Quelle: Auftraggeber

2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchung analysiert potenzielle Blendwirkungen einer Photovoltaikanlage auf militärische Hubschrauberflüge im Tiefflug. Die Ergebnisse zeigen, dass Blendwirkungen grundsätzlich auftreten können, jedoch räumlich und zeitlich klar begrenzt sind.

Mit zunehmender Entfernung zur Anlage nimmt insbesondere die Dauer möglicher Blendwirkungen deutlich ab, während hohe Leuchtdichten auf kleinere räumliche Bereiche beschränkt bleiben. Unterschiede ergeben sich zudem zwischen den Anlagenkonfigurationen: Eine Südausrichtung führt zu einer breiteren räumlichen Verteilung der Blendwirkungen, während eine Ost-West-Ausrichtung zu einer stärkeren Bündelung in bestimmten Azimutbereichen führt.

Für die flugbetriebliche Bewertung ist zu berücksichtigen, dass Piloten ihre Blickrichtung dynamisch anpassen und kritische Konstellationen nur bei bestimmten Kombinationen aus Flugrichtung, Flughöhe und Sonnenstand auftreten. Die tatsächliche Exposition im Flugbetrieb ist daher voraussichtlich geringer als in der konservativen Modellbetrachtung.

Auf Grundlage der hergeleiteten Bewertungsbandbreite können externe Leuchtdichten von etwa 100.000 cd/m² im Allgemeinen als unerheblich eingestuft werden, während Werte bis etwa 500.000 cd/m² als mögliche obere Erheblichkeitsgrenze betrachtet werden können. Sehr hohe Leuchtdichten treten nur in klar abgegrenzten räumlichen und zeitlichen Bereichen auf.

Durch eine geeignete Wahl von Flugrichtung, Flughöhe und Zeitpunkt können potenzielle Blendwirkungen gezielt reduziert oder vermieden werden. Insgesamt ist keine flächendeckende oder dauerhafte Beeinträchtigung des Luftraums zu erwarten.

Bei Bedarf können der Bundeswehr zusätzliche Detailauswertungen oder weiterführende Informationen zur Verfügung gestellt werden, um eine weitergehende Optimierung möglicher Flugbewegungen zu unterstützen.

2.4 Grundlagen

2.4.1 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 19) 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 20).

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

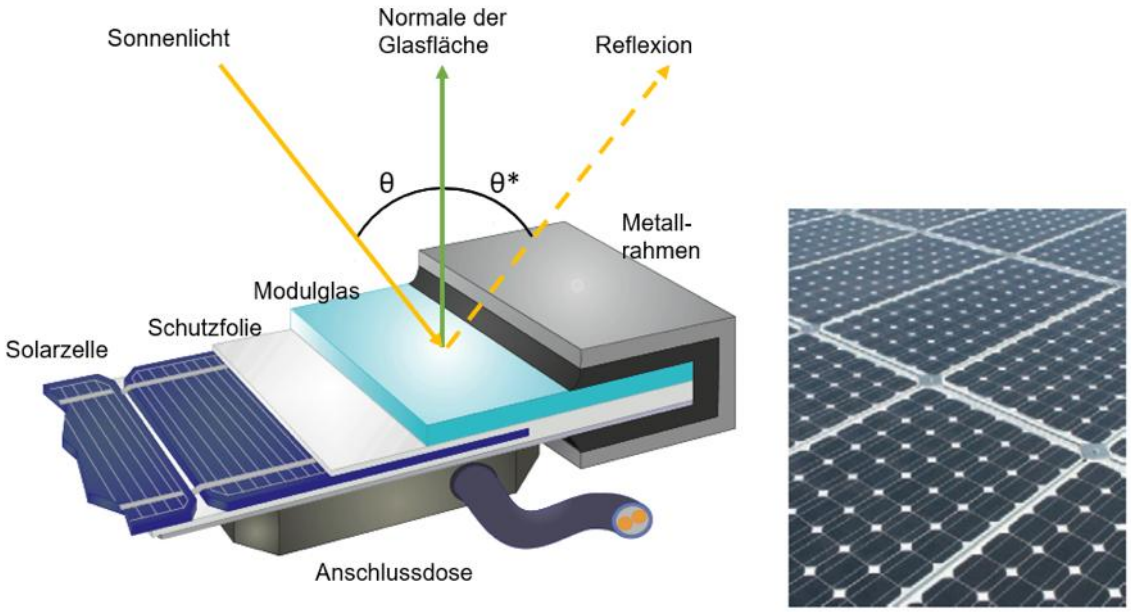


Abbildung 19: Aufbau eines PV-Moduls und Darstellung des Reflexionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ - Quelle: [3] (modifiziert)

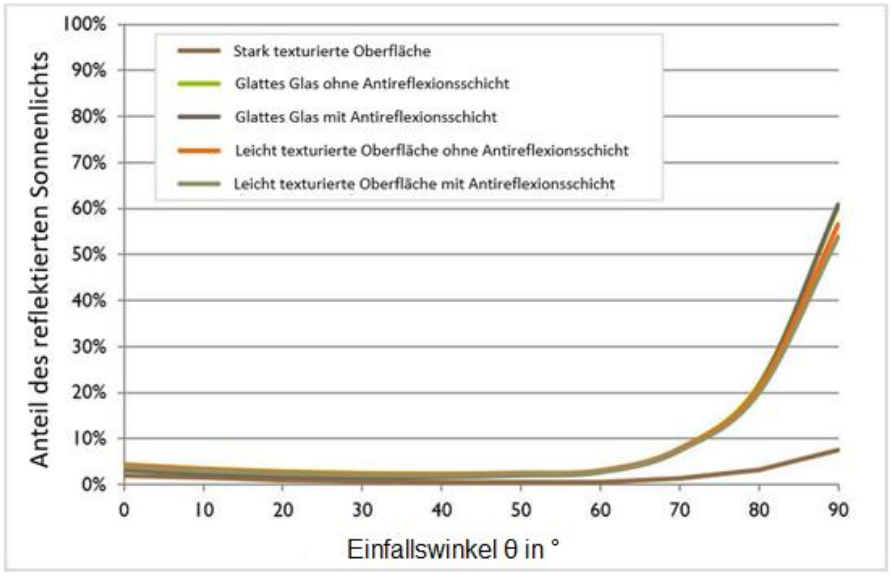


Abbildung 20: Anteil des reflektierten Sonnenlichts in Abhängigkeit zum Einfallswinkel, dargestellt für unterschiedliche Modulglastypen - Quelle: [4], modifiziert

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. Neue PV-Module verfügen in der Regel über eine Antireflexbeschichtung und zumindest eine leicht texturierte Oberfläche. Dies gilt auch für den später verwendeten Modultyp.



Abbildung 21: Veranschaulichung der Reflexion an einem texturierten Modulglas (mitte-links) und einem glatten Modulglas (mitte-rechts) - Quelle Aufnahme: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

2.4.2 Berechnung von 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].

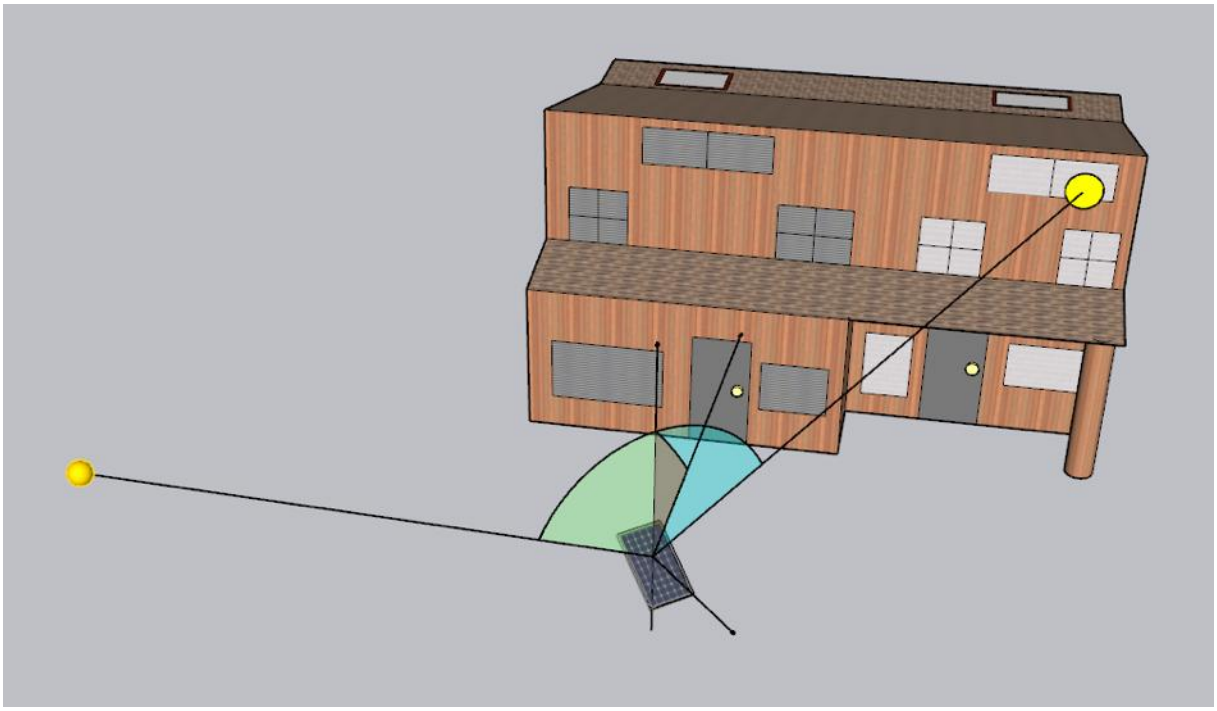


Abbildung 22: Veranschaulichung der geometrischen Herleitung einer Reflexion - Quelle: Eigene Abbildung

2.5 Blendwirkungen auf beliebige Flugpfade

2.5.1 Auswertungsmethodik

Die Auswertung basiert auf einer systematischen Rasterung des umgebenden Luftraums durch definierte Beobachtungspunkte (OP).

Für jeden Beobachtungspunkt werden für jeden Zeitpunkt des Jahres die potenziellen Reflexionen sowie die daraus resultierenden Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken berechnet. Die Berechnung erfolgt mit einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten über ein vollständiges Jahr, sodass sowohl kurzzeitige als auch wiederkehrende Effekte erfasst werden können.

Die Ergebnisse werden anschließend zu Kenngrößen aggregiert und für die Bewertung herangezogen. Hierzu zählen insbesondere:

- die maximale Leuchtdichte,
- die Gesamtblenddauer pro Jahr sowie
- die maximale tägliche Blenddauer.

Für die Berechnung wurde die Software PV-GlareCheck (PV-GlareCheck.com) verwendet. Dabei werden sowohl die Photovoltaikflächen als auch die Betrachtungspunkte innerhalb eines gemeinsamen georeferenzierten Koordinatensystems modelliert.

Bei der Modellierung der PV-Flächen wird die örtliche Topografie berücksichtigt, sodass die tatsächlichen Geländeverhältnisse in die Analyse einfließen. Die Georeferenzierung ermöglicht zudem eine präzise Abbildung des lokalen Sonnenverlaufs.

Auf Grundlage der Reflexionsprofile der verwendeten PV-Module kann anschließend die resultierende Leuchtdichte der reflektierten Sonnenstrahlung bestimmt werden. Da von einem marktüblichen PV-Modul mit leicht texturierter Oberfläche und Anti-Reflex-Beschichtung ausgegangen wird, konnte hierbei auf entsprechende Referenzdaten für das Reflexionsprofil zurückgegriffen werden.

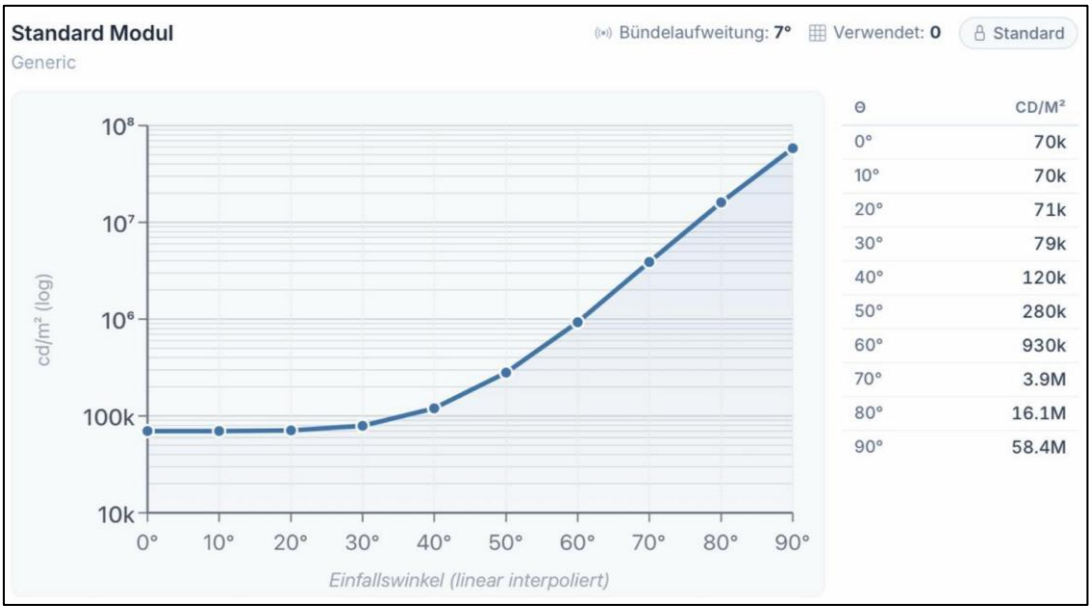


Abbildung 23: Verwendetes Reflexionsprofil - Quelle: PV-GlareCheck.com

Die durchgeführten Berechnungen basieren auf der Annahme eines dauerhaft klaren Himmels und stellen damit einen konservativen Worst-Case-Ansatz dar.

In der Realität ist aufgrund von Bewölkung, atmosphärischer Streuung sowie variierenden Sichtbedingungen von einer geringeren Häufigkeit und Intensität möglicher Blendwirkungen auszugehen.

Die dargestellten Ergebnisse stellen daher eine bewusste konservative Abschätzung dar und überschätzen tendenziell die tatsächlich zu erwartenden Blendwirkungen.

Obwohl PV-GlareCheck ein professionelles Programm zur Berechnung von durch Photovoltaikanlagen verursachten Blendwirkungen darstellt, kann die reale Situation im Modell nur vereinfacht abgebildet werden. Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen und den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort können daher grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden.

2.5.2 Zylinder

Zur systematischen Bewertung möglicher Blendwirkungen im Luftraum wurde um die Photovoltaikanlage ein räumliches Untersuchungsmodell definiert.

Zunächst wurde ein Kreis mit minimalem Radius bestimmt, der das betrachtete Anlagencluster vollständig umschließt. Ausgehend von diesem Referenzkreis wurden zwei konzentrische Radien festgelegt: ein Radius mit einem Abstand von +50 m sowie ein weiterer Radius mit einem Abstand von +400 m zum Referenzkreis.

Entlang dieser beiden Radien wurden anschließend in unterschiedlichen Höhen Beobachtungspunkte (OP) im Luftraum definiert. Durch die Kombination aus Radius und Höhe ergibt sich jeweils eine zylindrische Anordnung von Beobachtungspunkten um die Anlage.

Auf diese Weise werden zwei zylindrische Untersuchungsräume definiert. Entlang dieser Zylinder werden die potenziellen Blendwirkungen für alle definierten Beobachtungspunkte berechnet und ausgewertet. Durch dieses Vorgehen kann systematisch untersucht werden, ob und in welchen Entfernungen sowie Höhen im Luftraum Blendwirkungen auftreten können.

Die Zylinder werden anschließend für die Ergebnisdarstellung zu 2D-Abbildungen „ausgerollt“. Die gewählte Darstellung mittels „aufgerollter Zylinder“ dient der vollständigen Abbildung des umgebenden Luftraums unabhängig von konkreten Flugrouten. Jeder Beobachtungspunkt repräsentiert dabei eine definierte Kombination aus horizontaler Position relativ zur PVA (Azimut) und Höhe.

Die Darstellung ist daher nicht als Abbildung konkreter Flugmanöver zu verstehen, sondern als möglichst vollständige physikalische Erfassung aller möglichen Blendkonstellationen im betrachteten Luftraum.

2.5.3 Grenzwerte

2.5.3.1 Stand der Literatur

Für militärische Sichtanflüge von Hubschraubern existieren in der veröffentlichten Literatur keine einheitlich normierten, unmittelbar hubschrauberspezifischen numerischen Grenzwerte für Blendwirkungen durch Reflexionen an Photovoltaikanlagen.

In der gutachterlichen Praxis (im Allgemeinen, nicht nur für Flugverkehr) werden Schwellenwerte für die Intensität (Leuchtdichte) von etwa 20.000[4] über 30.000[5] und 50.000[6] bis 100.000[7] cd/m² angesetzt.

Der untere Bereich erscheint für helle Tages-Sichtanflüge jedoch nur eingeschränkt belastbar. Selbst in einschlägigen Blendgutachten wird darauf hingewiesen, dass Leuchtdichten oberhalb von 20.000 bzw. 30.000 cd/m² tagsüber nicht zwangsläufig eine erhebliche Blendwirkung verursachen, insbesondere wenn die reflektierende Quelle nur einen kleinen Teil des Sichtfeldes einnimmt.

Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass ein sinnvoller Bewertungs- bzw. Grenzwert eher im oberen Bereich der dargestellten Bandbreite anzusetzen ist.

2.5.4 Einfluss von Sonnenbrillen, Visieren und Cockpitverglasung

Für den Flugbetrieb ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass Piloten regelmäßig Sonnenbrillen oder getönte Visiere verwenden.

- Die FAA empfiehlt für Piloten Sonnenbrillen mit einer Lichttransmission von etwa 15–30 %. [13]
- Die UK Civil Aviation Authority (CAA) empfiehlt, dass Piloten-Sonnenbrillen nicht dunkler als 80 % Absorption sein sollten (also mindestens 20 % Transmission aufweisen).[8]
- In militärischer Luftfahrtliteratur werden für dunkle Aviator-Visiere Transmissionen von etwa 12–18 % angegeben.[9]
- Darüber hinaus reduziert auch die Cockpitverglasung die sichtbare Strahlung. Für zivile Flugzeugwindscreens wird eine mittlere sichtbare Transmission von etwa 82,8 % angegeben. [14]

[4] Abgeleitet aus [6]
[5] Abgeleitet aus [10]
[6] Abgeleitet aus [11]
[7] Abgeleitet aus [12]
[8] https://www.caa.co.uk/aeromedical-examiners/medical-standards/pilots/medical-conditions/visual/use-of-sunglasses-for-pilots/
[9] https://dgcamedical.in/The%20Best%20Pilot%20Sunglasses.htm

2.5.4.1 Transmissionsansatz

Unter der vereinfachenden Annahme einer linearen Abschwächung durch optische Transmission kann aus einem inneren Luminanzschwellenwert (Grenzwert zur erheblichen Blendung) am Auge L_{innen} ein äquivalenter externer Wert $L_{\text{außen}}$ abgeleitet werden:

$$L_{\text{außen}} = \frac{L_{\text{innen}}}{\tau}$$

Dabei beschreibt τdie Transmission der jeweils wirksamen optischen Komponenten.

Piloten verwenden häufig Sonnenbrillen oder getönte Visiere mit Transmissionen im Bereich von etwa 20–30 %. Zusätzlich reduziert die Cockpitverglasung die einfallende sichtbare Strahlung. Für zivile Flugzeugwindscreens wird eine mittlere sichtbare Transmission von etwa 82,8 % angegeben. Im Rahmen dieser Betrachtung wird angenommen, dass dieser Wert näherungsweise auch auf Militärhubschrauber übertragbar ist.

Berücksichtigt man diese zusätzliche Abschwächung, ergibt sich eine Gesamttransmission von

$$\tau_{\text{gesamt}} = \tau_{\text{Brille}} \cdot \tau_{\text{Scheibe}}$$

Damit ergeben sich Gesamttransmissionen von etwa 0,248 (30 % Brille) bzw. 0,166 (20 % Brille). Im Mittel ergibt sich daraus eine Gesamttransmission von rund $\tau_{\text{gesamt}} \approx 0{,}21$ (entsprechend etwa 21 %).

2.5.4.2 Vorgeschlagener Bewertungsansatz für militärische Sichtanflüge

Wird für die Gesamttransmission der mittlere Wert von 0,21 angesetzt, ergeben sich aus den in der Literatur diskutierten inneren Schwellenwerten folgende äquivalente externe Leuchtdichten:

$$L_{\text{außen}} = \frac{L_{\text{innen}}}{\tau_{\text{gesamt}}}$$

Für einen inneren Schwellenwert von 20.000 cd/m² (sehr konservativer Ansatz) ergibt sich damit eine externe Leuchtdichte von etwa 95.000 cd/m².

Für einen inneren Schwellenwert von 100.000 cd/m² (optimistischer Ansatz) ergibt sich entsprechend eine externe Leuchtdichte von etwa 476.000 cd/m².

Für die weitere Bewertung können diese Werte auf 100.000 cd/m² beziehungsweise 500.000 cd/m² gerundet werden.

Damit ergeben sich zwei repräsentative Bewertungsgrößen für externe Reflexionsleuchtdichten:

- etwa 100.000 cd/m² als konservativer Orientierungswert für unkritische Blendwirkungen
- etwa 500.000 cd/m² als Größenordnung, ab der erhebliche Blendwirkungen plausibel als sehr wahrscheinlich auftreten können.

Es ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass mit dieser Herleitung keine verbindlichen Grenzwerte definiert werden sollen. Ziel der Berechnung ist vielmehr, auf Grundlage der verfügbaren Literatur und realistischer Annahmen zu optischen Transmissionen eine plausible Größenordnung bzw. Bandbreite für mögliche Bewertungs- oder Grenzwerte abzuleiten. Die konkrete Festlegung eines verbindlichen Grenzwertes obliegt letztlich der zuständigen Fachstelle.

2.5.5 Observationspunkte

Zur Bewertung der Blendwirkungen werden auf den definierten Zylindern Beobachtungspunkte (OP) systematisch verteilt, um den umgebenden Luftraum umfassend abzudecken.

Hierzu wird jeder Zylinder in gleichmäßige Winkelabschnitte von 10° unterteilt (Azimut 0° bis 350°), sodass möglichst alle relevanten Blickrichtungen zur Photovoltaikanlage erfasst werden.

Zusätzlich werden für jede Richtung feste Höhenstufen berücksichtigt (1 m, 10 m, 25 m, 50 m, 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 600 m, 800 m und 1000 m über Grund), um den vertikalen Luftraum differenziert abzubilden.

Jeder Beobachtungspunkt ist damit eindeutig durch

- seine Richtung (Azimut),
- seine Höhe über Grund sowie
- seine Entfernung zur Anlage

definiert.

Diese strukturierte Anordnung ermöglicht eine flächendeckende und reproduzierbare Analyse möglicher Blendwirkungen in Abhängigkeit von Flugrichtung und Flughöhe.



Abbildung 24: Positionen der OP (gestapelt) - Quelle Hintergrund: OpenStreetMap

2.5.6 Ergebnisse

Zur anschaulichen Auswertung werden die zuvor definierten zylindrischen Untersuchungsräume rechnerisch „aufgerollt“ und in eine zweidimensionale Darstellung überführt. Dabei entspricht der Umfang des Zylinders der horizontalen Achse der Grafik, während die vertikale Achse die Höhe abbildet. Auf diese Weise kann der gesamte umgebende Luftraum in einer bestimmten Entfernung zur Anlage in einer Ebene dargestellt werden.

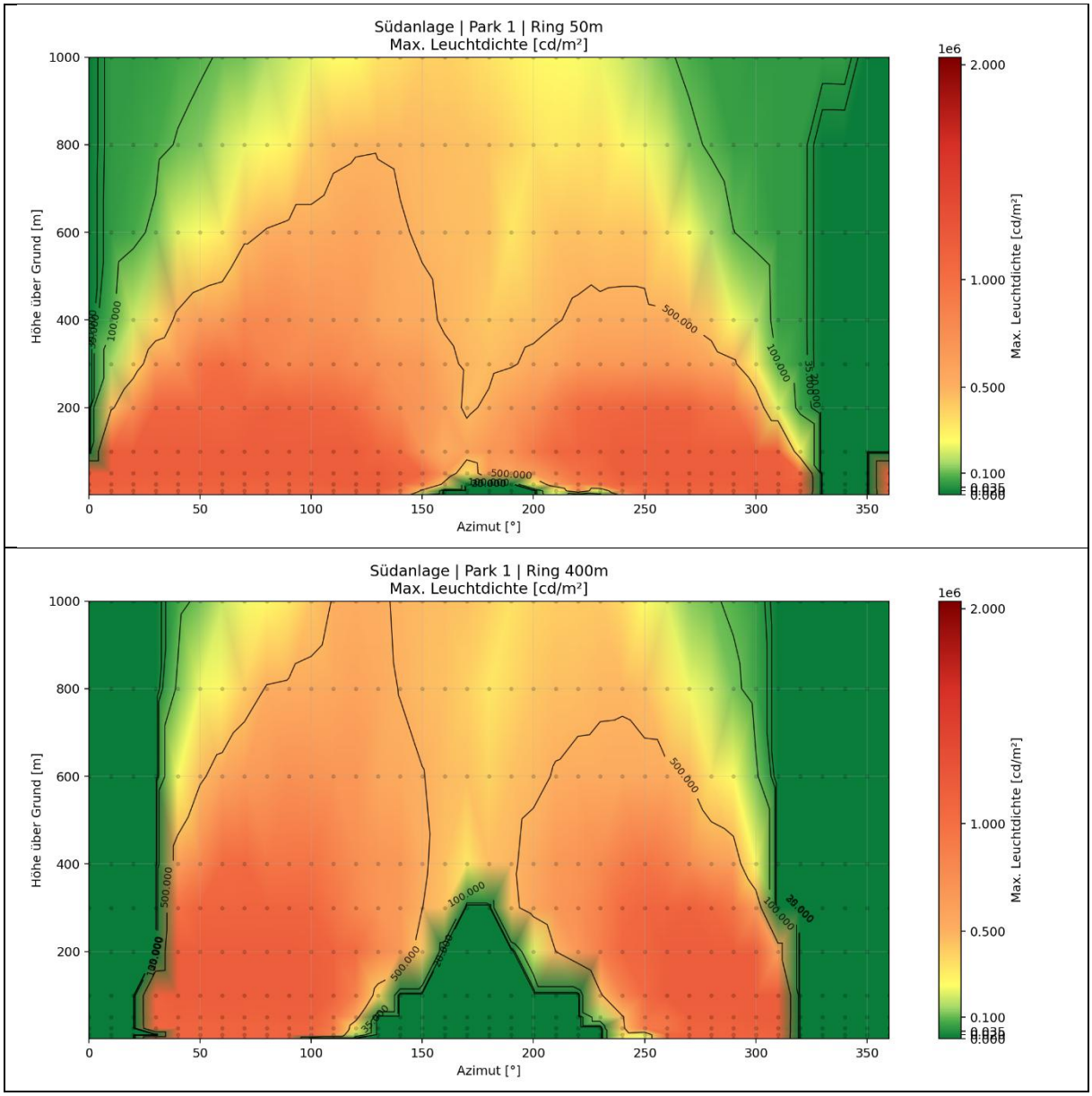
Die x-Achse beschreibt die Blickrichtung relativ zur Anlage in Form des Azimuts (0°–360°). Die y-Achse stellt die Höhe dar, entweder als Höhe über Grund oder als absolute Höhe über Normalnull (NN), abhängig von der jeweiligen Darstellung.

Die dargestellten Flächen ergeben sich aus einer Interpolation der diskret berechneten Beobachtungspunkte, sodass ein kontinuierliches Bild der Blendwirkung entsteht. Die Farbkodierung visualisiert dabei die jeweilige Bewertungsgröße, beispielsweise die Gesamtblenddauer, die maximale tägliche Blenddauer oder die maximale Leuchtdichte. Helle bzw. warme Farben kennzeichnen höhere Werte und damit potenziell kritischere Bereiche, während dunkle bzw. kühle Farben geringere oder unkritische Werte darstellen.

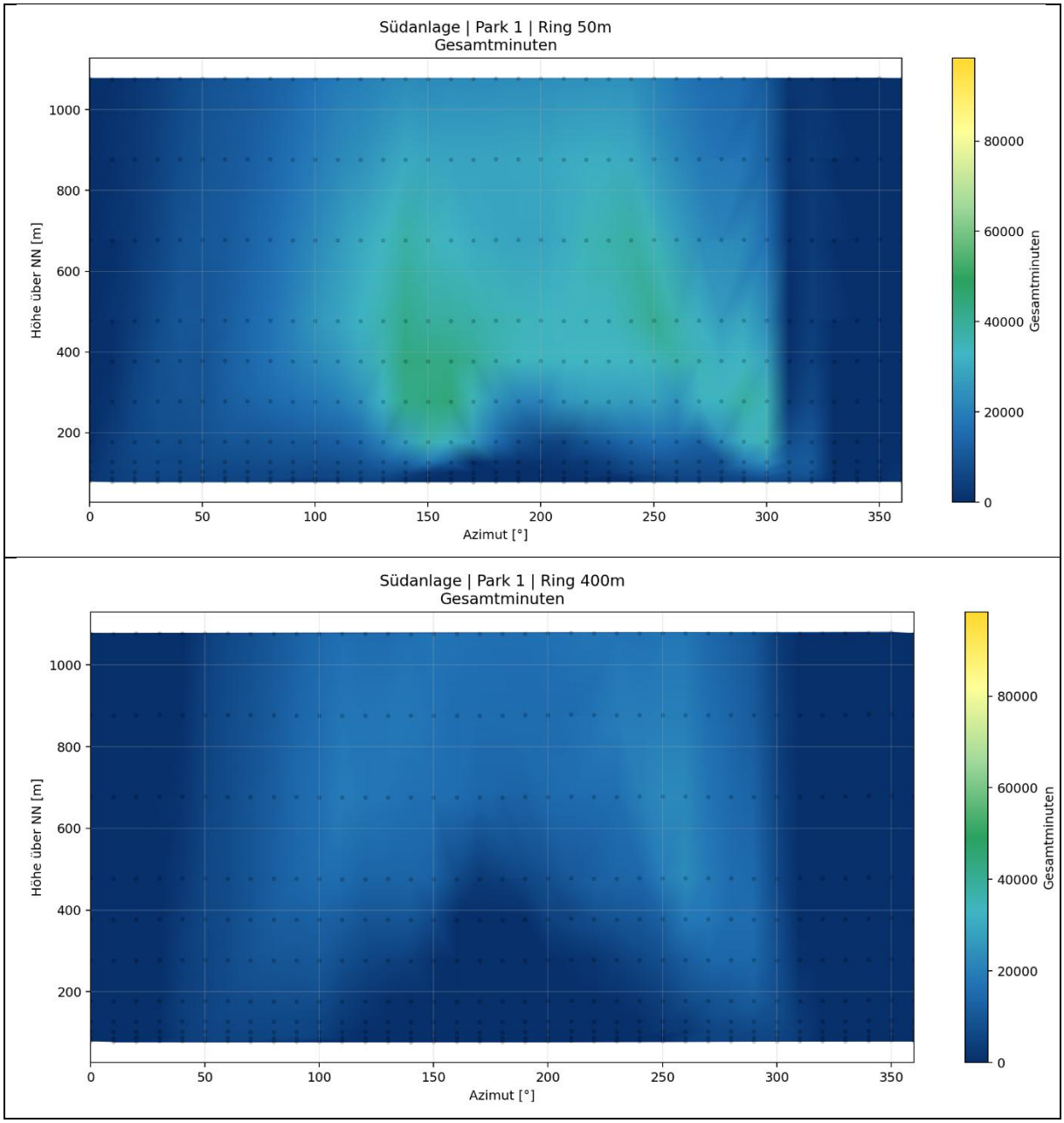
Diese Darstellungsform ermöglicht eine kompakte und gleichzeitig vollständige Übersicht über die Blendwirkungen in Abhängigkeit von Blickrichtung und Flughöhe.

2.5.6.1 Vergleich Zylinder 50 und 400 für südausgerichtete Anlage

Ergebnisdiagramme 1: Blendwirkungen auf dem 50m-Zylinder (oben) und 400m-Zylinder (unten) für eine Südanlage – Maximale Leuchtdichte



Ergebnisdiagramme 2: Blendwirkungen auf dem 50m-Zylinder (oben) und 400m-Zylinder (unten) für eine Südanlage – Gesamtminuten



Die Abbildungen zeigen die Verteilung der maximalen Leuchtdichte sowie der zeitlichen Kenngröße (Gesamtminuten) in Abhängigkeit von Azimut und Beobachtungshöhe für die Südanlage am inneren (50 m) und äußeren (400 m) Beobachtungszylinder.

Am inneren Zylinder (50 m) treten erhöhte Leuchtdichten über einen breiten Azimutbereich auf, insbesondere im Bereich zwischen etwa 100° und 280°. Innerhalb dieses Bereichs sind zwei ausgeprägte Maxima erkennbar. Die erhöhten Werte erstrecken sich über einen großen Höhenbereich bis in mehrere hundert Meter über Grund.

Am äußeren Zylinder (400 m) ist ebenfalls ein breiter Azimutbereich mit erhöhten Leuchtdichten erkennbar, jedoch mit stärker strukturierter Ausprägung. Die Bereiche erhöhter Werte sind deutlicher voneinander getrennt und zeigen eine Konzentration auf bestimmte Azimutbereiche.

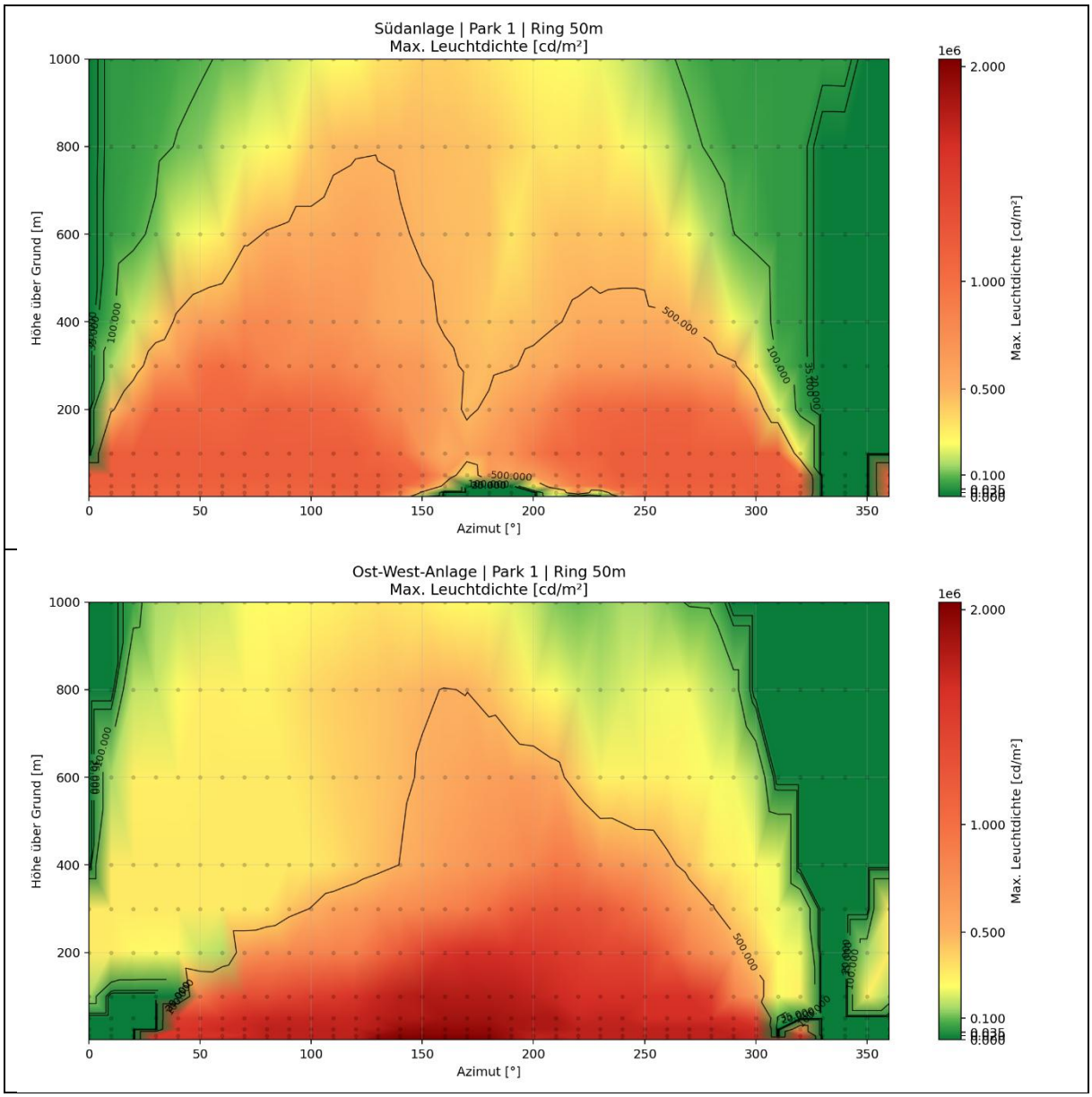
Die Verteilung der Gesamtminuten zeigt am inneren Zylinder (50 m) einen zusammenhängenden Bereich erhöhter Werte über einen breiten Azimutbereich, mit Schwerpunkten im südlichen Sektor. Die höchsten Werte treten dabei in niedrigen bis mittleren Beobachtungshöhen auf.

Am äußeren Zylinder (400 m) sind die Bereiche erhöhter Gesamtminuten deutlich kleiner und auf engere Azimutbereiche beschränkt. Große Teile des betrachteten Raums weisen nur geringe oder keine Blenddauer auf.

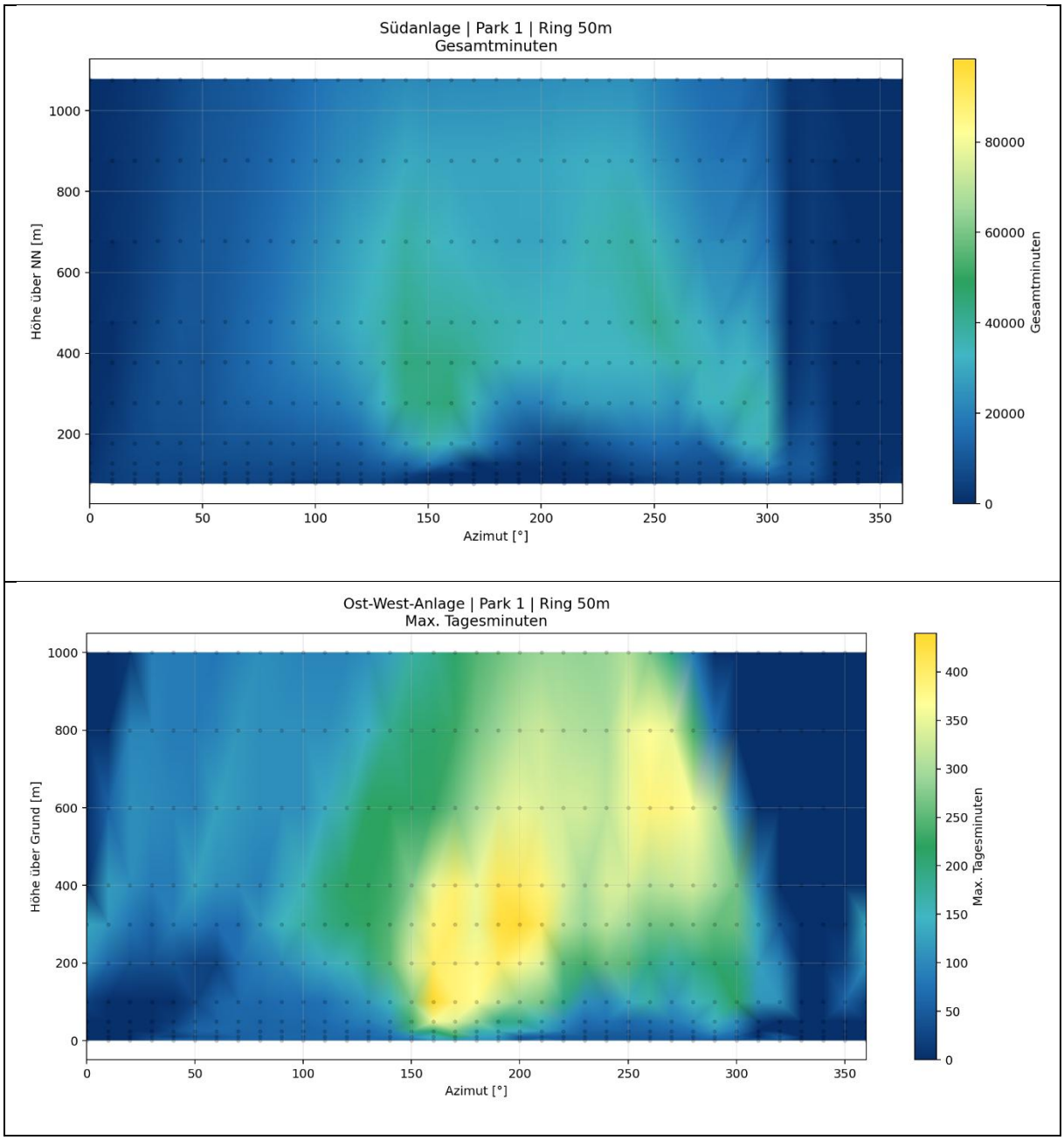
Insgesamt zeigt sich in allen dargestellten Kenngrößen eine klare räumliche Struktur der Blendwirkungen in Abhängigkeit von Azimut, Beobachtungshöhe und Entfernung zur Anlage.

2.5.6.2 Vergleich Süd- und Ost-West-Anlage

Ergebnisdiagramme 3: Vergleich Süd (oben) mit Ost-West (unten), 50m-Zylinder: Maximale Leuchtdichte



Ergebnisdiagramme 4: Vergleich Süd (oben) mit Ost-West (unten), 50m-Zylinder: Blenddauer



Die Abbildungen zeigen die Verteilung der maximalen Leuchtdichte sowie der zeitlichen Kenngröße (Gesamtminuten) für die Südanlage und die Ost-West-Anlage am inneren Beobachtungszylinder (50 m).

Bei der Südanlage erstrecken sich erhöhte Leuchtdichten über einen breiten Azimutbereich, insbesondere zwischen etwa 100° und 280°. Innerhalb dieses Bereichs sind zwei ausgeprägte Maxima erkennbar, die sich über einen großen Höhenbereich bis in mehrere hundert Meter über Grund ausdehnen.

Im Gegensatz dazu zeigt die Ost-West-Anlage eine stärker zusammenhängende Verteilung erhöhter Leuchtdichten mit einem Schwerpunkt im südlichen Azimutbereich. Die Bereiche hoher Werte sind dabei weniger in einzelne Maxima unterteilt, sondern bilden eine großflächigere Zone erhöhter Leuchtdichte.

Die Verteilung der Gesamtminuten zeigt bei der Südanlage einen breiten, vergleichsweise gleichmäßig ausgeprägten Bereich erhöhter Werte über den südlichen Azimutbereich hinweg. Die höchsten Werte treten überwiegend in niedrigen bis mittleren Beobachtungshöhen auf.

Bei der Ost-West-Anlage ist dagegen eine deutlich stärkere Konzentration der Gesamtminuten auf einen zentralen Azimutbereich erkennbar. Die höchsten Werte treten hier in einem vergleichsweise kompakten Bereich auf, während angrenzende Bereiche deutlich geringere Werte aufweisen.

Insgesamt unterscheiden sich beide Anlagenkonfigurationen sowohl hinsichtlich der räumlichen Verteilung als auch hinsichtlich der Ausprägung der Blendwirkungen am inneren Beobachtungszylinder.

Die vollständigen Darstellungen aller erzeugten Grafiken sind im Anhang enthalten.

2.5.6.3 Detaillierte Auswertung einzelner OP

Für exemplarische Beobachtungspunkte (OP) werden im Folgenden noch detailliertere Auswertungen dargestellt.

Folgende OP werden dabei näher analysiert:

1. **OP 170:** OP auf Zylinder 50 m, Südausrichtung, höchste Beleuchtungsstärke
2. **OP 589:** OP auf Zylinder 400 m, Südausrichtung, höchste Beleuchtungsstärke
3. **OP 463:** OP auf Zylinder 50 m, Ost-West-Ausrichtung, höchste Beleuchtungsstärke
4. **OP 67:** OP auf Zylinder 400 m, Ost-West-Ausrichtung, höchste Beleuchtungsstärke
5. **OP 64:** Blendung von beiden Modulfeldern (Ost-West)

Die ergänzenden Detailauswertungen einzelner Beobachtungspunkte zeigen, dass hohe Leuchtdichten typischerweise nur in sehr begrenzten Zeitfenstern auftreten. Diese Ereignisse sind meist auf wenige Minuten bzw. kurze Zeitintervalle beschränkt und treten nicht kontinuierlich über längere Zeiträume auf.

Zudem wird deutlich, dass sich die Zeitpunkte hoher Leuchtdichten in charakteristischer Weise über das Jahr verteilen und an bestimmte Sonnenstände gebunden sind. Dadurch lassen sich diese Konstellationen eindeutig zeitlich und geometrisch eingrenzen.

Die Detailauswertungen bestätigen damit die aus den Flächendarstellungen abgeleitete Aussage, dass relevante Blendwirkungen nicht flächig auftreten, sondern auf klar identifizierbare Einzelfälle beschränkt sind.

2.5.6.3.1 OP 170

Zylinder 50 m Südausrichtung, höchste Beleuchtungsstärke

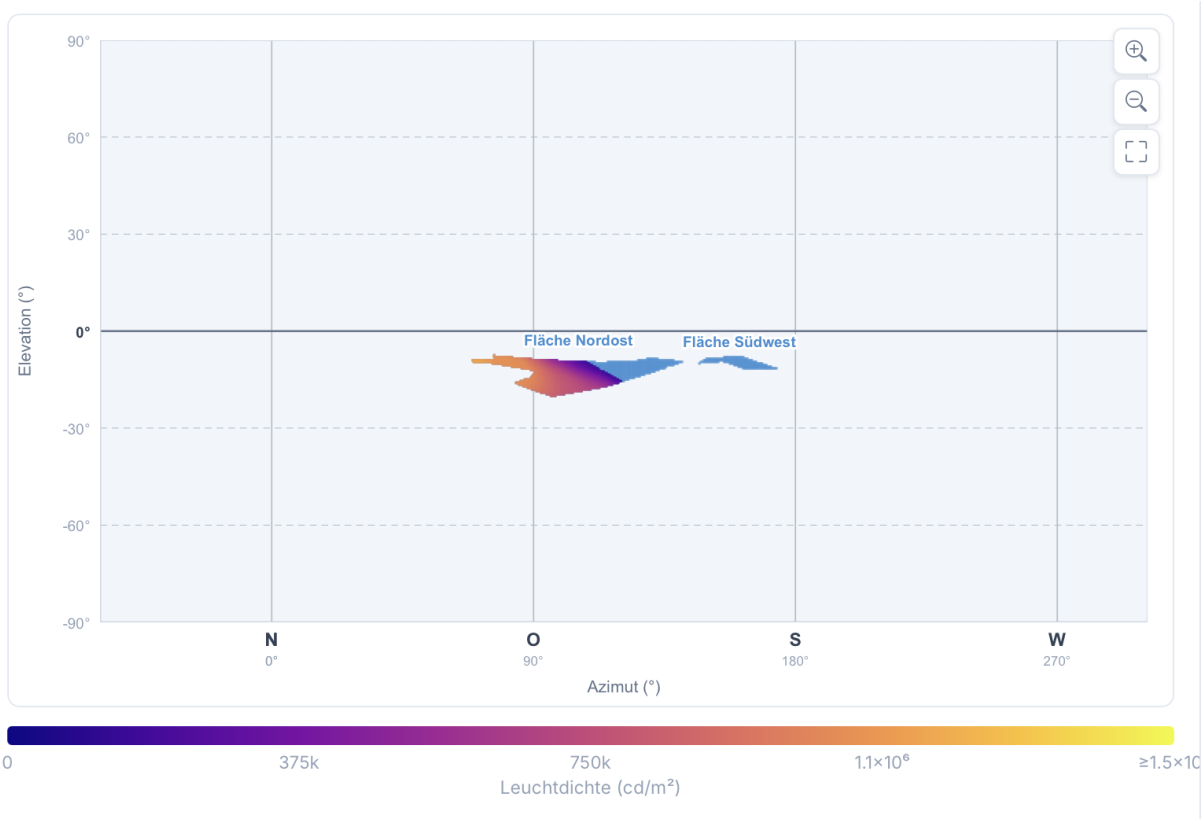


Abbildung 25: OP 170: Sichtbare PV-Fläche und Blendintensität

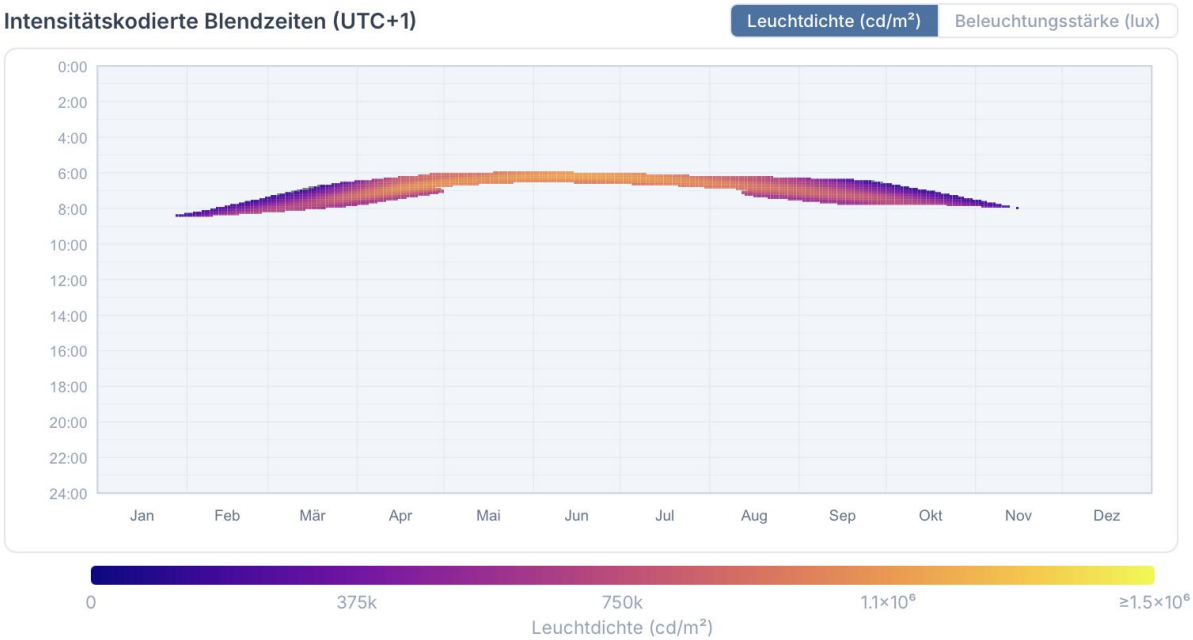


Abbildung 26: OP 170: Blendintensität Jahresverlauf

2.5.6.3.2 OP 589

Zylinder 400 m, Südausrichtung, höchste Beleuchtungsstärke

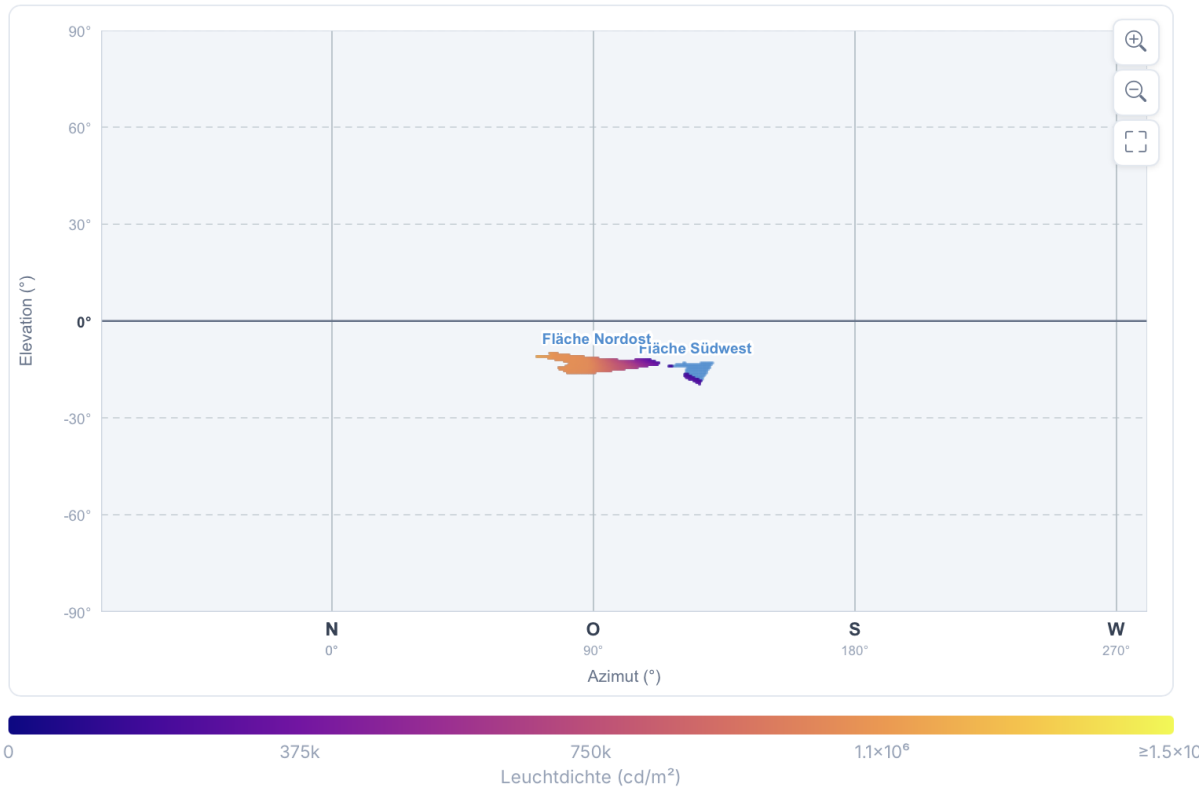


Abbildung 27: OP 589: Sichtbare PV-Fläche und Blendintensität

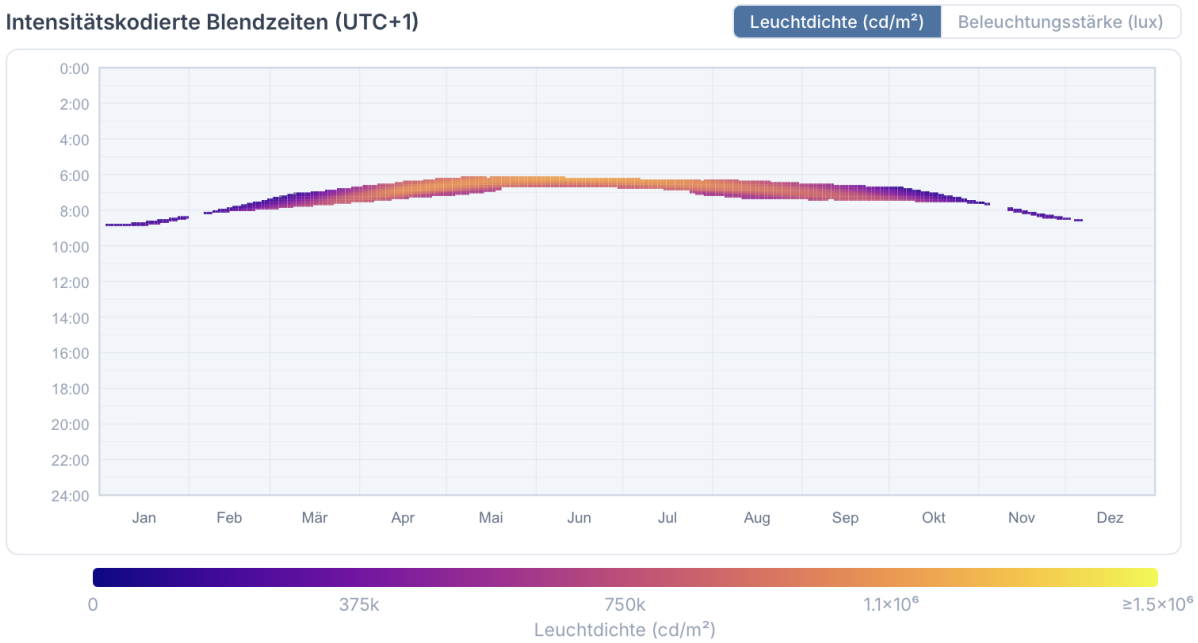


Abbildung 28: OP 589: Blendintensität Jahresverlauf

2.5.6.3.3 OP 463

Zylinder 50 m Ost-West, höchste Beleuchtungsstärke

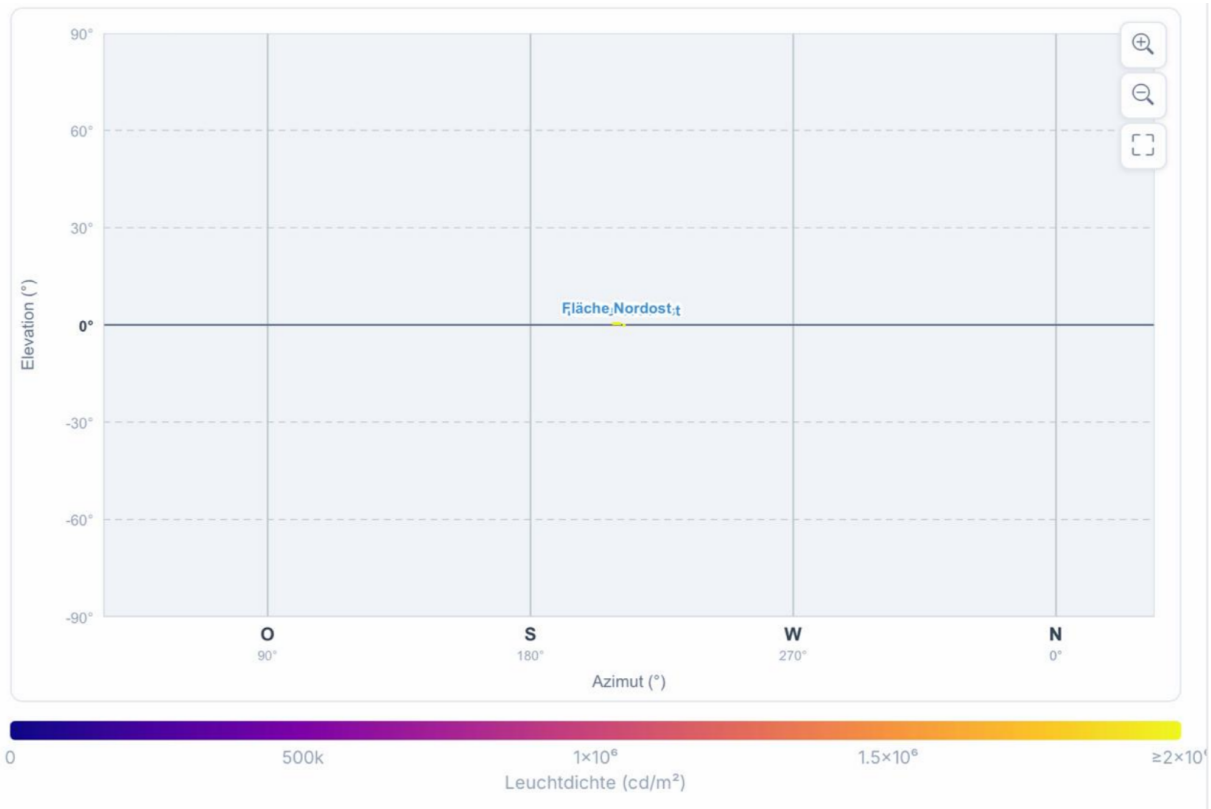


Abbildung 29: OP 463: Sichtbare PV-Fläche und Blendintensität

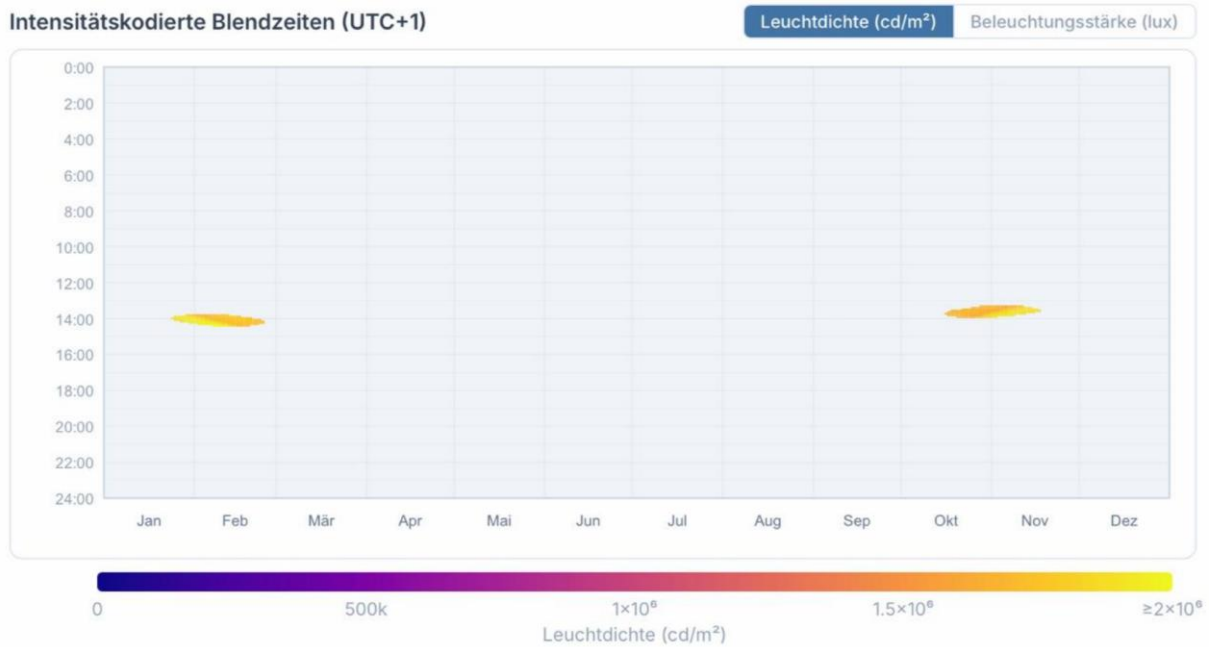


Abbildung 30: OP 463: Blendintensität Jahresverlauf

2.5.6.3.4 OP 67

Zylinder 400 m Ost-West, höchste Beleuchtungsstärke



Abbildung 31: Sichtbare PV-Fläche und Blendintensität

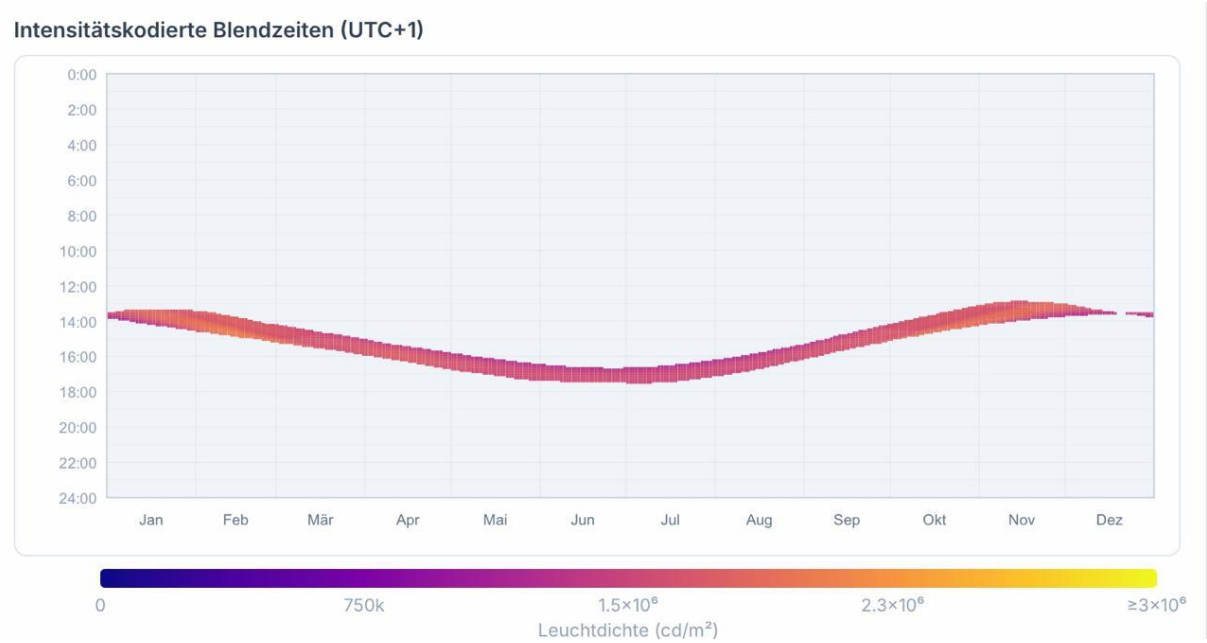


Abbildung 32: Blendintensität Jahresverlauf

2.5.6.3.5 OP 64

OP 64 befindet sich in derselben horizontalen Position wie OP 67. Während OP 67 eine Höhe von 600 m repräsentiert, stellt OP 64 einen bodennahen Flug dar.

Exemplarisch sind in den nachfolgenden Diagrammen die Bereiche mit Leuchtdichten unterhalb des Grenzwertes von 100.000 cd/m² grau dargestellt.



Abbildung 33: OP 64: Sichtbare PV-Fläche und Blendintensität (gefiltert: Intensität < 100.000 cd/m²)

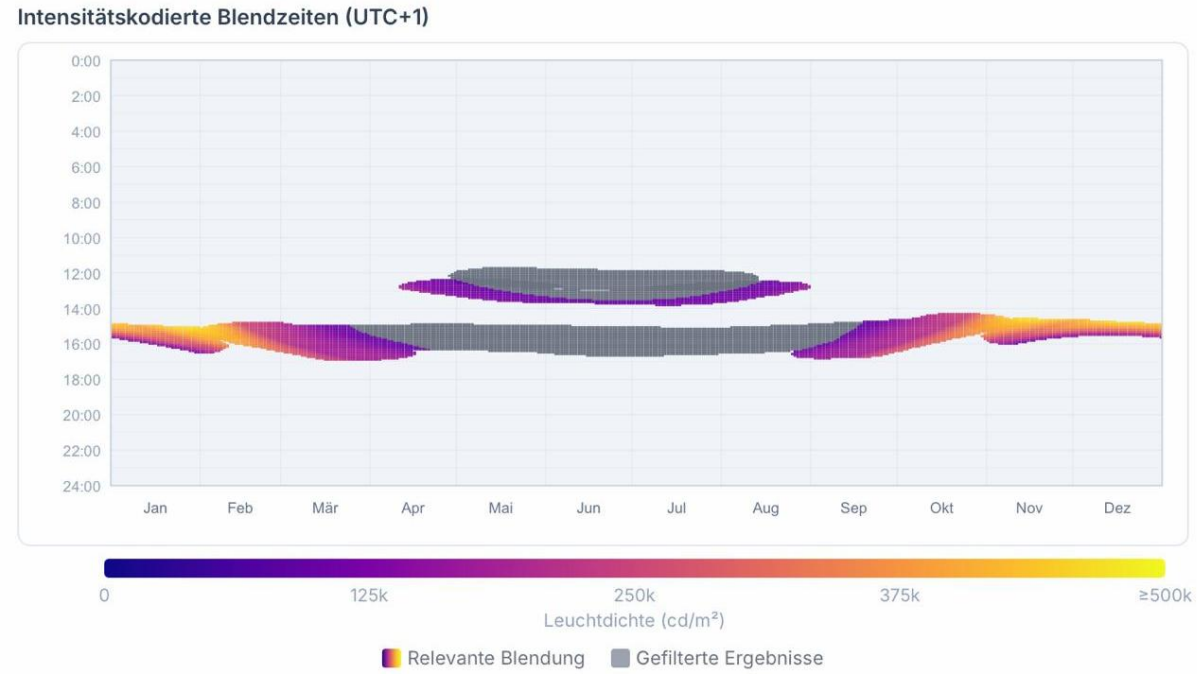


Abbildung 34: OP 64: Blendintensität Jahresverlauf

2.6 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt sowohl hinsichtlich der Entfernung zur Anlage als auch der Anlagenkonfiguration deutliche Unterschiede in der Charakteristik der Blendwirkungen.

Im Hinblick auf die Entfernung zur Anlage wird deutlich, dass sich die Blendwirkungen mit zunehmendem Abstand räumlich stärker konzentrieren und zeitlich deutlich abnehmen. Während im Nahbereich (50 m) sowohl hohe Leuchtdichten als auch längere Einwirkdauern über vergleichsweise breite Azimutbereiche auftreten können, reduziert sich im Fernbereich (400 m) insbesondere die Dauer der Blendwirkungen signifikant. Hohe Leuchtdichten können zwar weiterhin auftreten, beschränken sich jedoch auf räumlich deutlich stärker begrenzte Bereiche.

Der Vergleich der Anlagenkonfigurationen zeigt darüber hinaus grundlegende Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Blendwirkungen. Die Südanlage weist eine eher zweigeteilte Struktur auf, mit zwei ausgeprägten Bereichen erhöhter Intensität, die den Vormittags- und Nachmittagsstunden zugeordnet werden können. Die betroffenen Azimutbereiche sind dabei relativ breit ausgeprägt.

Demgegenüber zeigt die Ost-West-Anlage eine stärker zusammenhängende und zentral konzentrierte Struktur der Blendwirkungen. Die höchsten Intensitäten und längsten Einwirkdauern treten hier in einem vergleichsweise kompakten Azimutbereich auf, während angrenzende Bereiche deutlich geringere Werte aufweisen.

Insgesamt führt die Südanlage damit zu einer breiteren räumlichen Verteilung der Blendwirkungen, während die Ost-West-Anlage eine stärkere Bündelung in bestimmten Azimutbereichen aufweist.

Für die flugbetriebliche Einordnung ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass sich Piloten in einem dynamischen Bewegungsablauf befinden und ihre Blickrichtung kontinuierlich anpassen. Eine statische Betrachtung einzelner Blickrichtungen stellt daher eine konservative Annahme dar.

Die identifizierten Konstellationen mit erhöhten Leuchtdichten setzen jeweils spezifische Kombinationen aus Flugrichtung, Flughöhe und Sonnenstand voraus. Diese Kombinationen treten im praktischen Flugbetrieb nur in einem Teil der möglichen Flugmanöver auf. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass die tatsächlich auftretende Exposition gegenüber potenziellen Blendwirkungen im realen Flugbetrieb geringer ist als in der rein geometrischen Betrachtung dargestellt.

Im Zusammenhang mit der zuvor hergeleiteten Bewertungsbandbreite für externe Reflexionsleuchtdichten ergibt sich folgende Einordnung:

Externe Leuchtdichten von etwa 100.000 cd/m² (am Cockpit, also vor der Reduzierung durch Sonnenbrille bzw. Visier sowie Cockpitverglasung) können im Allgemeinen als unerheblich eingestuft werden. Je nach zugrunde gelegter Literatur kann sich die Erheblichkeitsgrenze jedoch deutlich nach oben verschieben, bis in einen Bereich von etwa 500.000 cd/m². Werte zwischen diesen beiden Größenordnungen können im ersten Ansatz als moderate Blendwirkungen eingeordnet werden.

Die Auswertung der berechneten Leuchtdichten zeigt, dass in einem wesentlichen Teil der betrachteten Situationen vergleichsweise moderate Werte zwischen 100.000 cd/m² und 500.000 cd/m² auftreten. Sehr hohe Leuchtdichten von mehr als 500.000 cd/m² konzentrieren sich dagegen auf klar abgegrenzte räumliche und zeitliche Bereiche und treten nicht flächendeckend auf.

Unter Berücksichtigung der optischen Minderungsfaktoren (Sonnenbrillen etc.) ist davon auszugehen, dass in einem überwiegenden Anteil der Situationen nur schwache bis moderate Blendwirkungen auftreten. Bereiche mit potenziell sehr hohen Leuchtdichten beschränken sich auf bestimmte Monate, Tageszeiten und Flugrichtungen.

Diese Konstellationen lassen sich anhand der vorliegenden Auswertungen eindeutig identifizieren. Entsprechende Flugmanöver können daher gezielt vermieden oder angepasst werden, sodass relevante Blendwirkungen im praktischen Flugbetrieb weitgehend ausgeschlossen werden können.

Durch eine geeignete Wahl von Flugrichtung, Flughöhe und Zeitpunkt können potenzielle Blendwirkungen gezielt reduziert oder vollständig vermieden werden.

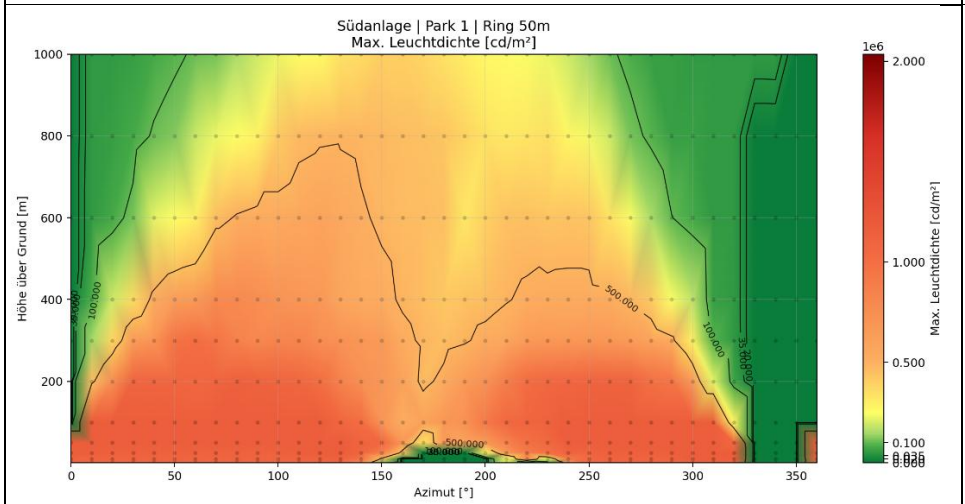
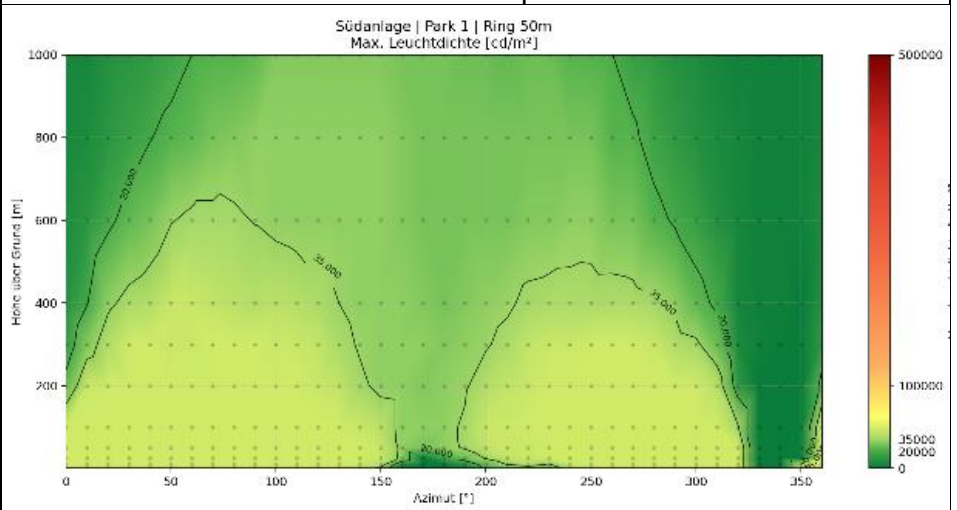
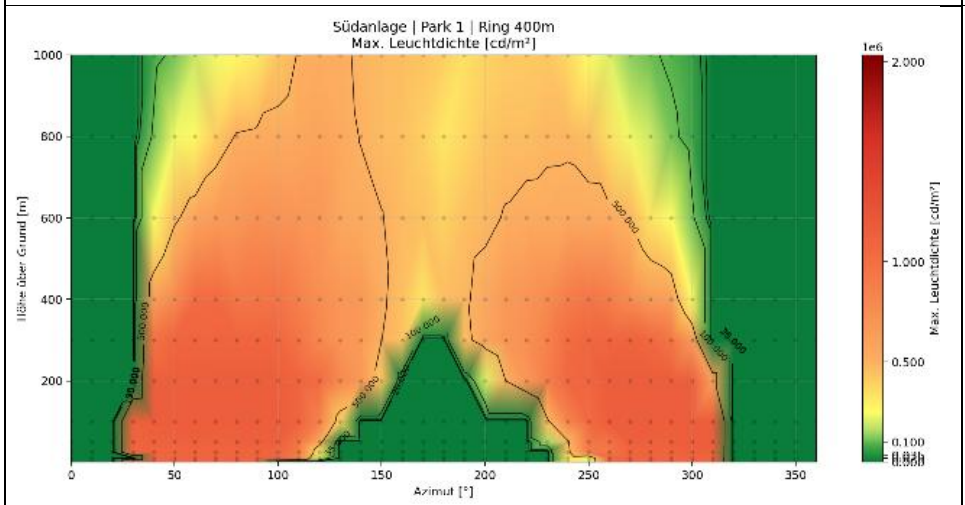
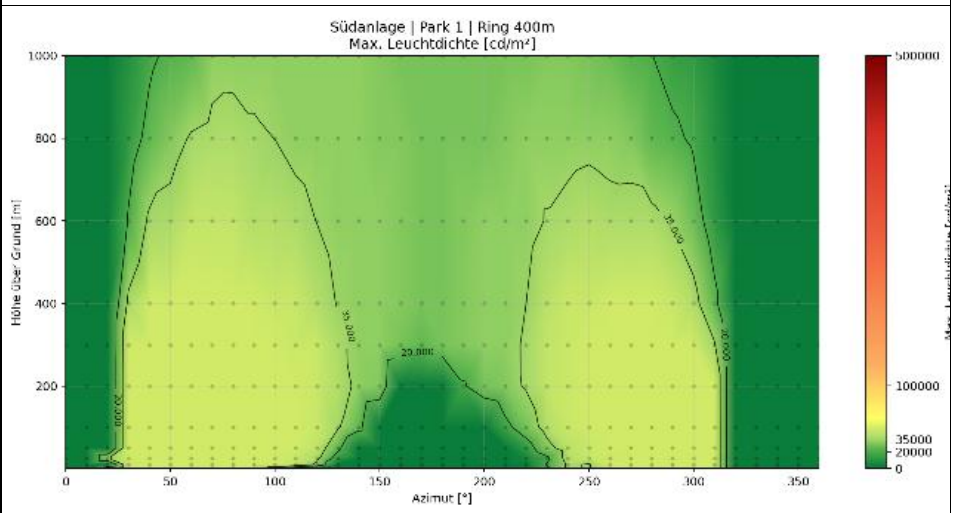
Insbesondere sollten Flugmanöver vermieden werden, bei denen

- die Blickrichtung in die identifizierten Hochintensitätsbereiche fällt,
- gleichzeitig geringe Flughöhen vorliegen und
- die Sonnenposition eine Reflexion begünstigt.

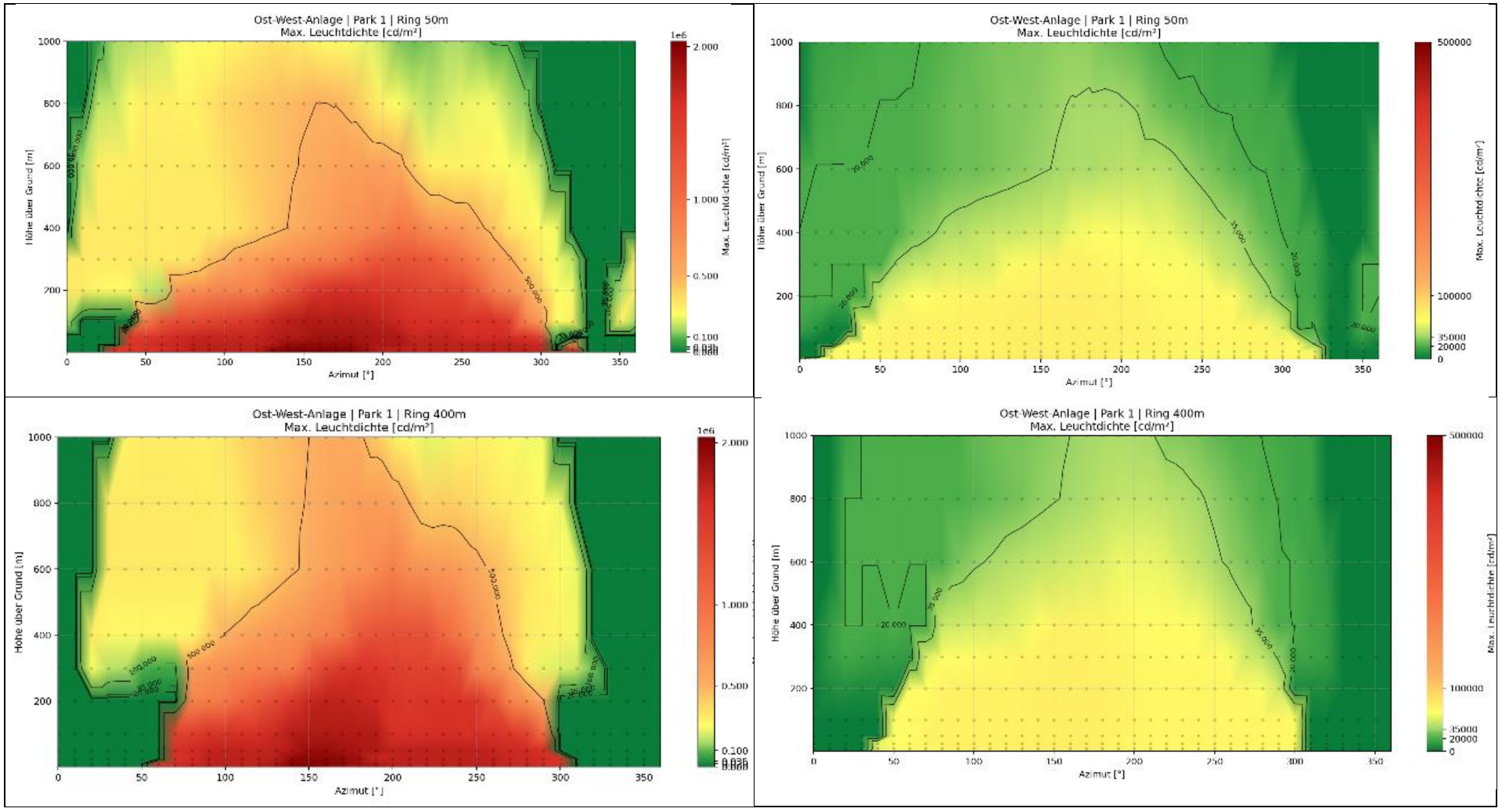
Diese Bereiche sind in den vorliegenden Darstellungen eindeutig gekennzeichnet und können im Flugbetrieb entsprechend berücksichtigt werden.

Darüber hinaus kann der Einfluss auf den Flugverkehr zusätzlich reduziert werden, wenn blendoptimierte bzw. blendärmere Module eingesetzt werden. Die entsprechenden Effekte werden auf den folgenden Seiten dargestellt.

Ergebnisdiagramme 5: Vergleich marktüblichen PV-Modul mit blendreduziertem Spezialmodul

Standardmodul	Blendreduziertes Spezialmodul
	
	

Fortsetzung auf der folgenden Seite.


Ost-West-Anlage | Park 1 | Ring 50m
Max. Leuchtdichte [cd/m²]
Höhe über Grund [m]
Azimut [°]
Max. Leuchtdichte [cd/m²]
1e6
Ost-West-Anlage | Park 1 | Ring 50m
Max. Leuchtdichte [cd/m²]
Höhe über Grund [m]
Azimut [°]
Max. Leuchtdichte [cd/m²]
Ost-West-Anlage | Park 1 | Ring 400m
Max. Leuchtdichte [cd/m²]
Höhe über Grund [m]
Azimut [°]
1e6
Ost-West-Anlage | Park 1 | Ring 400m
Max. Leuchtdichte [cd/m²]
Höhe über Grund [m]
Azimut [°]

Blendreduzierte Photovoltaikspezialmodule stellen grundsätzlich eine wirksame technische Maßnahme zur Reduktion von Blendwirkungen dar. Für einen flächendeckenden Einsatz sind sie derzeit jedoch nur eingeschränkt geeignet.

Zum einen ist die Verfügbarkeit entsprechender Module am Markt begrenzt, da diese häufig als Sonderprodukte gefertigt werden und nicht Teil der standardisierten Massenproduktion sind. Damit verbunden sind in der Regel deutlich höhere Kosten – sowohl auf Modulebene als auch in der Beschaffung und Logistik – was die Wirtschaftlichkeit größerer Anlagen spürbar beeinträchtigen kann.

Zudem ist die Langzeiterfahrung hinsichtlich Alterung, Verschmutzungsverhalten sowie dauerhaft gleichbleibender optischer Eigenschaften teilweise noch begrenzt. Dies kann bei Investoren und Anlagenbetreibern zu zusätzlichen Unsicherheiten führen. Darüber hinaus können entspiegelte Oberflächen je nach Ausführung leichte Wirkungsgradverluste oder veränderte Winkelabhängigkeiten des Reflexionsverhaltens aufweisen.

Vor diesem Hintergrund erscheint der gezielte Einsatz blendreduzierter Spezialmodule in besonders sensiblen Bereichen – beispielsweise in unmittelbarer Nähe zu Verkehrswegen oder Wohnbebauung – sinnvoll. Ein flächendeckender Einsatz kann derzeit jedoch weder aus technischer noch aus wirtschaftlicher Sicht als Standardlösung angesehen werden.

Zusammenfassend zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass potenzielle Blendwirkungen im untersuchten Luftraum grundsätzlich auftreten können, jedoch räumlich und zeitlich klar begrenzt sind.

Relevante Konstellationen lassen sich anhand der dargestellten Auswertungen eindeutig identifizieren und sind auf bestimmte Flugrichtungen, Höhenbereiche und Zeitfenster beschränkt. Eine flächendeckende oder dauerhafte Beeinträchtigung des Luftraums ist daher nicht zu erwarten.

Unter Berücksichtigung der dargestellten Zusammenhänge sowie der Möglichkeiten einer angepassten flugbetrieblichen Orientierung erscheint eine Vermeidung relevanter Blendwirkungen grundsätzlich möglich.

Bei Bedarf können der Bundeswehr weiterführende Auswertungen oder Detaildarstellungen zur Verfügung gestellt werden, die eine weitergehende Optimierung der Flugbewegungen unterstützen.

3 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] Fernstraßen-Bundesamt, „FBA Eckpunktepapier Photovoltaik“. November 2025. Zugegriffen: 12. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fba.bund.de/DE/Themen/Anbaurecht_Paragraph9_FStrG/Dokumente/20251106_Eckpunktepapier_Photovoltaik.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[11] Dr. Christof Bucher, „Blendung an PV-Anlagen: Erfahrungen mit blendarmen Produkten“, *SolarUpdate Swissolar*, 2024, [Online]. Verfügbar unter: https://sonnwinn.de/wp-content/uploads/SolarUpdate24_2.1_Christof_Bucher_BFH.pdf

[12] 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

[13] Ronald W. Montgomery, B.S und Van B. Nakagawara, O.D., „Sunglasses for Pilots: Beyond the Image“, *Publication AM-400-05/1*, [Online]. Verfügbar unter: https://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/sunglasses.pdf

[14] N. Vb, M. Rw, und M. Wj, „Optical Radiation Transmittance of Aircraft Windscreens and Pilot Vision“, *DOT/FAA/AM-07/20*, 2007, [Online]. Verfügbar unter: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/200720.pdf

Anhang A: Annahmen und Limitationen von SGHAT

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY — Sandia National Laboratories

4. Assumptions and Limitations

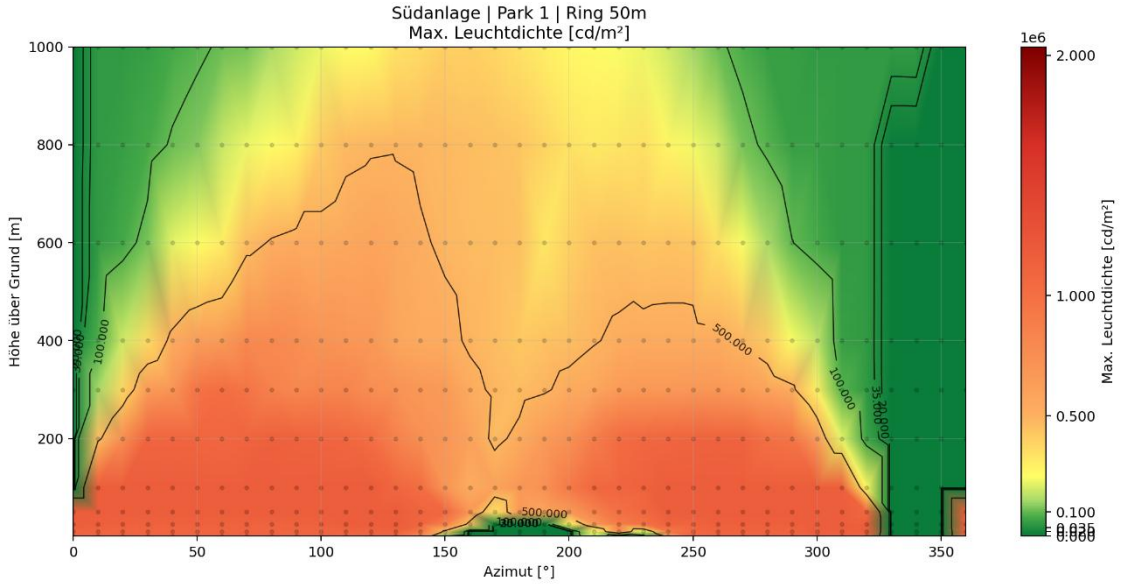
Below is a list of assumptions and limitations of the models and methods used in SGHAT:

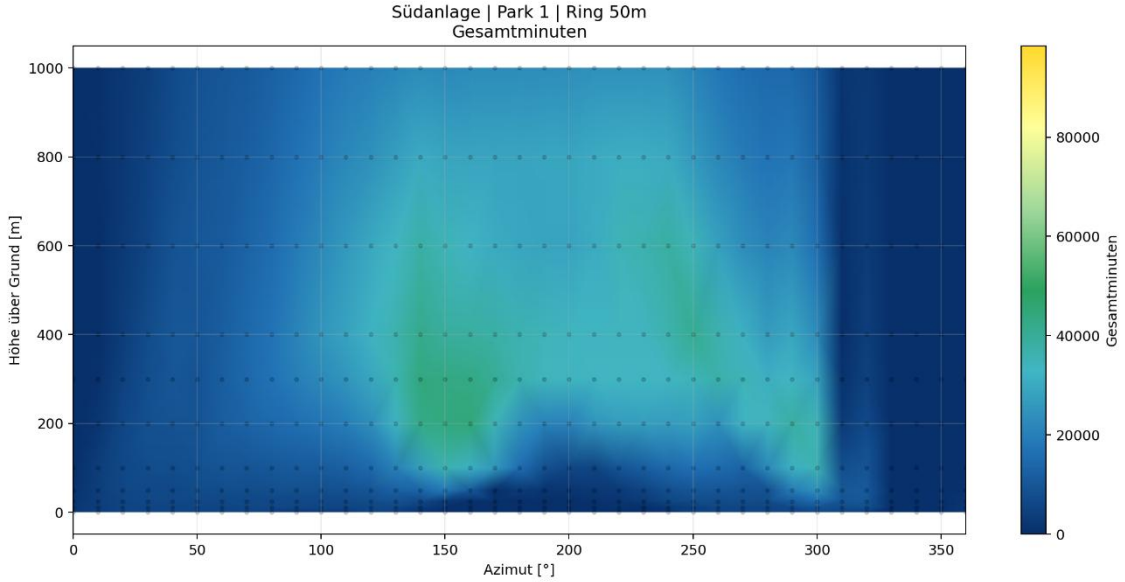
- The software currently only applies to flat reflective surfaces. For curved surfaces (e.g., focused mirrors such as parabolic troughs or dishes used in concentrating solar power systems), methods and models derived by Ho et al. (2011) [1] can be used and are currently being evaluated for implementation 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

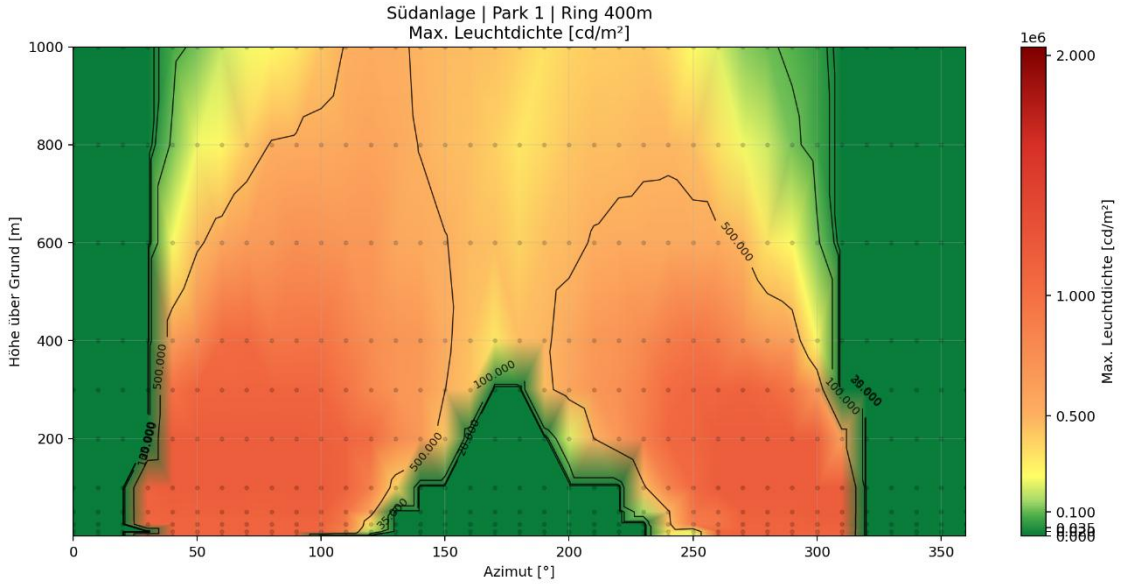
Ausschnitt wurde dem SGHAT-Handbuch (Solar Glare Hazard Analysis Tool) entnommen. Das vollständige Handbuch kann unter folgendem Link gefunden werden:
https://forgesolar.com/static/docs/SGHAT3-GlareGauge_user_manual_v1.pdf

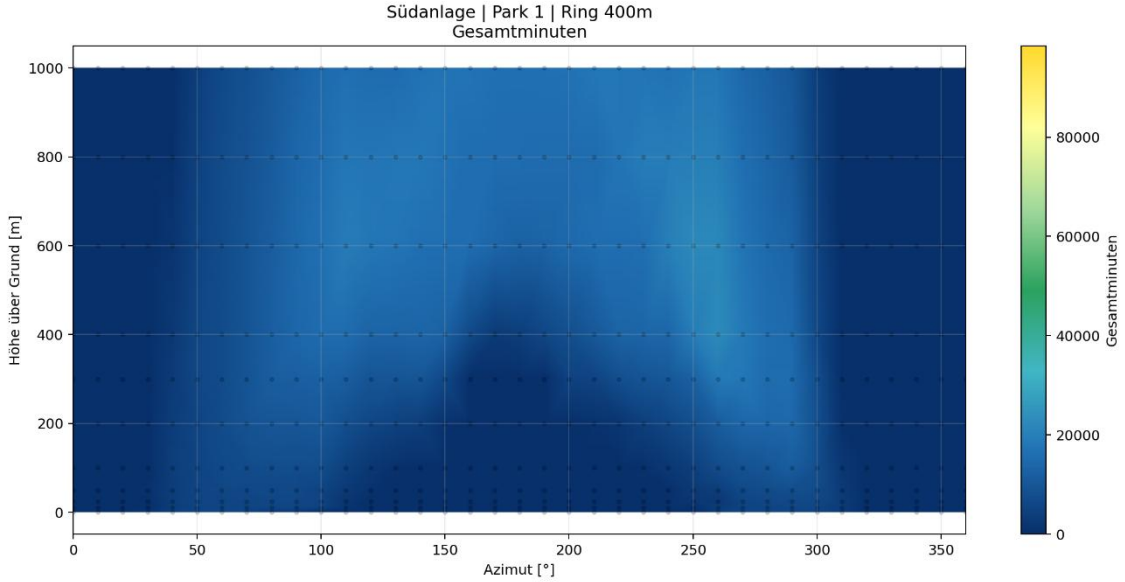
Anhang B: Grafiken Süd, 50 m-Zylinder, über Grund



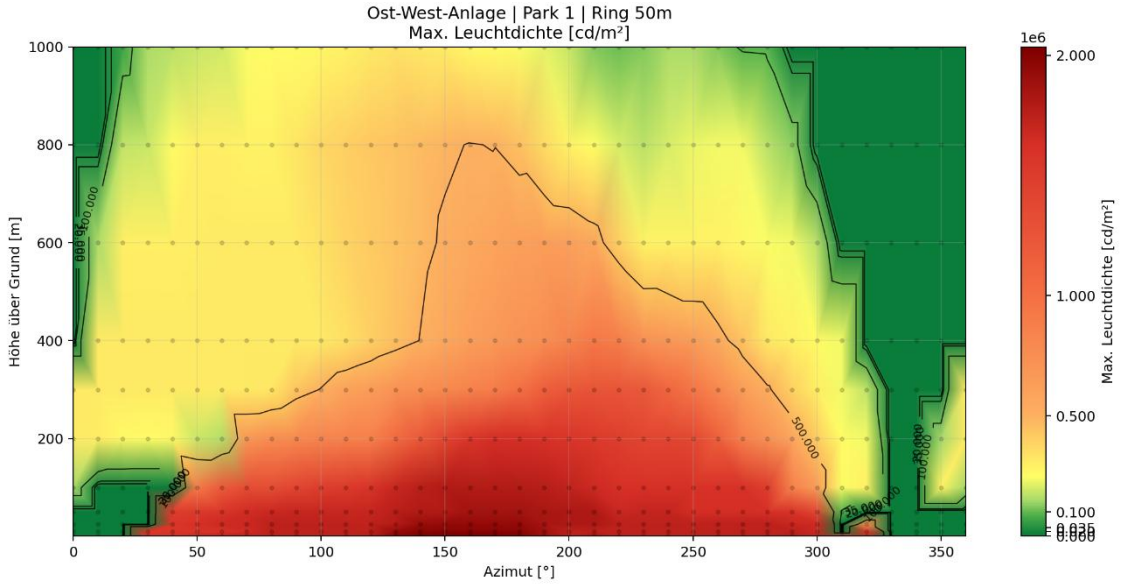


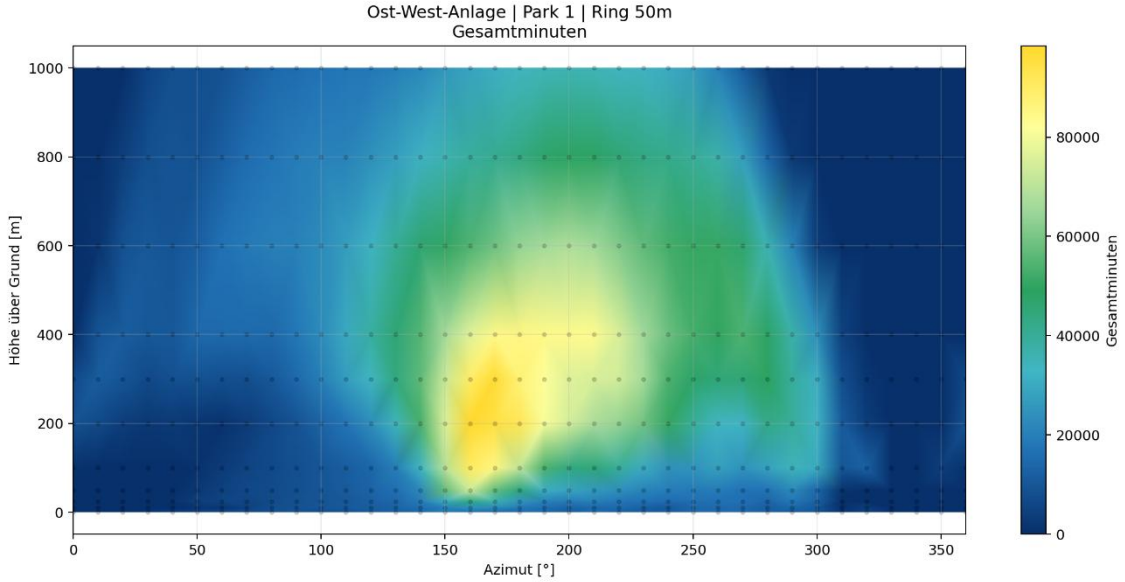
Anhang C: Grafiken Süd, 400 m-Zylinder, über Grund



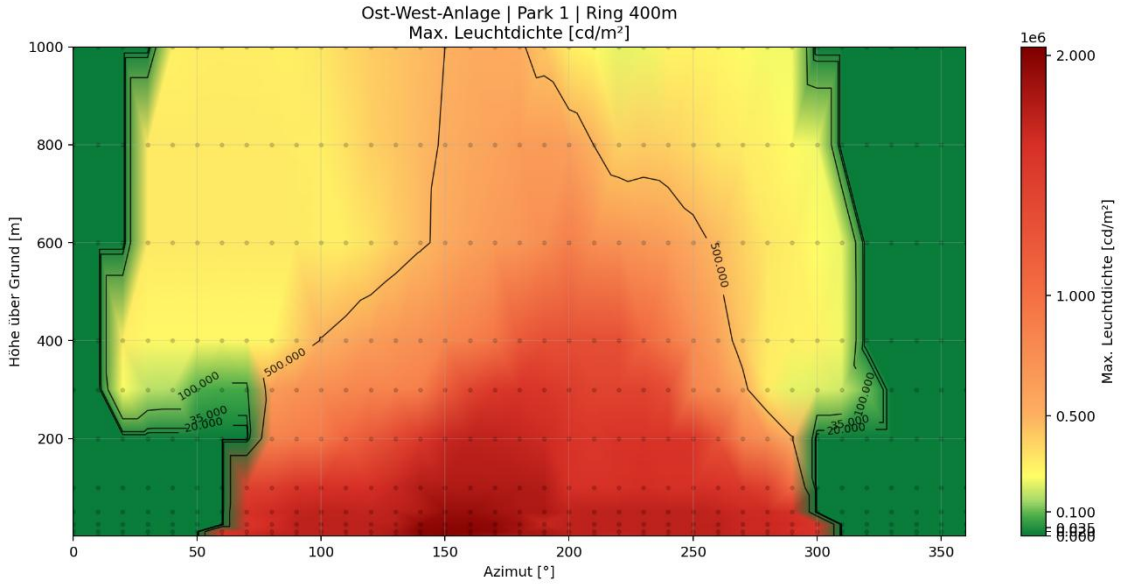


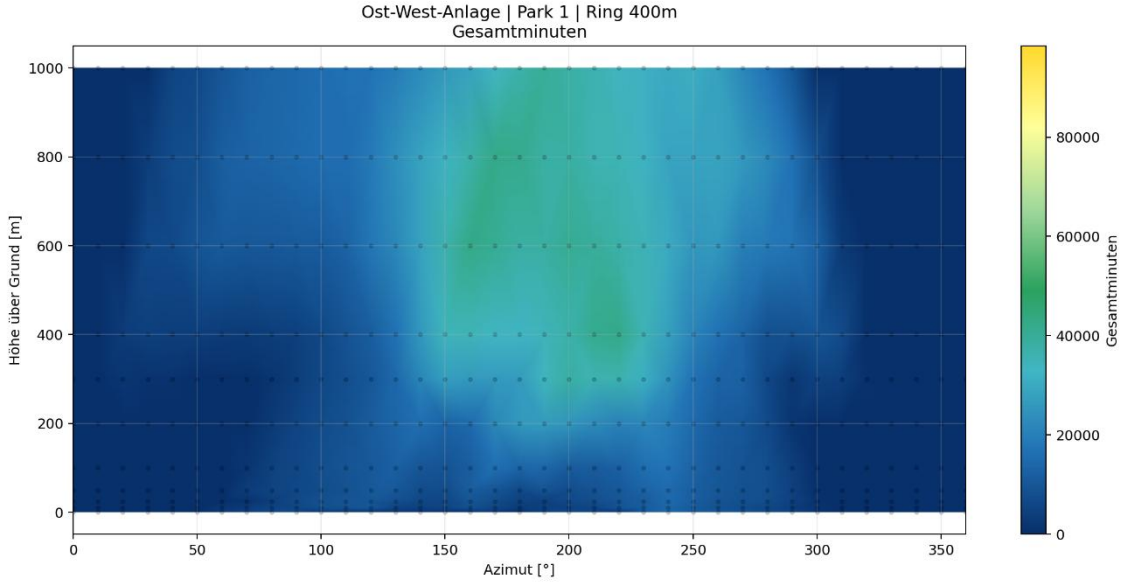
Anhang D: Grafiken Ost-West, 50 m-Zylinder, über Grund



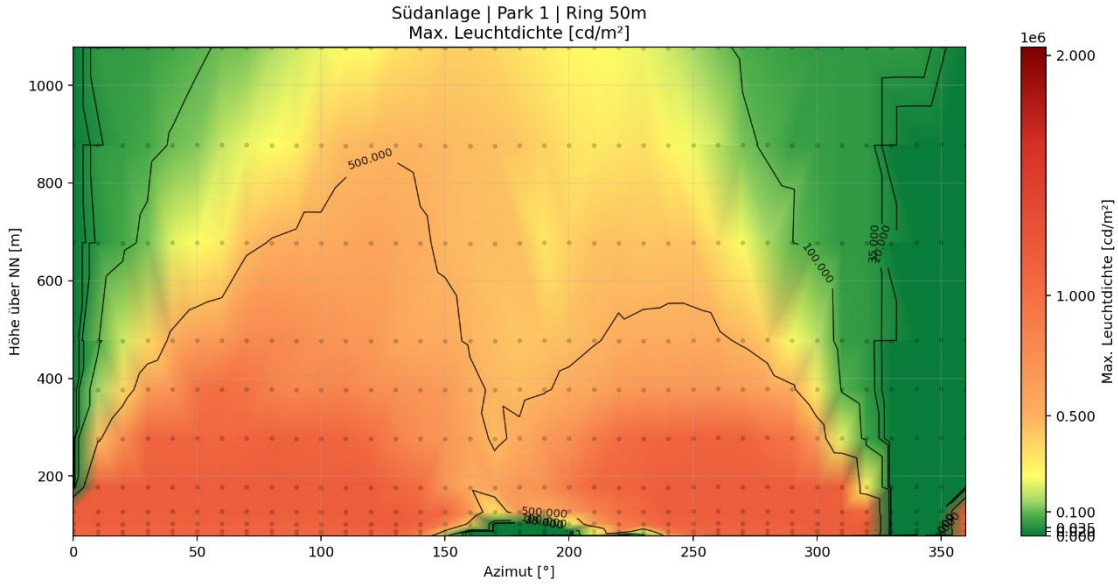


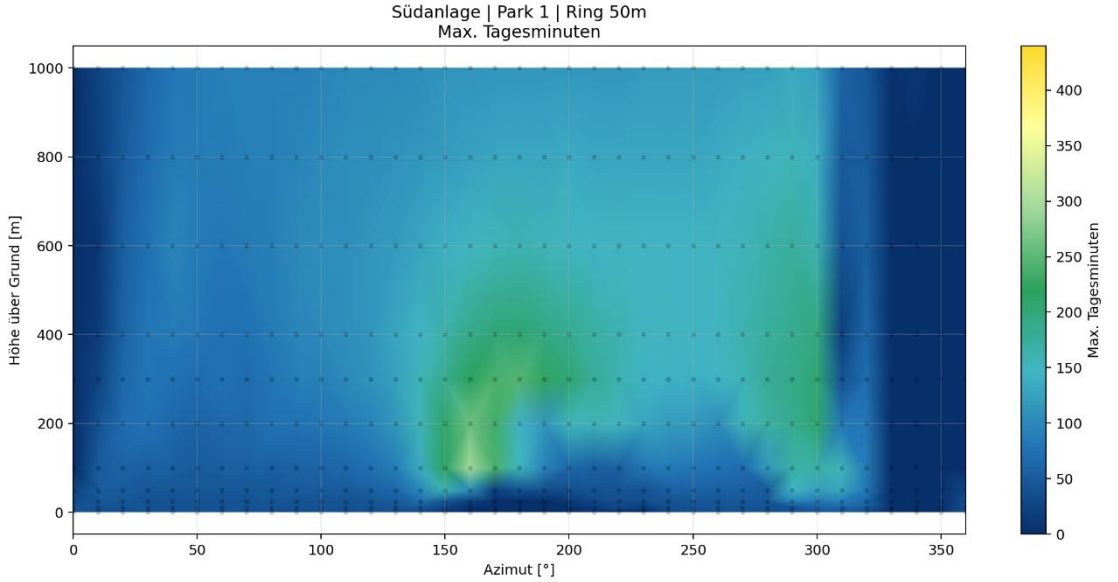
Anhang E: Grafiken Ost-West, 50 m-Zylinder, über Grund



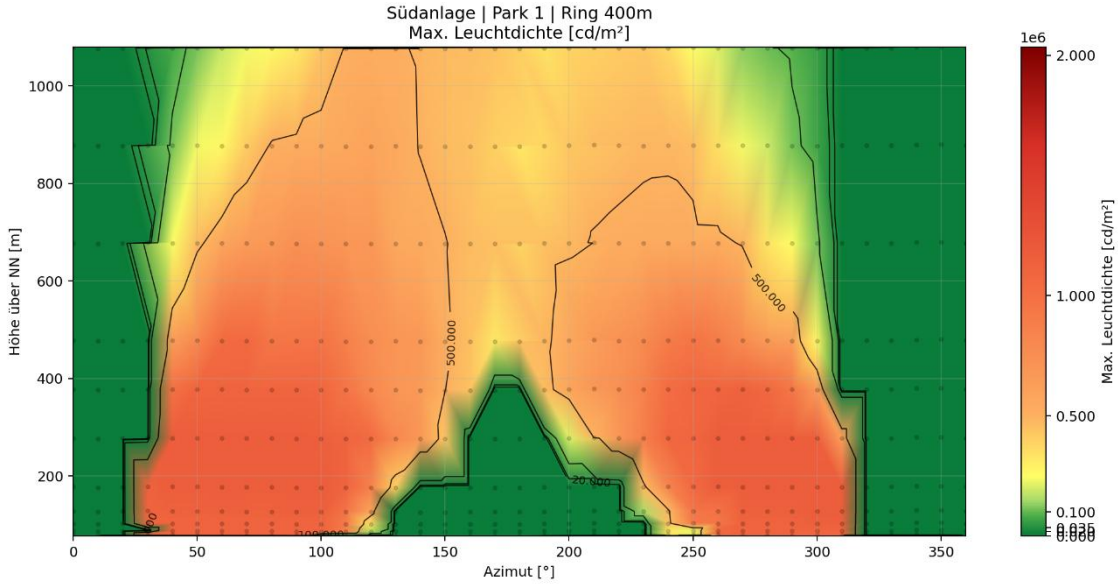


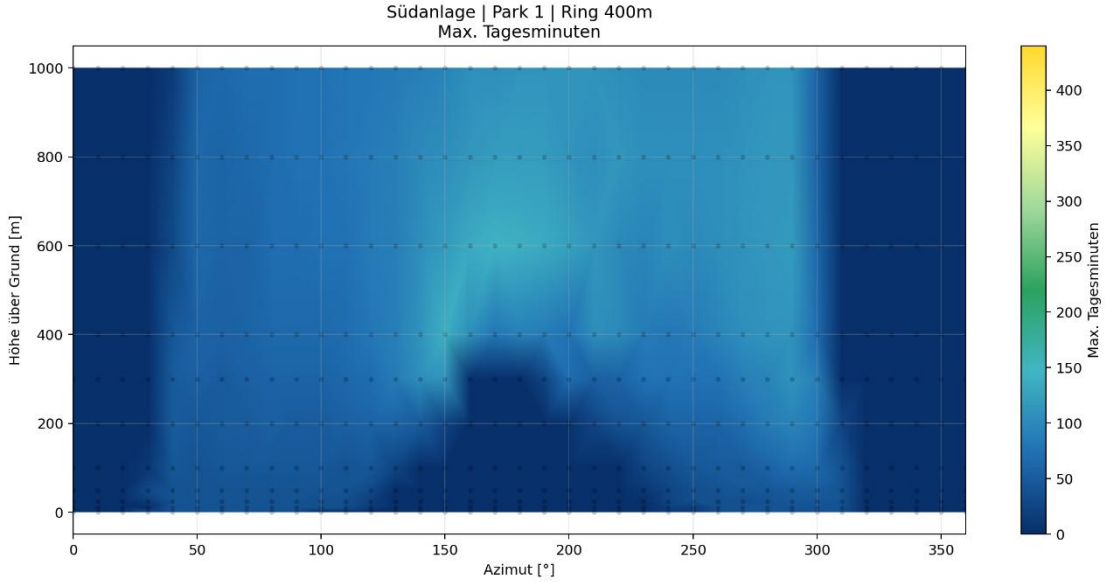
Anhang F: Grafiken Süd, 50 m-Zylinder, über NN



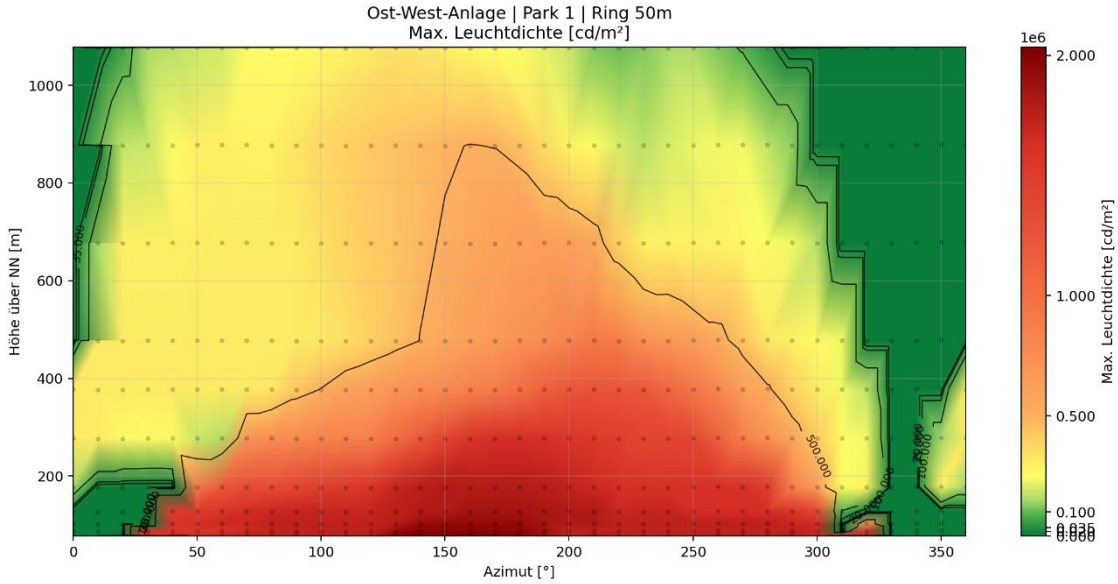


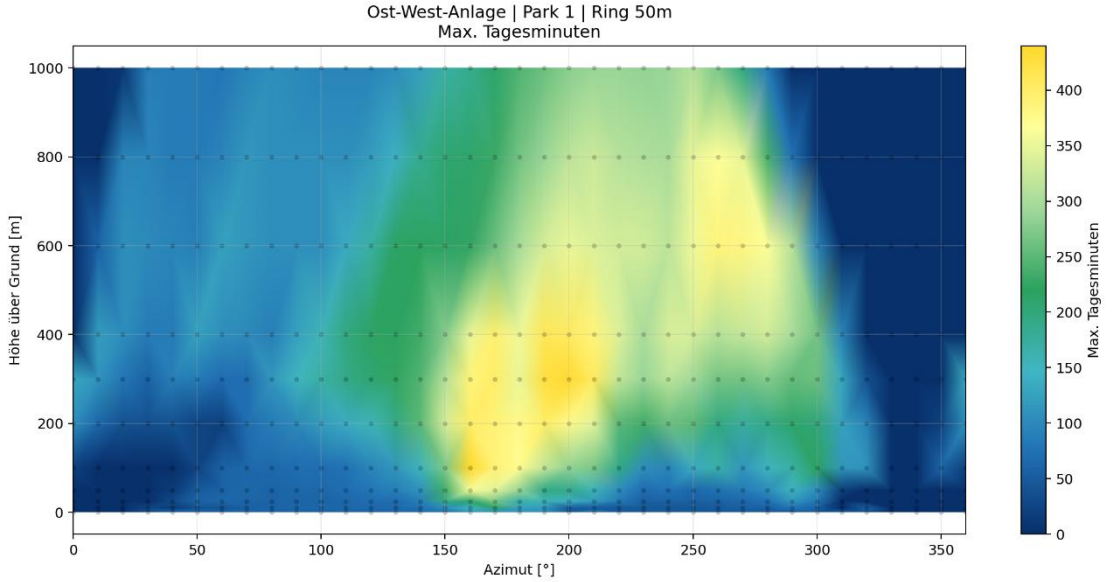
Anhang G: Grafiken Süd, 400 m-Zylinder, über NN





Anhang H: Grafiken Ost-West, 50 m-Zylinder, über NN





Anhang I: Grafiken Ost-West, 50 m-Zylinder, über NN

