

Solarpraxis Engineering GmbH · Alboinstraße 36-42 · 12103 Berlin, Germany

► **Agri-Photovoltaik Löffingen**

Analyse der Reflexionswirkungen einer Photovoltaikanlage

Auftraggeber:

Agri-Solarpark Löffingen UG (haftungsbeschränkt)
Herr Christian Meyer
Hämmerleweg 24
79843 Löffingen

erstellt von:

Wolfgang Rosenthal und Ralf Schmersahl (Plangrundlage)
Solarpraxis Engineering GmbH
Alboinstraße 36-42
12103 Berlin Germany
Tel. 030/ 726 296-396
Fax. 030/ 726 296-360
E-Mail: Wolfgang.Rosenthal@solarpraxis.com
Internet: www.solarpraxis.com



Datum: 20.10.2022

Projektnummer: P22446/1.001

Inhalt

1	Zweck und Gegenstand des Gutachtens	4
2	Zusammenfassung der Ergebnisse	5
3	Einleitung	6
3.1	Blendung.....	6
3.2	Entstehung von Reflexionen bei Photovoltaikanlagen	10
3.3	Verwendete Azimut-Winkelangaben	11
4	Situation vor Ort	12
4.1	Die Agri-Photovoltaikanlage mit konventionellem Anteil	12
4.2	Die Bundesstraße B 31	13
5	Berechnungen	15
5.1	Methodik der Berechnung	15
5.1.1	Geometrische Aspekte.....	15
5.1.2	Lichttechnische Aspekte.....	18
5.1.3	Reflexions- und Blickpunkte	19
5.2	Berechnungsergebnisse	20
5.2.1	Doppelreflexionen zwischen senkrechten und konventionellen Modulen	20
5.2.2	Verkehr aus Richtung Osten.....	20
5.2.3	Verkehr aus Richtung Westen.....	28
6	Bewertung der Blendrisiken	38
6.1	Südliche Fahrbahn aus Westen kommend	38
6.2	Nördliche Fahrbahn aus Osten kommend	39
6.2.1	Reflexionen der senkrecht zu errichtenden Module.....	39
6.2.2	Reflexionen der konventionellen Anlage	39
7	Blendschutzmaßnahmen	40
8	Verwendete Materialien.....	41
8.1	Dokumente vom Auftraggeber	41

8.2	Literatur.....	41
9	Abbildungsverzeichnis.....	42
10	Tabellenverzeichnis	45

1 Zweck und Gegenstand des Gutachtens

Es soll untersucht werden, ob von den Modulen des geplanten Solarparks Löffingen nördlich der Bundesstraße B 31 Sonnenlicht in Richtung der Verkehrsteilnehmer reflektiert werden kann und ob dadurch gegebenenfalls störende Blendwirkungen auftreten können. Die Lage des geplanten Solarparks und der B 31 ist in Abbildung 1 zu erkennen.

Anschließend sind ggf. Maßnahmen zur Verhinderung eventuell auftretender Blendung zu erarbeiten.

Die Analyse erfolgt auf Basis der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Daten und Pläne und unter Zuhilfenahme von Google Earth Pro.

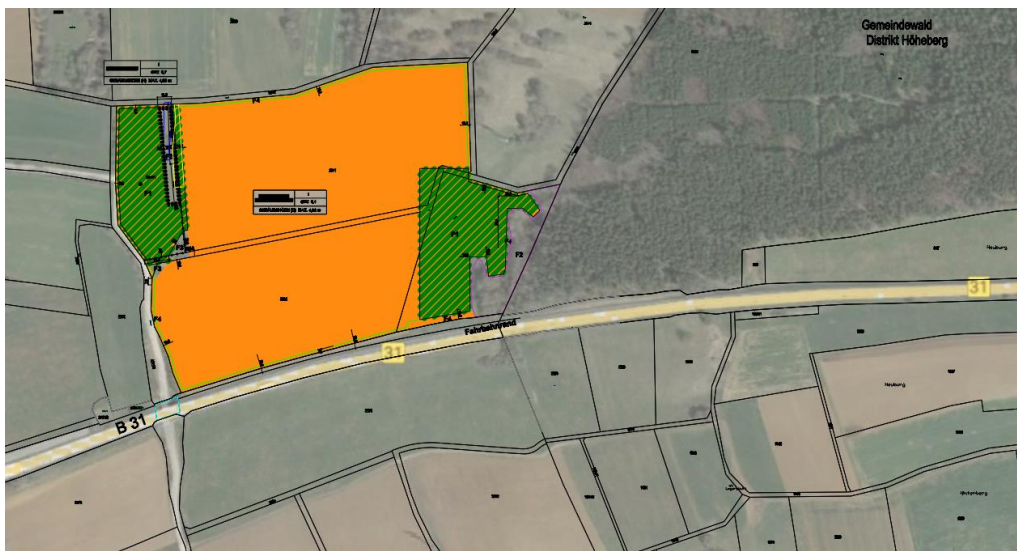


Abbildung 1: Lage des geplanten Solarparks (orange Fläche: Agri-PV, grün schraffiert: konventionelle Modultische) und der Bundesstraße B 31. Quelle: Kundenmaterial auf Hintergrundbild von Google Earth Pro

2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wird festgestellt, dass Reflexionen der geplanten Anlage nur dort verkehrsbeeinträchtigend wirken können, wo sie auf oder dicht bei der Blickachse von Fahrzeugführern in beiden Fahrtrichtungen auftreten können.

Maßnahmen zur Verhinderung sind in Kapitel 7 beschrieben.

3 Einleitung

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

3.1 Blendung

Blendung ist in der DIN EN 12665 als "unangenehmer Sehzustand durch ungünstige Leuchtdichtevertellung oder zu hohe Kontraste" definiert. Die Leuchtdichte ist als Lichtstärke pro Fläche definiert (cd/m^2) und stellt ein fotometrisches Maß für die von Menschen empfundene Helligkeit dar. Zu große Leuchtdichteunterschiede oder ungünstige Leuchtdichtevertellungen im Gesichtsfeld können zu einem unangenehmen Gefühl (psychologische Blendung) oder einer tatsächlich messbaren Herabsetzung der Sehleistung (physiologische Blendung) führen. Ab einer Leuchtdichte von 10^4 bis $1,6 \cdot 10^6 \text{ cd}/\text{m}^2$ wird die Adaptationsfähigkeit des menschlichen Auges überschritten. Dieser Zustand wird als Absolutblendung bezeichnet.¹ Normalerweise treten Abwehrreaktionen wie Blinzeln und Blickabwendung auf, ohne die eine thermische Schädigung der Netzhaut eintreten kann.

Abbildung 2 zeigt zwei Beispiele für Blendsituationen. Auf der Sichtachse zur Blendquelle werden Gegenstände unerkennbar.²

¹ Wittlich 2010

² Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Wahrnehmung des menschlichen Auges nicht direkt mit einer Fotografie vergleichbar ist. Die hier gezeigten Aufnahmen dienen ausschließlich der Verdeutlichung des Sachverhaltes.



Abbildung 2: Blendsituationen. Gegenstände auf der Sichtachse zur Blendquelle sind nicht mehr wahrnehmbar.

Im Rahmen der Verkehrssicherheit kommt es vor allem auf die physiologische Blendung an, die die Sehleistung herabzusetzen vermag. Dagegen spielt die psychologische Blendung in diesem Zusammenhang kaum eine Rolle. Ein nur kurz auftretendes subjektives Unbehagen aufgrund von kurzzeitiger Blendung im Vorbeifahren führt noch nicht zu einer Beeinträchtigung der Fahrleistung.

Für die physiologische Blendung bewegter Beobachter, die in der Regel nicht direkt in die Blendquelle hineinsehen, spielt deren Leuchtdichte nur im Zusammenhang mit ihrer Größe im Blickfeld eine Rolle. Wesentlich ist die Beleuchtungsstärke (Einheit: lx), die im Auge durch Brechung und Streuung an den Augenmedien eine Schleierleuchtdichte hervorruft und dadurch die Kontrasterkennung vermindert. Entscheidend für die Gefährdungsbeurteilung ist letztlich die Beleuchtungsstärke am Auge von Verkehrsteilnehmern, die sich aus dem Produkt von Leuchtdichte und Blendquellengröße im Blickfeld und dem Winkel zwischen Blickrichtung und Blendquelle ergibt, in Relation zur Beleuchtungsstärke am Auge durch direktes, gestreutes und diffus von der Umgebung reflektiertes Sonnenlicht. Darüber hinaus ist die jeweils mögliche Einwirkzeit zu berücksichtigen.

Für die Bewertung der möglichen Blendung durch Reflexionen auf Verkehrsteilnehmer sind demgemäß das Blickfeld und die räumliche Lage der Blendquelle darin wesentlich. Beim Menschen unterscheidet man folgende Arten von Blickfeldern:

- ▶ das **monokulare Blickfeld**, das sich aus der Exkursionsfähigkeit (maximale Beweglichkeit) des jeweils rechten und linken Auges ergibt
- ▶ das **binokulare Blickfeld**, der Bereich, in dem beide Augen gemeinsam mit maximaler Sehschärfe (foveolar) fixieren können
- ▶ das **Fusionsblickfeld**, in dem binokulares Einfachsehen möglich ist
- ▶ das **Umblickfeld**, das die Summe der Wahrnehmungen ergibt, die bei unveränderter Standposition mit allen Blickbewegungen und maximalen Kopf- und Körperdrehungen erzielt werden können
- ▶ das **Gebrauchsblickfeld** als Bereich innerhalb des binokularen Blickfeldes, innerhalb dessen Objekte ohne zusätzliche, unterstützende Kopfbewegungen fixiert werden können; in der Literatur wird dieser Bereich mit $+25^{\circ}/-40^{\circ}$ vertikal und 30° Rechts- und Linksblick definiert.

Außerhalb des Gebrauchsblickfeldes werden im menschlichen binokularen Blickfeld Objekte nicht unmittelbar wahrgenommen, vielmehr wird das Umgebungsbild im Kurzzeitgedächtnis eingefroren und nur bei starken Veränderungen bewusst erneuert. Bei sog. „Sehaufgaben“ („visual tasks“), z.B. Autofahren, Arbeit am Computer etc., verengt sich dieses bewusst wahrgenommene Blickfeld weiter. Hier werden Änderungen im Umgebungsblickfeld bis zu einer Blickrichtungsänderung von 10° nicht aktiv wahrgenommen und vom Gehirn verarbeitet. Dies entspricht einem bewusst wahrgenommenen Blickfeld von 20° auf der horizontalen Ebene.^{3 4}

Das maximale Gebrauchsblickfeld (im Allgemeinen hier einfach als „Blickfeld“ benannt) und das eingeschränkte für Sehaufgaben („zentrales Blickfeld“) werden in Tabelle 1 und in Abbildung 3 einander betragsmäßig und grafisch gegenübergestellt.

Tabelle 1: Menschliches Gebrauchsblickfeld (vertikal positiv ist oben, negativ unten)

Gebrauchsblickfeld	Benennung im Text	horizontal	vertikal
für Sehaufgaben	zentrales Blickfeld	$\pm 9^\circ - \pm 10^\circ$	+25°, -35°
maximal	Blickfeld	$\pm 30^\circ$	+30°, -45°

³ Reidenbach u. a. 2008

⁴ Kaufmann 1986

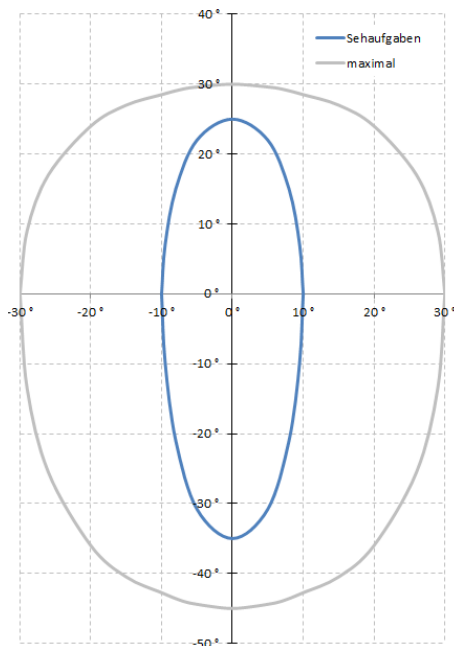


Abbildung 3: Blickfelder von Tabelle 1. Der Achsenschnittpunkt 0°/0° stellt dabei einen Punkt auf der Blickachse dar, auf den die Augen fokussieren, und nicht notwendigerweise einen Punkt auf dem Horizont

Für die Beurteilung des Bereichs, in dem auftretende Reflexion zur Blendung führen kann, wird typischerweise das maximale Gebrauchsblickfeld mit je 30° rechts und links der Blickrichtung als Blickfeld herangezogen. Diese Eingrenzung basiert auf umfangreichen Untersuchungen zu nächtlicher Blendung. Nächtliches, sog. skotopisches Sehen oder Stäbchensehen wird ermöglicht durch die große Lichtempfindlichkeit der Fotorezeptoren im Auge, die als Stäbchen bezeichnet werden. Sie sind ausschließlich außerhalb der Foveola (oder Sehgrube) angeordnet, die im zentralen Bereich der Netzhaut rundum die Sehachse liegt. Die beim photopischen Sehen (Tages- oder Zapfensehen) aktivierten farbmempfindlichen Zapfen haben ihre größte Dichte in der Foveola. Ihre hohe Dichte ermöglicht auch die höchste Sehschärfe nahe der Sehachse bei ausreichender Helligkeit. Zu Blendung unter Tageslichtbedingungen gibt es so gut wie keine Untersuchungen. Die Unterschiedlichkeit der Sehvorgänge, eigene Beobachtungen, Informationen von Betroffenen und Diskussionen mit anderen Sachverständigen in diesem Bereich legen es nahe, unter Tageslichtbedingungen nicht den gesamten Bereich des maximalen Blickfeldes gleich stark zu bewerten.

Bei der Gefährdungsbeurteilung bzgl. Blendung von Fahrzeugführern bei Tageslicht wird deshalb der Bereich im zentralen Blickfeld von $\pm 5^\circ$ neben der Blickachse als höchst kritisch und derjenige von $\pm 10^\circ$ als kritisch angesehen (zentrales Blickfeld). Wahrnehmbare Reflexionen außerhalb von $\pm 30^\circ$ werden hier als physiologisch unerheblich bewertet. Zwischen $\pm 10^\circ$ und $\pm 30^\circ$ werden abgestufte Anforderungen an das Verhältnis der Beleuchtungsstärken durch Reflexionen und direkt einfallendes Sonnenlicht gestellt, da sich die Schleierleuchtdichte, die im Auge durch Streuung eindringenden Lichts erzeugt wird und die Sehleistung beeinträchtigen kann, reziprok zum Quadrat des

Abstandswinkels zwischen Strahlungsquelle und Blickrichtung verhält.⁵ Bei Einmündungen oder Kreuzungen muss ein größerer Blickbereich frei von Blendrisiken sein.

3.2 Entstehung von Reflexionen bei Photovoltaikanlagen

Eine Photovoltaikanlage besteht aus den Haupt-Komponenten Montagegestell, Wechselrichter und Photovoltaik-Modul (PV-Modul).

Komponenten, an denen ggf. relevante direkte Reflexionen entstehen können, sind in erster Linie die Deckgläser der PV-Module. Daneben bewirken Reflexionen an inneren Grenzflächen von Einbettmaterialien oder Rückseitenfolien sowie die Texturierung der Oberflächen, dass auch Anteile diffuser Reflexion auftreten können. Dies kann zu Bündelaufweitung und Versatz der ideal gerichteten Reflexionsstrahlen führen.⁶

Potenziell blendende Lichtreflexionen an den Gläsern der PV-Module können nur zu Zeiten direkter Sonneneinstrahlung auftreten. Bei diffusem Licht mit ungerichteter Strahlung kann keine gerichtete Reflexion auftreten.

Deckgläser, die für PV-Module verwendet werden, bestehen im Allgemeinen aus unstrukturiertem eisenarmen Weißglas. Es wird ein spezielles Glas verwendet, um die Transmission zu erhöhen, also den Lichteinfall des gesamten Strahlungsspektrums auf die solar aktive Fläche der PV-Module zu maximieren. So werden ein hoher energetischer Wirkungsgrad, ein hoher Ertrag und eine geringe Reflexion gesichert. Dies hat nach heutigem Stand der Technik zur Folge, dass weniger als 9 % des gesamten eingestrahnten sichtbaren Lichtes reflektiert werden.

Die Reflexionseigenschaften von Glas variieren mit dem Einfallswinkel der Sonnenstrahlen, wie Abbildung 4 verdeutlicht.

⁵ Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 2006

⁶ Fischbach u.a. 2014

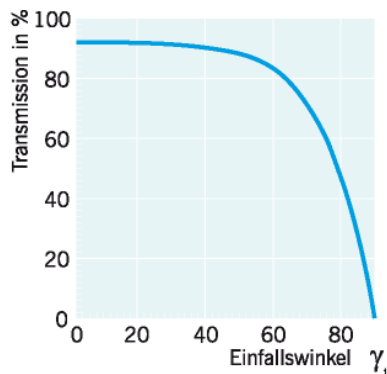


Abbildung 4: Auswirkung des Einfallswinkels auf den Transmissionsgrad für Modulgläser

Die Transmission ist bei senkrechtem Einfall auf die Modulebene (0°) am größten. Mit zunehmendem Einfallswinkel sinkt die Transmission und die Reflexion am Glas steigt an. Als Beispiel beträgt der Transmissionsgrad bei einem Einfallswinkel von 65° etwa 80 %. In diesem Falle werden für das Beispiel in Abbildung 4 ca. 20 % der auftretenden Strahlung reflektiert.

Da die Leuchtdichte der Sonne bei klarer Sicht bereits kurz über dem Horizont $6 \cdot 10^6 \text{ cd/m}^2$ beträgt und um die Mittagszeit $1,5 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$ erreicht, muss aber auch bei den niedrigen Reflexionsgraden von Solarmodulen mit dem Eintritt von Absolutblendung ($>10^5 \text{ cd/m}^2$) bei Beobachtern gerechnet werden.

3.3 Verwendete Azimut-Winkelangaben

Allgemein werden in der Solartechnik Azimutwinkel von Süden ($=0^\circ$) aus angegeben, so dass üblicherweise eine Ostausrichtung mit -90° und eine Westausrichtung mit $+90^\circ$ angegeben wird.

Da die Berechnungsmethode zur Bestimmung der Reflexionen jedoch aus der Geodäsie entnommen worden ist und dort allgemein vom Norden ($=0^\circ$) aus im Uhrzeigersinn gerechnet wird, werden in den Reflexionsdiagrammen und bei der Beschreibung von Blickrichtungen die sich daraus ergebende Azimutangabe verwendet: Norden = 0° , Osten = 90° , Süden = 180° und Westen = 270° .

Zur leichteren Lesbarkeit für Leser, die in der Regel mit der in der Solartechnik üblichen Bezeichnung zu tun haben, wird dagegen die Ausrichtung der Anlagen regelmäßig in der Solardiktion aufgeführt.

4 Situation vor Ort

4.1 Die Agri-Photovoltaikanlage mit konventionellem Anteil

Laut Lageplan Agri-Photovoltaik Löffingen (Abbildung 5) soll die Anlage auf dem größten Teil der Fläche mit von Norden nach Süden senkrecht aufgestellten bifazialen Modulreihen errichtet werden, wie sie beispielhaft in Abbildung 6 gezeigt werden. So ergibt sich für sie bei vertikaler Aufstellung eine westliche und eine östliche Ausrichtung.

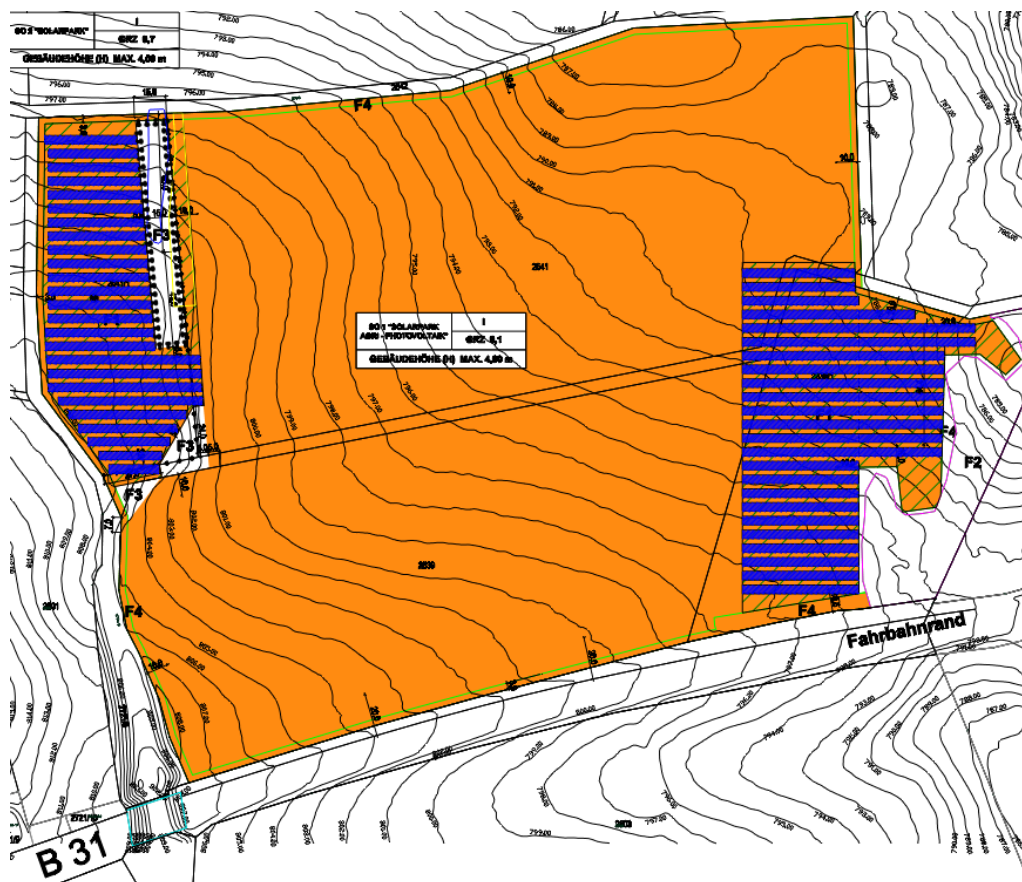


Abbildung 5: Lageplan Agri-Photovoltaik Löffingen (auf orangener Fläche), mit konventionellen Modulreihen (blau) auf nordwestlicher und südöstlicher Teilfläche; Höhenlinien im 1-m-Abstand schwarz (Quelle: Kundenmaterial, bearbeitet)

Auf der nordwestlichen und der südöstlichen Teilfläche sollen zusätzlich konventionelle Modultischreihen mit 20° Neigung und südlicher Ausrichtung installiert werden, deren Unterkante 0,8 m über dem Grund liegt und deren Oberkante auf 2,2 m über Grund reicht.

Die Unterkante der senkrechten Module liegt 0,6 bis 0,8 m über dem Boden, die Oberkante reicht bis 3,6 m Höhe. Der Abstand zwischen der östlichsten senkrechten Reihe und den konventionellen

Modultischen beträgt 10 m. Der Minimalabstand zwischen den senkrechten Modulreihen und dem Fahrbahnrand beträgt 20 m.



Abbildung 6: Beispiel für senkrecht errichtete Modulreihen (Quelle: Kundenmaterial)

Das Gelände, auf dem die Anlage geplant ist, hat an seiner südwestlichen Ecke eine Höhe von 808 m ü. NN und fällt zum nordwestlichen Rand hin auf 787 m ü. NN ab.

Durch das West-Ost-Gefälle ändert sich bei der konventionellen Anlage die Orientierung der Reflexionsebene. Bedingt durch das Gefälle von -2° bei der südlichsten und damit relevantesten Tischreihe betragen die solare Ausrichtung der reflektierenden Ebene $-5,5^\circ$ und ihre Neigung $20,1^\circ$.

4.2 Die Bundesstraße B 31

Die Bundesstraße B 31 (Abbildung 7) verläuft von Osten kommend mit nur geringfügigen Richtungsänderungen (Azimutrichtungen zwischen 260° und 270°) auf den südöstlichen Rand des geplanten Solarparks zu.



Abbildung 7: Verlauf der B 31 im Bereich des Baufeldes (Quelle: Google Earth Pro)

Über 1,5 km hinweg steigt die Straße dabei annähernd kontinuierlich von 744 m ü. NN auf 797 m ü. NN an. Ab dem Waldstück, das nördlich der B 31 vor dem Baufeld liegt, wendet sich die Blickrichtung mit der Fahrbahn etwas stärker nach Südwest bis zu einer Azimutrichtung von 250°. Bis zum westlichen Ende der Anlage steigt die Straße weiter an auf 807 m ü. NN und auf den folgenden 600 m mit annähernd gleicher Blickrichtung von 250° setzt sich die Steigung fort bis auf 832 m ü. NN.

5 Berechnungen

5.1 Methodik der Berechnung

5.1.1 Geometrische Aspekte

Die Berechnung der Sonnenlichtreflexionen erfolgt nach dem Reflexionsgesetz bei ideal gerichteter Reflexion („Einfallswinkel = Ausfallswinkel“). Jedem Einfallswinkel des Sonnenlichts entspricht genau ein Ausfallswinkel reflektierter Strahlung bei gegebener reflektierender Ebene. Abbildung 8 zeigt die geometrischen Beziehungen einschließlich der Abstandswinkel zwischen den Blickrichtungen zur Sonne und dem Reflexionspunkt.

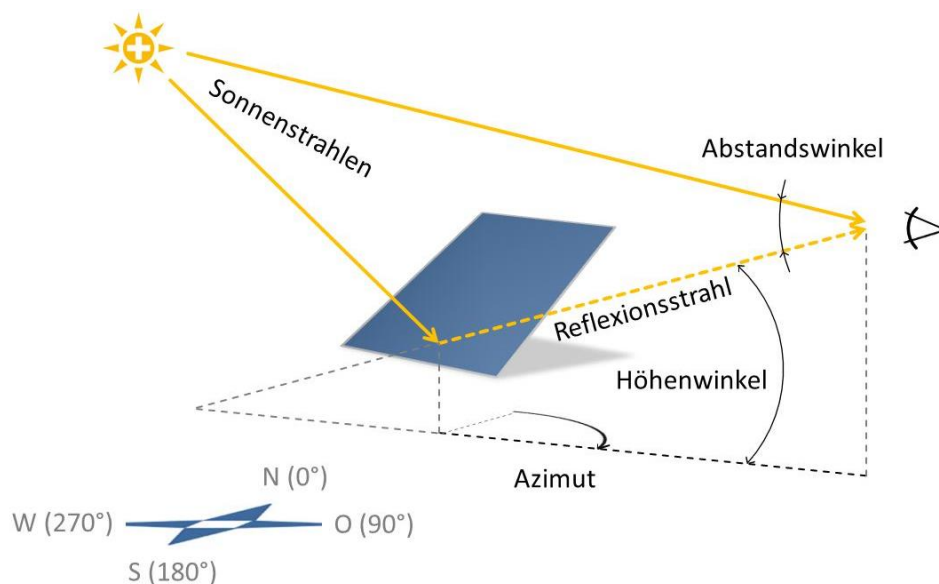


Abbildung 8: Darstellung des Reflexionsstrahls anhand von Azimut und Höhenwinkel wie im Reflexionsdiagramm verwendet und Beschreibung des Abstandswinkels zwischen Blickrichtungen zur Sonne und zum Reflexionspunkt

Für die Beurteilung der Blendrisiken durch die geplante Anlage wird zunächst eine Aufstellung mit sämtlichen Sonneneinfallswinkeln im Jahresverlauf am Standort Löffingen (geografische Länge 8,37°, Breite 47,89°) in 6-minütiger Auflösung für 12 Tage im Jahr vorgenommen (jeweils für den 21. jeden Monats)⁷. Anschließend werden die sich daraus ergebenden Reflexionsrichtungen berechnet. Diese werden anschaulich in einem Reflexionsdiagramm dargestellt, das über dem Horizont, aus Sicht eines beliebigen Reflexionspunkts heraus, alle möglichen Reflexionsrichtungen durch die Koordinaten Azimut- und Höhenwinkel beschreibt.

⁷ Berechnung nach Eicker 2001

Abbildung 9 zeigt die möglichen Reflexionsrichtungen für die Westseite der senkrecht errichteten bifazialen Module, Abbildung 10 zeigt diejenigen für deren Ostseite.

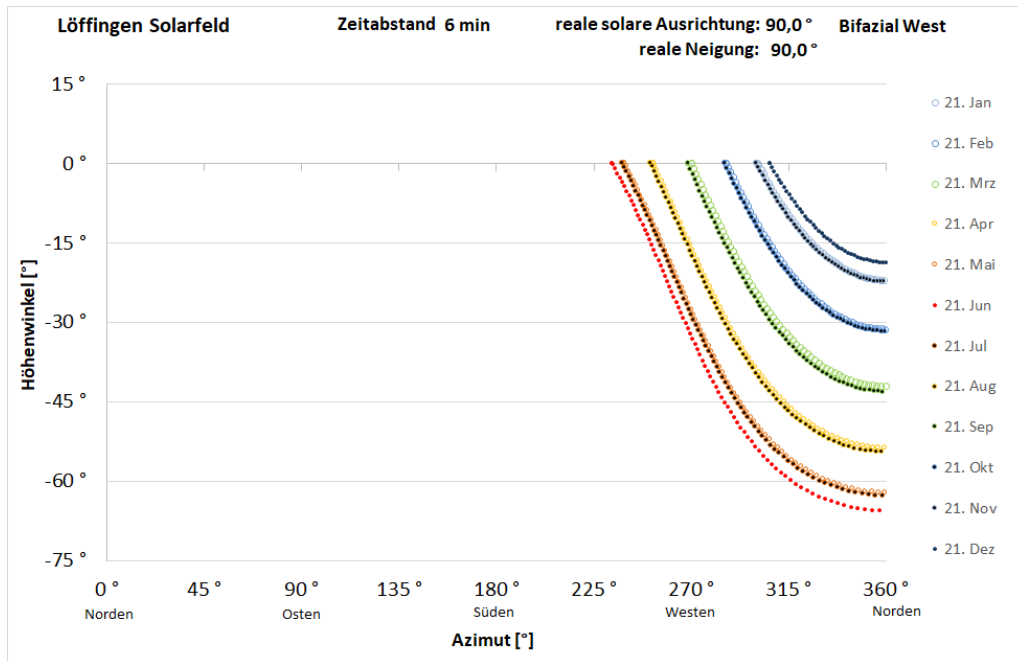


Abbildung 9: Reflexionsdiagramm für die Westseite der senkrecht aufgestellten bifazialen Module am Standort der Anlage mit waagrecht aufgetragenen Azimut- und senkrecht aufgetragenen Höhenwinkeln

Für die konventionellen Tische ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 11.

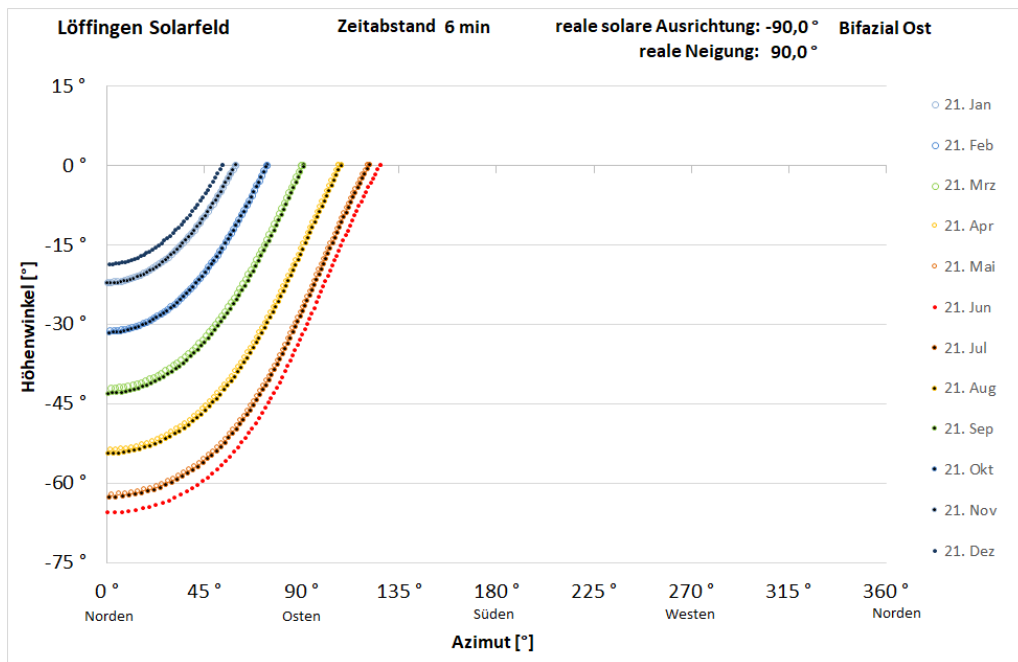


Abbildung 10: Reflexionsdiagramm für die Ostseite der senkrecht aufgestellten bifazialen Module am Standort der Anlage mit waagrecht aufgetragenem Azimut- und senkrecht aufgetragenem Höhenwinkel

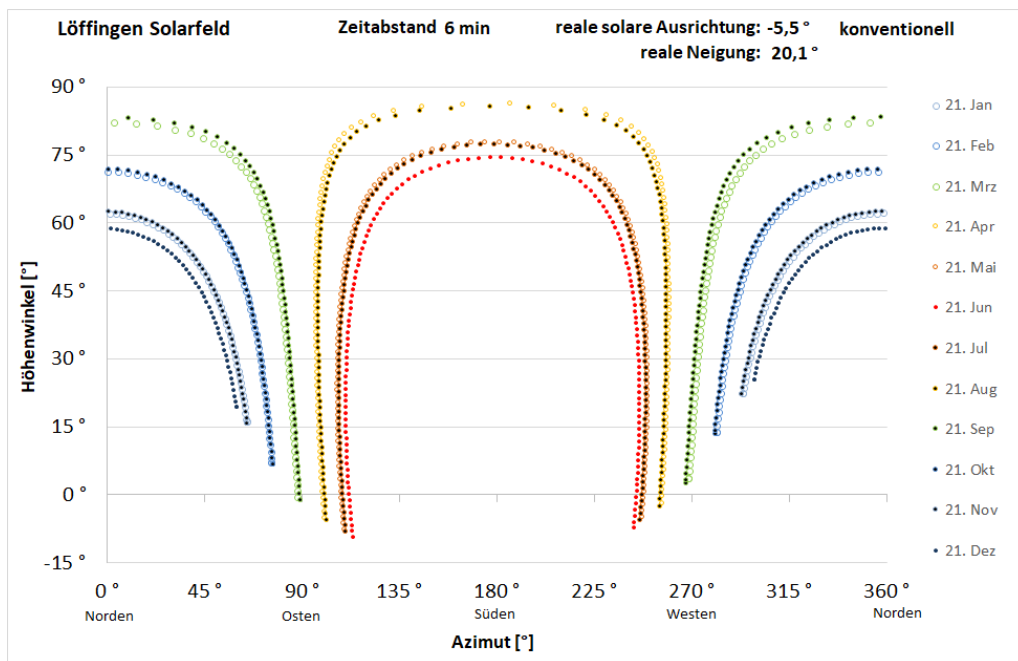


Abbildung 11: Reflexionsdiagramm für die konventionell errichteten Modultische am Standort der Anlage mit hangbedingter Ausrichtung von $-5,5^\circ$ und Neigung von $20,1^\circ$, waagrecht aufgetragenem Azimut- und senkrecht aufgetragenem Höhenwinkel

Im nächsten Schritt werden die relevanten Blickpunkte und -richtungen festgelegt und in die Berechnung übernommen. Liegt ein Blickpunkt mit seinen Kugelkoordinaten Azimut- und Höhenwinkel innerhalb des von Reflexionen betroffenen Bereichs (d.h. zwischen den Kurven für den 21. Juni und den 21. Dezember), so kann die Dauer und Jahreszeit potenzieller Reflexionen abgeschätzt werden (der Abstand zwischen zwei Markierungspunkten einer Tagesganglinie entspricht 6 Minuten). Sofern es auf konkrete Uhr- und Jahreszeiten oder die jeweilige Dauer potenzieller Reflexion ankommt, erlauben die Datentabellen eine noch genauere Ermittlung.

Mögliche Abweichungen der realen Reflexionen von den ideal gerichteten (durch Bündelaufweitung oder Versatz) werden im Rahmen der Einzelberechnungen und -bewertungen bei Bedarf durch Sicherheitszuschläge abgeschätzt.

Die Höhenwinkel zwischen Betrachtungsort und Anlagenpunkt können in aller Regel mehr oder weniger variieren, z.B. je nachdem, ob es sich bei Verkehrsteilnehmern um PKW- oder LKW-Fahrer handelt.

Abbildung 12 verdeutlicht dies skizzenhaft: Maximale Höhenwinkel ergeben sich zu höchstmöglichen Fahreraugen in großen LKW und minimale Höhenwinkel zu Fahreraugen in niedrigen PKW. Bei allen Berechnungen für den Straßenverkehr wird die minimale Augenhöhe mit 1 m über der Fahrbahn angesetzt und die maximale mit 3 m.

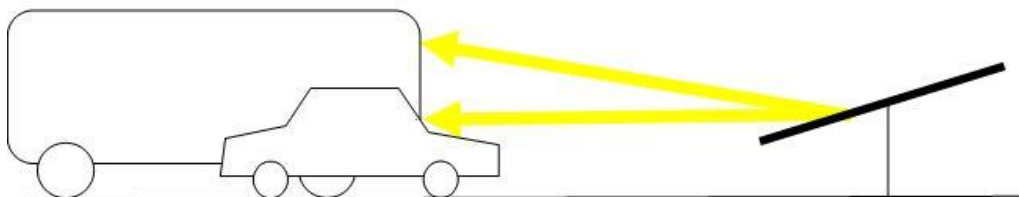


Abbildung 12: Beispiel für Bandbreite möglicher Höhenwinkel

In den Reflexionsdiagrammen werden deshalb mit „min“ und „max“ die sich ergebenden Höhenwinkel bezeichnet, um die mögliche Spanne als worst-case zu berücksichtigen

5.1.2 Lichttechnische Aspekte

Das Verhältnis der Beleuchtungsstärken am menschlichen Auge – einerseits verursacht durch Sonnenlichtreflexionen der zu prüfenden Anlage, andererseits verursacht durch direktes, gestreutes oder diffus reflektiertes Licht – ist wesentlich für die Beurteilung, ob Anlagenreflexionen eine potenzielle Gefährdung darstellen (s. Abschnitt 3.1).

Zur Abschätzung der Beleuchtungsstärken wird zunächst der Sonnenhöhenwinkel zu Zeitpunkten möglicher Betroffenheit durch Anlagenreflexionen bestimmt, um aus ihm auf diese Parameter schließen zu können. Dazu werden die Berechnungsformeln der DIN 5034 Teil 2 Abschnitt 4.2 für die Bedingungen von klarem Himmel verwendet, um sicherheitshalber den für Blendung ungünstigsten Fall zu betrachten.

5.1.3 Reflexions- und Blickpunkte

Für die Berechnung potenzieller Blendungen werden die Reflexionspunkte an der Anlage durch Wahl von ausgewählten Reflexionspunkten an den Außenkanten so umgrenzt, dass die gewählten Punkte die gesamte Anlage einschließen.

Für den konventionellen Anlagenteil im Südosten werden je 21 Punkte an den Unter- und Oberkanten der südlichsten Modultischreihe verwendet, die nördlich anschließenden Reihen werden durch je sechs Punkte an den Unter- und Oberkanten repräsentiert. Den nordwestlichen konventionellen Anlagenteil zu modellieren, erübrigt sich, da potenzielle Reflexionen von ihm aus abgeschirmt sind gegenüber der Straße.

Für die senkrechten Modulreihen werden Unter- und Oberkanten der südlichsten Module aller, der Bundesstraße nahegelegenen Modulreihen gewählt, ergänzt durch Unter- und Oberkanten im Abstand von 3 m weiter nördlich. Zusätzlich werden für die westlichste und die östlichste Modulreihe, die aus Sicht von Verkehrsteilnehmern durch keine vorgelagerten Modulreihen abgeschirmt sind, weitere Prüfpunkte in Richtung Norden hinzugenommen.

Für die Verkehrsteilnehmer aus östlicher Richtung werden sechs repräsentative Blickpunkte auf der nördlichen Fahrbahnseite festgelegt und mit Ihren Koordinaten in die Berechnungen übernommen. Die Verkehrsteilnehmer aus westlicher Richtung werden mit weiteren sechs Blickpunkten auf der südlichen Fahrbahn repräsentiert.

Abbildung 13 veranschaulicht die räumlichen Beziehungen der geplanten Anlage zu den untersuchten Blickpunkten.



Abbildung 13: Übersicht über die Blickpunkte für Verkehr aus östlicher (O1 bis O6) und aus westlicher (W1 bis W6) Richtung

5.2 Berechnungsergebnisse

5.2.1 Doppelreflexionen zwischen senkrechten und konventionellen Modulen

Sonnenstrahlen, die von senkrechten auf konventionell errichtete Module reflektiert werden oder auch umgekehrt, werden von den getroffenen Modulen erneut reflektiert. Generell können derartige Doppelreflexionen ausschließlich nach Osten gerichtet sein, so dass sie für den Verkehr aus Westen keine Rolle spielen.

Von den senkrechten Modulen reflektierte Sonnenstrahlung bewirkt auf den konventionellen Modulen am linken Rand der südlichsten Modulreihe die größtmöglichen Beleuchtungsstärken mit etwas über 1.200 lx, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 27.000 lx. Mit zunehmendem Abstand von der linken Kante nimmt auch die bewirkte Beleuchtungsstärke auf den konventionellen südlichsten Tischen ab. Erneute Reflexion reduziert zwingend die Beleuchtungsstärke weiter. Für Verkehrsteilnehmer aus Osten ist die südlichste Modulreihe bis zum zweiten Punkt aus Osten, O2 in Abbildung 13, vollständig durch den Wald im Osten der Anlage abgeschirmt und liegt ab hier bereits außerhalb des zentralen Blickfeldes, wo derart schwache Lichtreflexe keine Relevanz für die Sehfähigkeit mehr haben.

5.2.2 Verkehr aus Richtung Osten

Blickpunkt von Ost 1 (O1)

Für den ersten Blickpunkt aus östlicher Richtung, 280 m vom östlichsten konventionell errichteten Modul entfernt, sind die konventionellen Modulreihen noch vollständig vom Wald östlich der Anlage abgeschirmt.

Für die senkrecht errichteten Modulreihen ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 14. Es zeigt, dass an jeweils etwa 15 Tagen vor dem 21. März und nach dem 21. September kurz nach Sonnenaufgang Lichtreflexionen der senkrechten Module in das zentrale Blickfeld der Verkehrsteilnehmer beiderseits der Blickachse gelangen können.

Auf oder direkt bei der Blickachse sind Reflexionen besonders kritisch zu betrachten, da sie bei entsprechender Größe und Intensität dazu führen können, dass die Adaptionsfähigkeit der Augen von Fahrzeugführern nicht ausreicht, um Fahrzeuge oder auf der Fahrbahn liegende Hindernisse sehen zu können, oder Verkehrsteilnehmer den Blick abwenden und das vor ihnen liegende Verkehrsgeschehen nicht mit der notwendigen Aufmerksamkeit beobachten können.

Eine genauere Untersuchung der Lichtverhältnisse zu den Zeitpunkten möglicher Reflexion ergibt, dass die reflektierende Fläche im Blickfeld eine Höhe von maximal 0,5° einnehmen kann und maximal zu Beleuchtungsstärken an Fahreraugen von 270 lx führt, während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit mehr als 5.900 lx ausleuchtet.

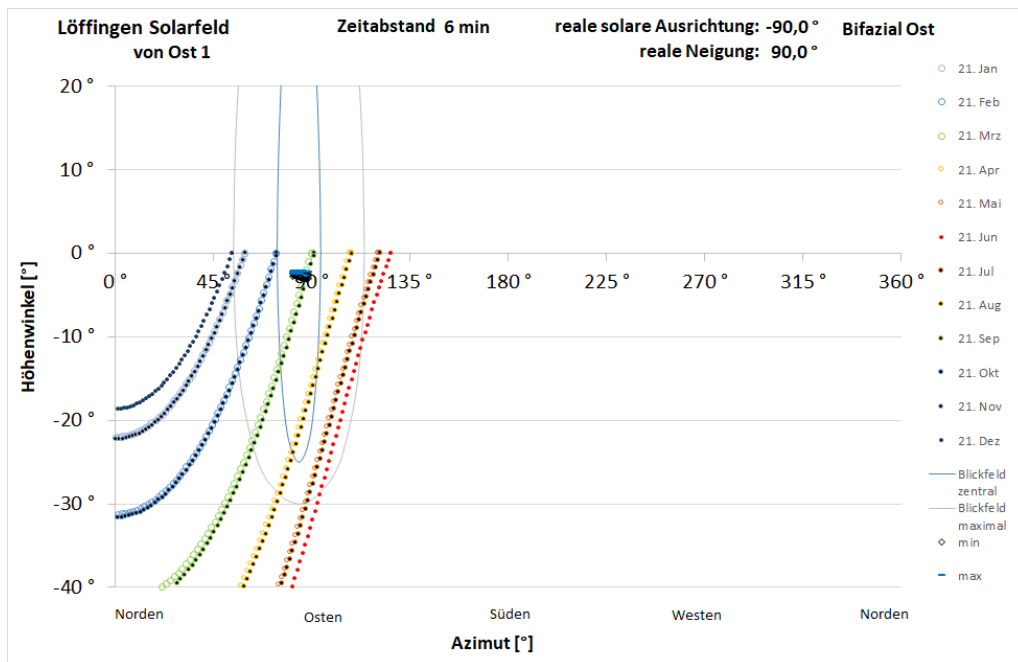


Abbildung 14: Reflexionsdiagramm für den ersten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen

Blickpunkt von Ost 2 (O2)

Für den zweiten Blickpunkt aus östlicher Richtung, 75 m vom östlichsten konventionell errichteten Modul entfernt, ergibt sich für die senkrecht errichteten Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 15.

Es zeigt, dass hier an jeweils etwa 15 Tagen vor dem 21. März und nach dem 21. September kurz nach Sonnenaufgang Lichtreflexionen der senkrechten Module in das zentrale Blickfeld der Verkehrsteilnehmer bis etwas über die Blickachse hinaus gelangen können. Zusätzlich treten hier, etwas mehr zur Jahresmitte hin, weitere Reflexionen außerhalb des zentralen Blickfeldes auf.

Dicht bei der Blickachse nimmt die reflektierende Fläche im Blickfeld Höhenwinkel von $0,45^\circ$ ein. Bis zum Rand des besonders kritischen Bereichs bei 5° Abstand zur Blickachse wachsen diese Höhenwinkel bis zu $0,78^\circ$ an und die Reflexionen können Beleuchtungsstärken an Fahreraugen von maximal 250 lx bewirken, während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 5.500 lx ausleuchtet.

Außerhalb des zentralen Blickfeldes bis 15° Abstand zur Blickachse vergrößert sich die reflektierende Fläche im Blickfeld noch auf Winkelhöhen bis $1,2^\circ$ und die Reflexionen bewirken Beleuchtungsstärken an Fahreraugen von maximal 300 lx, während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 6.600 lx ausleuchtet.

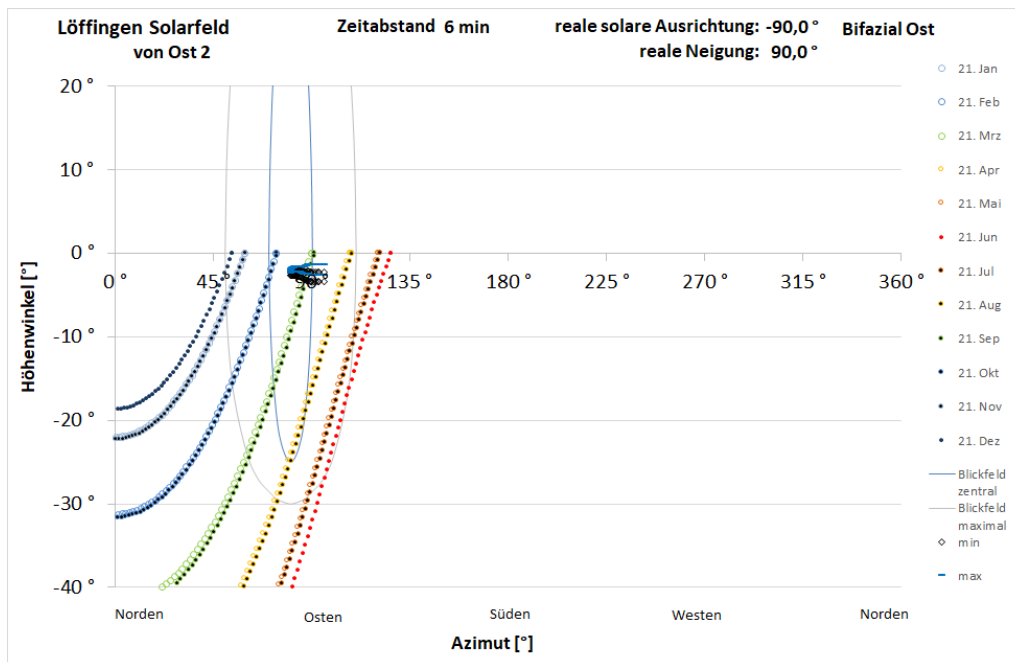


Abbildung 15: Reflexionsdiagramm für den zweiten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen

Für den konventionellen Anlagenteil, von dem frühestens ab hier erste Module des südwestlichen Tisches sichtbar werden, wie Abbildung 16 zeigt, ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 17.

Es zeigt, dass Reflexionen der konventionell errichteten Modulreihen nicht in das zentrale Blickfeld von Fahrzeugführern gerichtet sein können. Erst ab 12° Abstand zur Blickachse können Reflexionen kurz vor Sonnenuntergang für wenige Tage um Anfang April und Mitte September herum von den ersten nicht mehr vom Wald abgeschirmten Modulen ausgehen und auf Fahrzeugführer gerichtet sein. Die reflektierende Fläche im Blickfeld nimmt dabei maximal eine Winkelhöhe von 0,17° an und die Sonne selbst steht mit weniger als 4,7° Höhe über dem Horizont so dicht über der reflektierenden Fläche, dass ihre eigene Blendwirkung absolut dominiert.

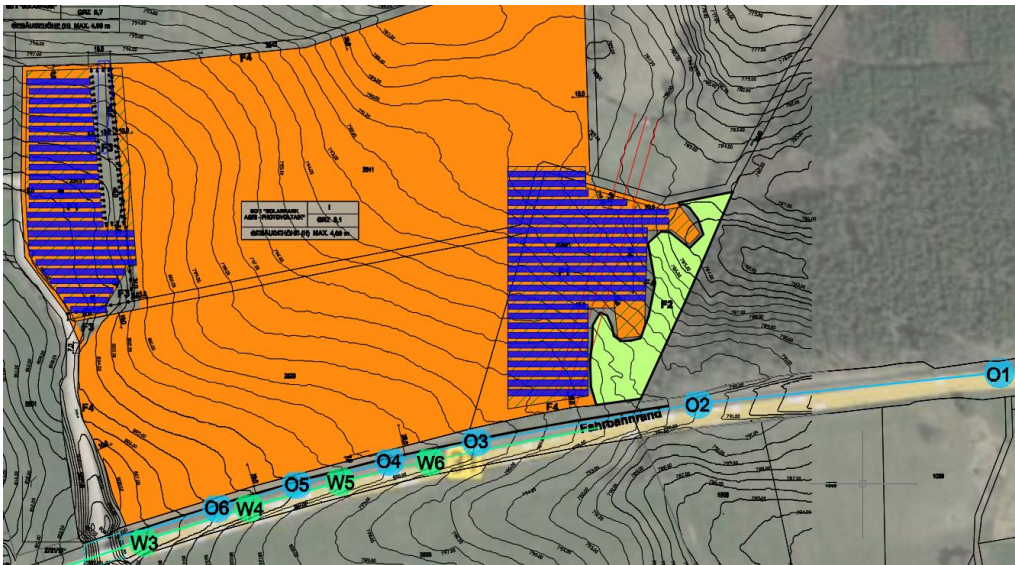


Abbildung 16: Laubwald innerhalb der Fläche des B-Plan-Geltungsbereiches hellgrün markiert und als Fläche F2 gekennzeichnet

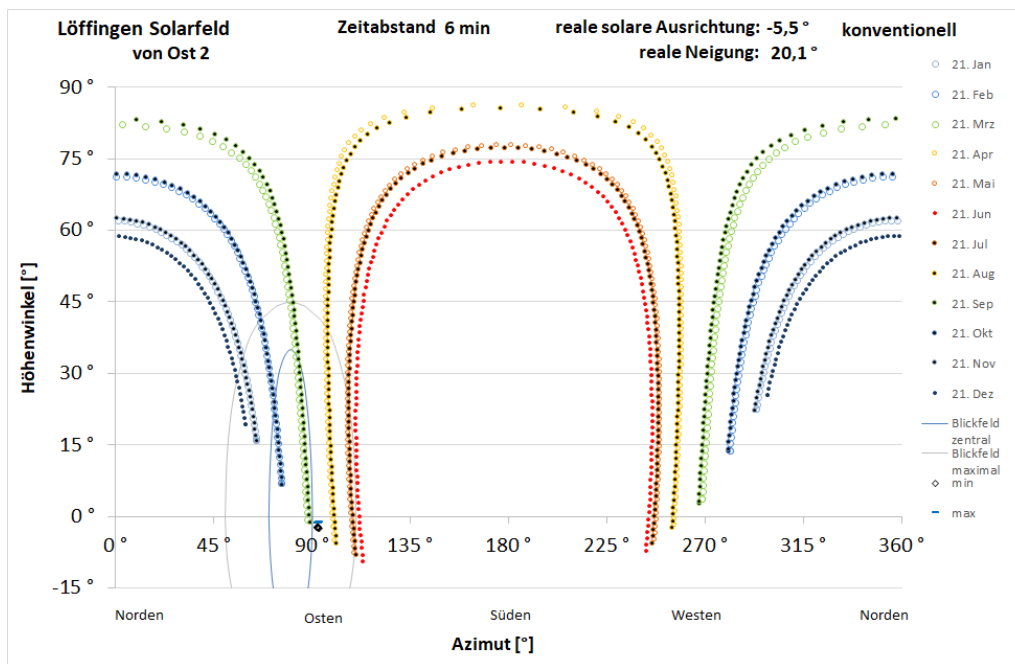


Abbildung 17: Reflexionsdiagramm für den zweiten Punkt aus Osten und die konventionell errichteten und unabgeschirmten Module

Im weiteren Verlauf der Strecke wendet sich die Blickachse noch etwas weiter von den konventionellen Tischen ab und die südwestlichste Tischunterkante, die der Blickachse noch am nächsten liegt, hat bereits nach 45 m einen Abstand zur Blickachse von 19° und liegt nach 75 m gar nicht mehr im maximalen Blickfeld.

Bis dorthin nimmt die Abschirmung durch den Wald allerdings rasch ab und die größer werdende sichtbare Fläche richtet mit wachsendem Abstand zur Blickachse zu Zeitpunkten, die näher an der Jahresmitte liegen, zunehmend intensivere Reflexionen auf vorbeifahrende Verkehrsteilnehmer. Abbildung 18 zeigt den Prozess anhand ausgewählter, teilweise auf den wesentlichen Bereich geraffter, Reflexionsdiagramme.

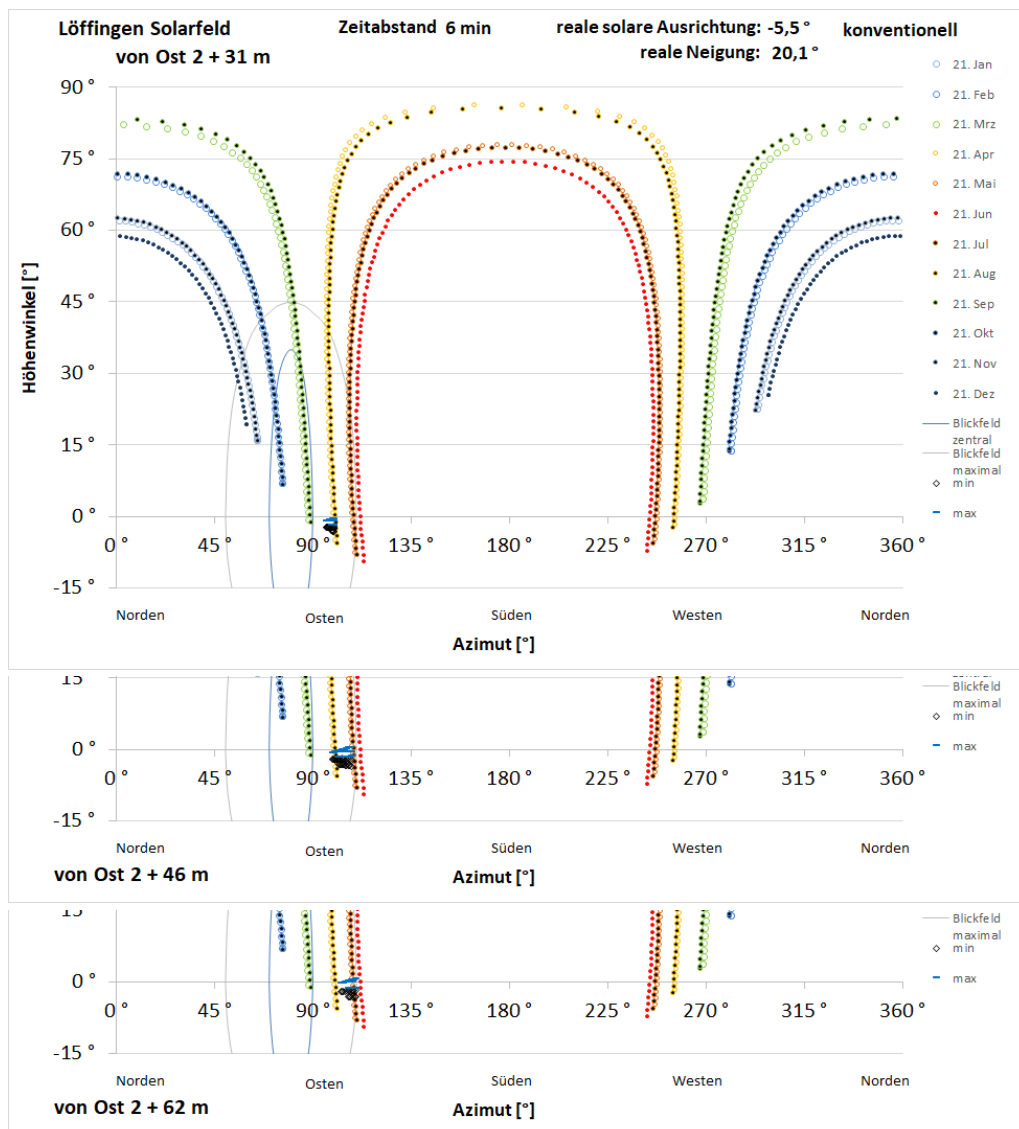


Abbildung 18: Reflexionsdiagramme für die konventionellen Tisch und Punkte hinter dem Punkt von Ost 2, vollständig für 31 m hinter Punkt O2, ausschnittsweise für 46 m und 62 m hinter O2

Die Winkelhöhe der reflektierenden Fläche im Blickfeld wächst dabei mit zunehmendem Abstand zur Blickachse auf bis zu 2°. Bis zu einem Abstand von 20° zur Blickachse übersteigt die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke 650 lx nicht, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 18.000 lx. Vom äußersten Rand des maximalen Blickfeldes ausgehende

Reflexionen können maximal 1.500 lx Beleuchtungsstärke an Fahreraugen bewirken, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 31.000 lx.

Blickpunkt von Ost 3 (O3)

Für den dritten Blickpunkt aus östlicher Richtung, der bereits hinter den ersten beiden senkrechten Modulreihen liegt, ergibt sich für senkrecht errichtete Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 19.

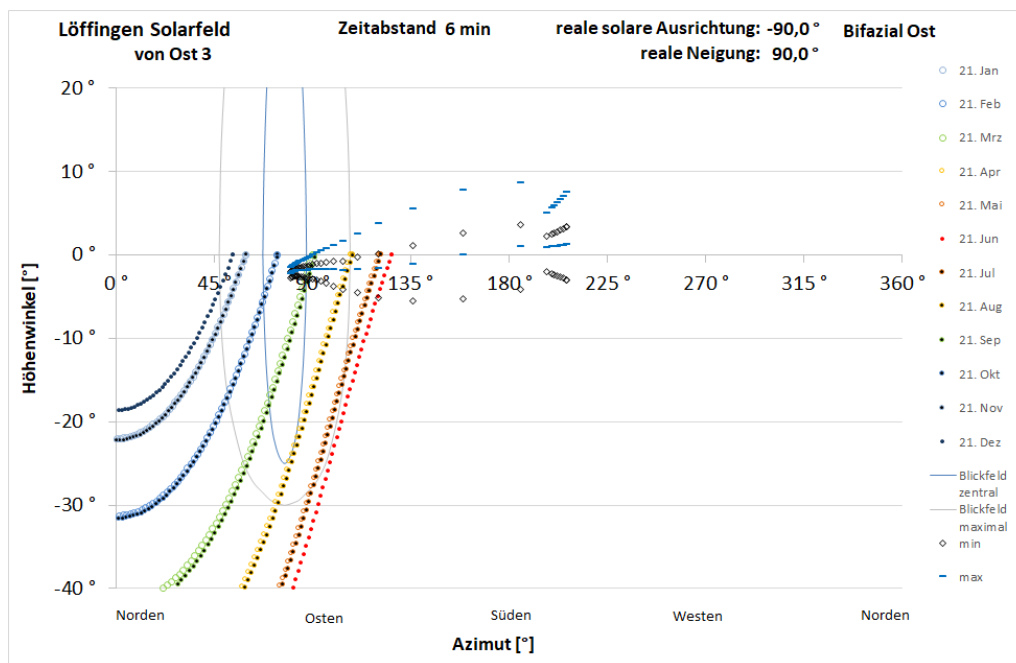


Abbildung 19: Reflexionsdiagramm für den dritten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen

Es zeigt, dass auch hier an jeweils etwa 15 Tagen vor dem 21. März und nach dem 21. September kurz nach Sonnenaufgang Lichtreflexionen der senkrechten Module in das zentrale Blickfeld der Verkehrsteilnehmer dicht bei der Blickachse gelangen können, hier aber bereits mit einem Minimalabstand zu ihr von 3°. Zusätzlich treten auch hier, mehr zur Jahresmitte hin, weitere Reflexionen auf, die sich bis zum Rand des maximalen Blickfelds erstrecken.

Innerhalb des besonders kritischen Bereichs bis 5° Abstand zur Blickachse nimmt die reflektierende Fläche im Blickfeld Höhenwinkel von bis zu 0,9° ein und die Reflexionen können Beleuchtungsstärken an Fahreraugen von maximal 240 lx bewirken, während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 5.200 lx ausleuchtet.

Zum Rand des zentralen Blickfeldes hin vergrößert sich die reflektierende Fläche im Blickfeld noch auf Höhenwinkel bis 1,6°, bei gleichbleibender maximaler Beleuchtungsstärke an Fahreraugen von 240 lx, während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 5.200 lx ausleuchtet.

Zum Rand des maximalen Blickfeldes hin wächst die reflektierende Fläche auf Winkelhöhen bis zu $3,3^\circ$ mit maximal an Fahreraugen bewirkten Beleuchtungsstärken von 360 lx , während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 8.000 lx ausleuchtet.

Blickpunkt von Ost 4 (O4)

Für den vierten Blickpunkt aus östlicher Richtung ergibt sich für die senkrecht errichteten Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 20.

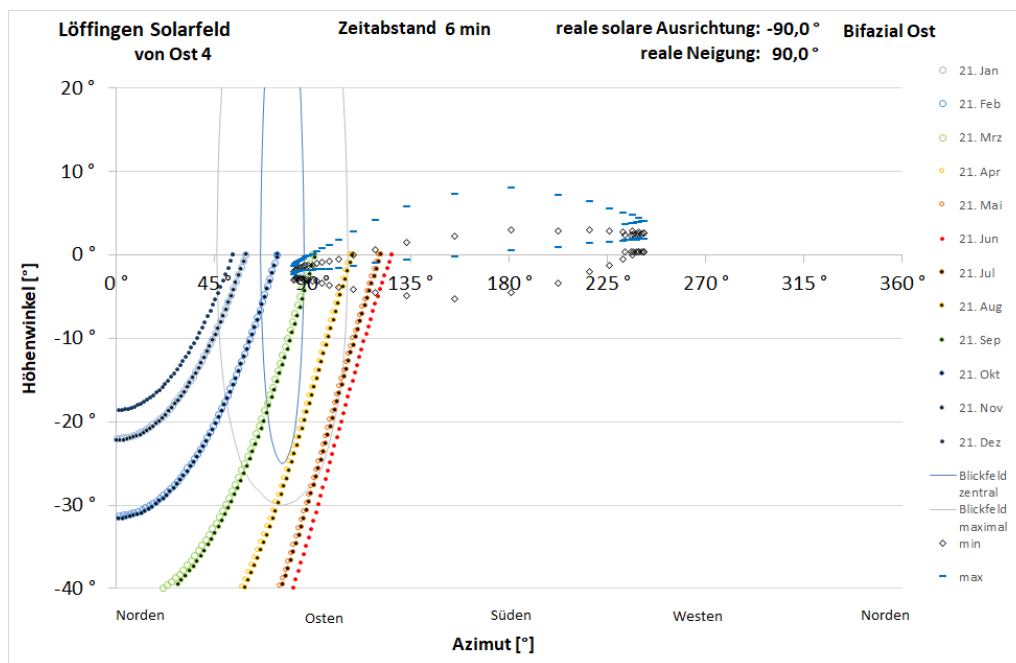


Abbildung 20: Reflexionsdiagramm für den vierten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen

Reflexionen treten hier immer noch im zentralen Blickfeld auf, aber mit einem Mindestabstand zur Blickachse von etwas über 5° nicht mehr im besonders kritischen Bereich. Die Winkelhöhe der reflektierenden Fläche im Blickfeld wächst mit zunehmendem Abstand zur Blickachse von 1° auf bis zu $1,5^\circ$, die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke überschreitet aber nicht 260 lx , während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 5.700 lx ausleuchtet.

Außerhalb des zentralen Blickfelds wächst die Winkelhöhe im Blickfeld weiter mit wachsendem Abstand zur Blickachse auf bis zu $3,4^\circ$ am Rand des maximalen Blickfeldes an. Die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke überschreitet 330 lx nicht, während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 7.400 lx ausleuchtet.

Blickpunkt von Ost 5 (O5)

Für den fünften Blickpunkt aus östlicher Richtung ergibt sich für die senkrecht errichteten Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 21.

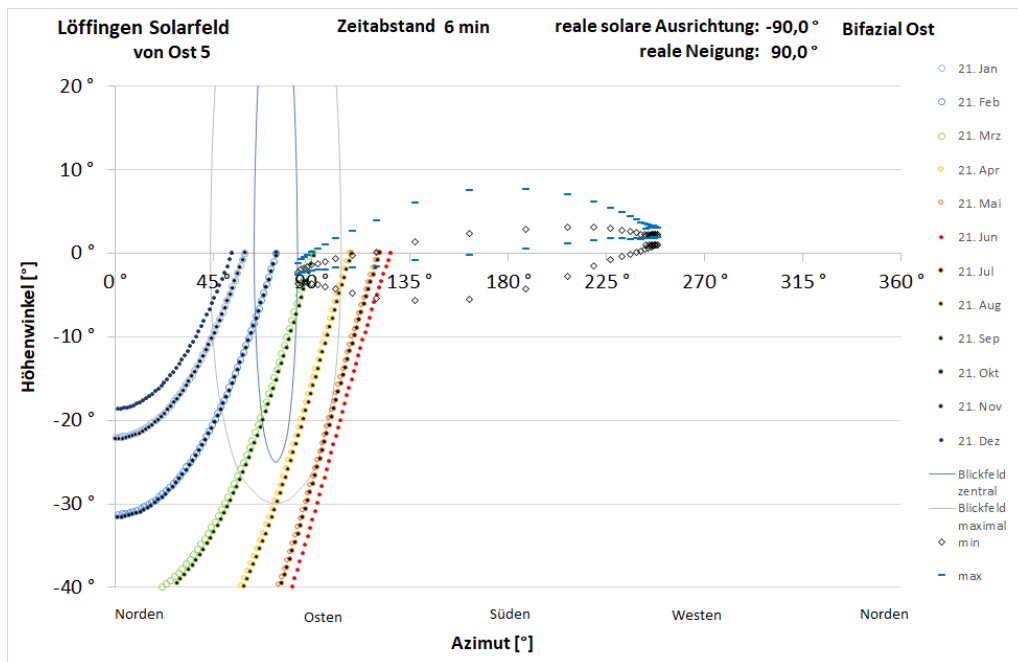


Abbildung 21: Reflexionsdiagramm für den fünften Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen

Reflexionen treten hier nicht im zentralen Blickfeld auf.

Außerhalb des zentralen Blickfeldes wächst die Winkelhöhe im Blickfeld mit wachsendem Abstand zur Blickachse von $1,4^\circ$ auf bis zu $3,6^\circ$ am Rand des maximalen Blickfeldes an. Die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke überschreitet 370 lx nicht, während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 8.100 lx ausleuchtet.

Blickpunkt von Ost 6 (O6)

Für den sechsten Blickpunkt aus östlicher Richtung ergibt sich für die senkrecht errichteten Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 22.

Der Mindestabstand möglicher Reflexionen zur Blickachse beträgt hier bereits 20° . Die Winkelhöhe der reflektierenden Fläche im Blickfeld erreicht bis zu $3,5^\circ$. Die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke überschreitet 440 lx nicht, während die hinter den Fahrzeugen stehende Sonne das gesamte Blickfeld mit über 9.600 lx ausleuchtet.

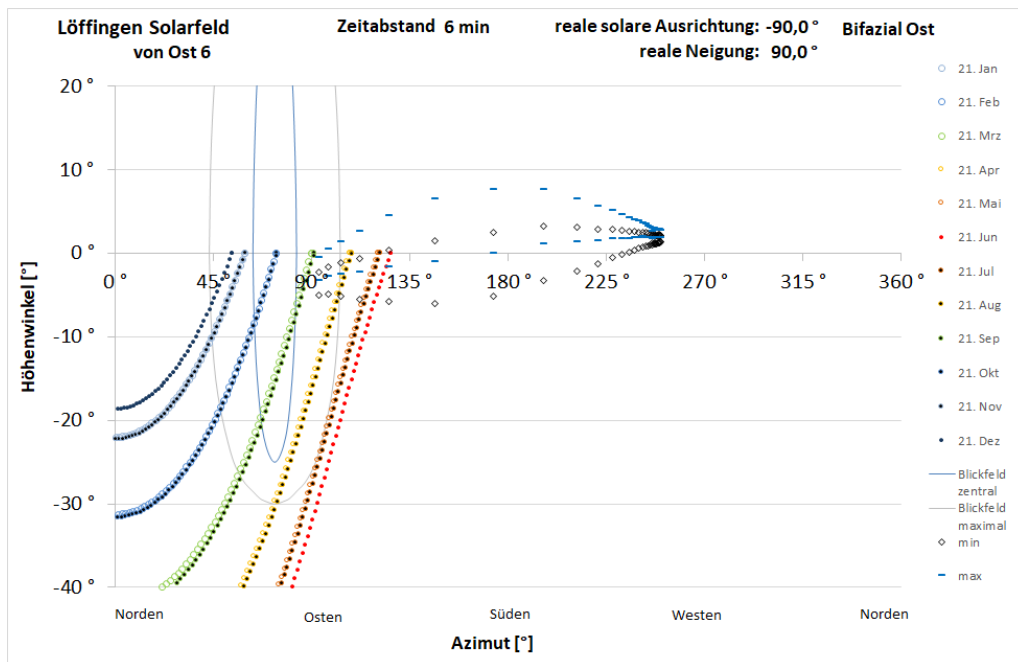


Abbildung 22: Reflexionsdiagramm für den sechsten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen

5.2.3 Verkehr aus Richtung Westen

Blickpunkt von West 1 (W1)

Aufgrund des starken Gefälles liegen bis zum Punkt W2 auch die niedrigsten Augenhöhen von Fahrzeugführern oberhalb der maximalen Moduloberkanten der senkrecht errichteten Module und können damit von ihren Reflexionen nicht betroffen sein.

Für die konventionell errichteten Tische dagegen ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 23. Die Reflexionen treffen mitten in das zentrale Blickfeld mit geringfügigen Abständen rund um die Blickachse. Die Winkelhöhe der reflektierenden Fläche im Blickfeld ist allerdings auf 0,2° begrenzt und die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke auf 400 lx, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 22.000 lx.

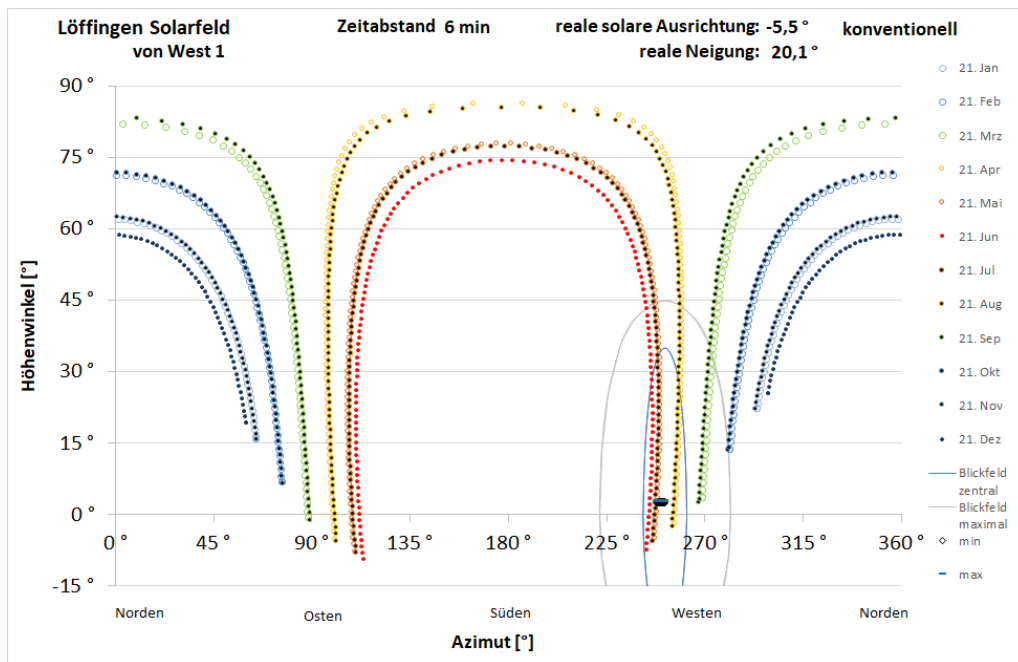


Abbildung 23: Reflexionsdiagramm für den ersten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen

Blickpunkt von West 2 (W2)

Für die konventionell errichteten Tische ergibt sich am zweiten Punkt aus Westen das Reflexionsdiagramm in Abbildung 24. Die Reflexionen treffen weiterhin mitten in das zentrale Blickfeld beiderseits der Blickachse. Die Winkelhöhe der reflektierenden Fläche im Blickfeld ist noch auf $0,33^\circ$ begrenzt. Die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke erreicht ab 4° Abstand zur Blickachse, am Rand des besonders kritischen Bereichs bereits über 700 lx, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 25.000 lx.

Die senkrecht errichteten Module schirmen dabei nur zwischen $1,8^\circ$ Abstand zur Blickachse und $4,9^\circ$ einen Teil der Reflexionen ab, ohne dass dadurch die genannten Eckdaten wesentlich abgemildert würden.

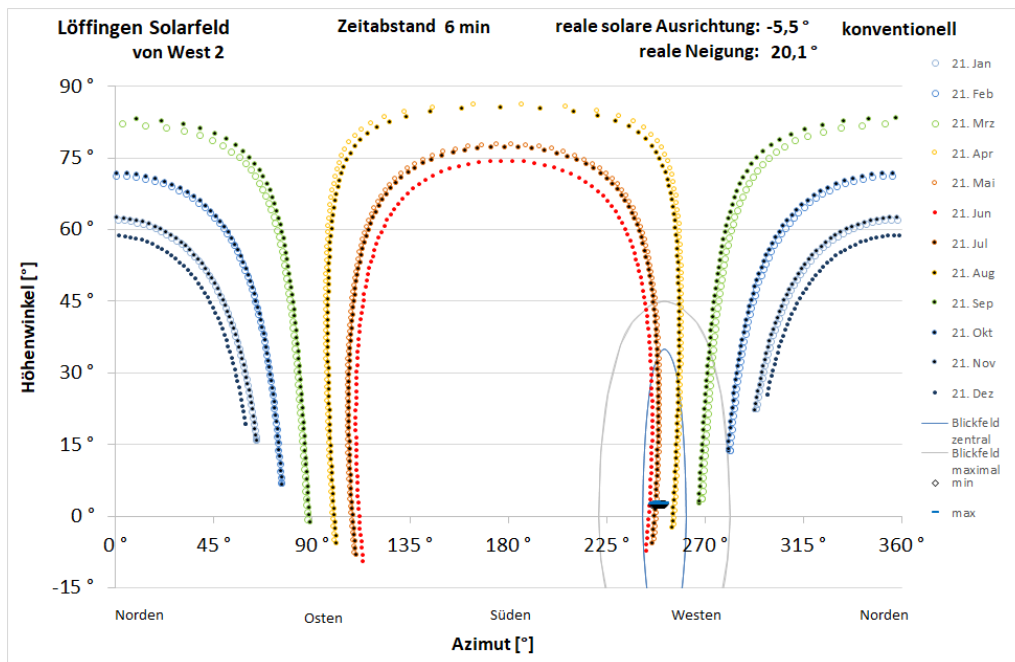


Abbildung 24: Reflexionsdiagramm für den zweiten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen

Blickpunkt von West 3 (W3)

Für den dritten Punkt aus westlicher Richtung ergibt sich für die senkrecht errichteten Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 25.

Es zeigt, dass Reflexionen von ihnen hier noch keine Fahreraugen erreichen können.

Die konventionell errichteten Module sind hier ab einem Abstand zur Blickachse von $3,6^\circ$ durch die senkrecht errichteten vollständig abgeschirmt. Für die nicht abgeschirmten ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 26.

Es zeigt weiterhin im besonders kritischen Bereich des zentralen Blickfeldes zwischen $0,6^\circ$ und $3,6^\circ$ links der Blickachse Reflexionen. Im Blickfeld können sie eine Winkelhöhe bis zu $0,36^\circ$ einnehmen und an Fahreraugen Beleuchtungsstärken bis zu 600 lx bewirken, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von über 22.000 lx.

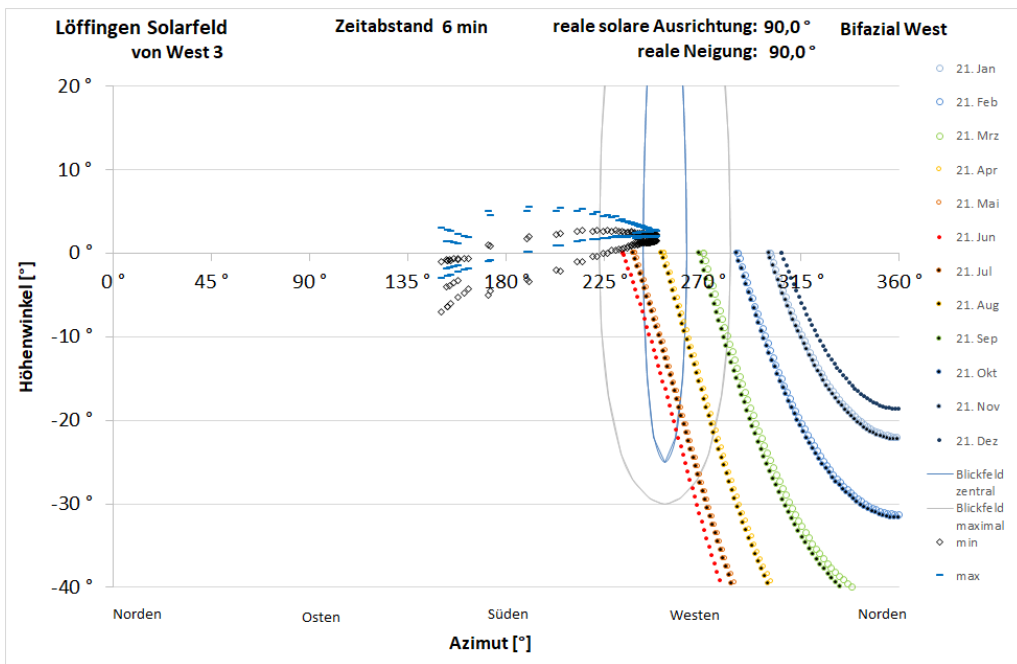


Abbildung 25: Reflexionsdiagramm für den dritten Punkt aus Westen und die senkrecht errichteten Modulreihen

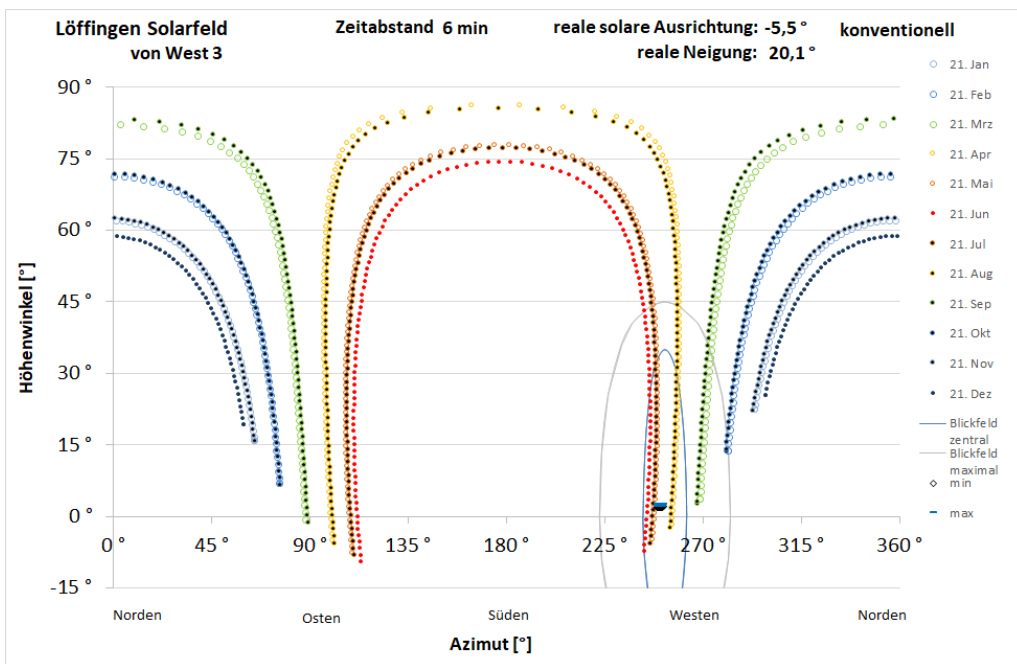


Abbildung 26: Reflexionsdiagramm für den dritten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen, soweit sie nicht von den senkrechten Modulen abgeschirmt werden

Blickpunkt von West 4 (W4)

Für den vierten Punkt aus westlicher Richtung ergibt sich für die senkrecht errichteten Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 27.

Es zeigt, dass Reflexionen von ihnen auch hier keine Fahreraugen erreichen können.

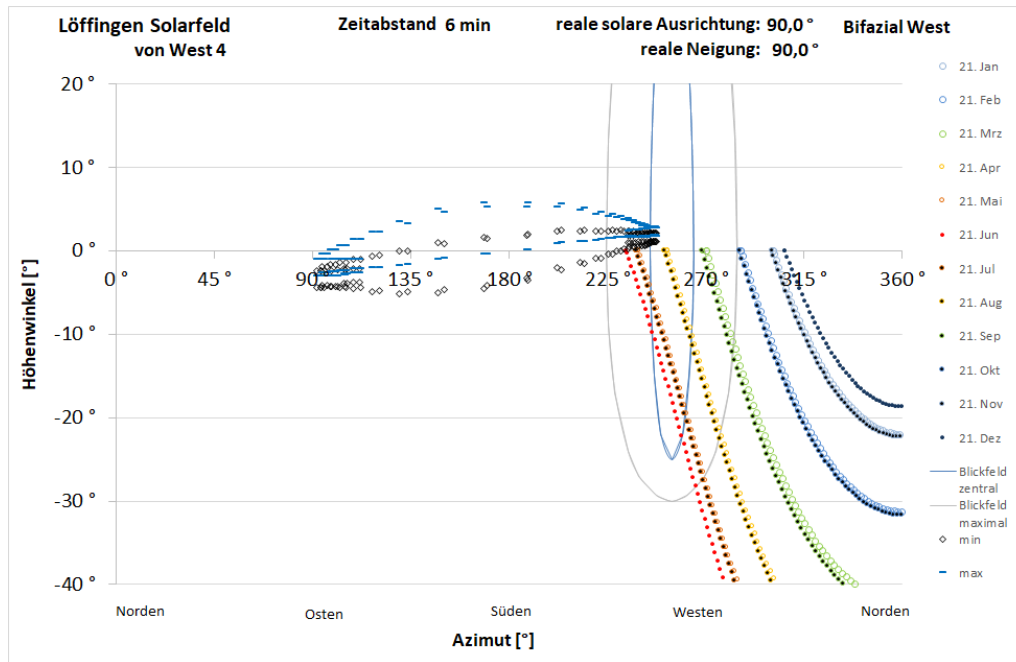


Abbildung 27: Reflexionsdiagramm für den vierten Punkt aus Westen und die senkrecht errichteten Modulreihen

Die konventionell errichteten Module sind hier ab einem Abstand zur Blickachse von 6,9° durch die senkrecht errichteten vollständig abgeschirmt. Für die nicht abgeschirmten ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 28.

Es zeigt weiterhin im besonders kritischen Bereich des zentralen Blickfeldes ab 2,6° links der Blickachse Reflexionen. Im Blickfeld können sie eine Winkelhöhe bis zu 0,41° am Rand des besonders kritischen Bereichs bei 5° Abstand zur Blickachse einnehmen, die außerhalb nur noch auf 0,47° ansteigt. An Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärken erreichen bei 5° Abstand zur Blickachse bis zu 800 lx, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von über 22.000 lx. Außerhalb des besonders kritischen Bereichs wächst die Winkelhöhe im Blickfeld nicht weiter an, die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke wächst aber noch auf fast 1.000 lx, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von über 24.500 lx.

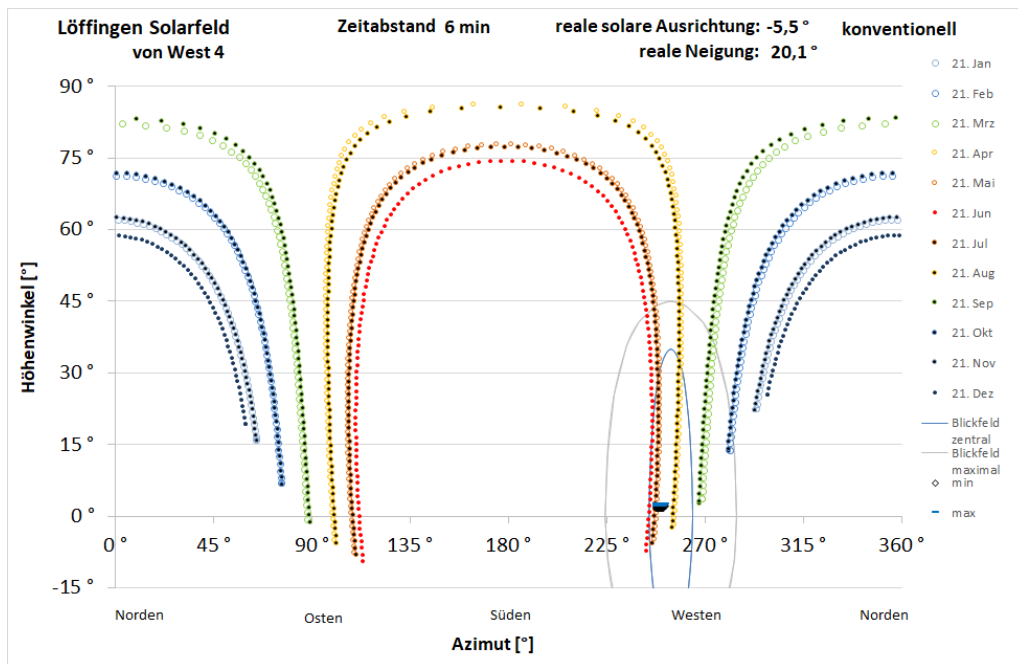


Abbildung 28: Reflexionsdiagramm für den vierten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen, soweit sie nicht von den senkrechten Modulen abgeschirmt werden

Blickpunkt von West 5 (W5)

Für den fünften Punkt aus westlicher Richtung ergibt sich für die senkrecht errichteten Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 29. Auch hier liegen die Oberkanten derjenigen senkrechten Module, deren potenzielle Reflexionsazimutrichtungen zur Lage des untersuchten Punktes passen, noch so hoch über den niedrigsten Fahreraugen an diesem Punkt, dass eine Betroffenheit von Reflexionen hier ausgeschlossen ist.

Für die konventionell errichteten Module ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 30. Die Abschirmung durch senkrecht errichtete Module zu berücksichtigen, ist hier unnötig, da nur Module abgeschirmt sind, die auf Grund ihrer geometrischen Lage jenseits der Tagesganglinie vom 21. Juni ohnehin keine Reflexionen zum untersuchten Punkt mehr richten können.

Es zeigt weiterhin im zentralen Blickfeld ab $6,2^\circ$ links der Blickachse Reflexionen. Der besonders kritische Bereich bis 5° Abstand zur Blickachse ist aber schon nicht mehr betroffen.

Zum Rand des zentralen Blickfeldes hin wachsen die Reflexionen auf eine Winkelhöhe bis zu $0,61^\circ$ an. Die von ihnen an Fahreraugen bewirkten Beleuchtungsstärken wachsen mit zunehmendem Abstand von der Blickachse rasch an. Ab 7° Abstand zur Blickachse können Beleuchtungsstärken an Fahreraugen von 1.000 lx erreicht werden, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 22.000 lx . Bis zum Rand des zentralen Blickfeldes bei 10° Abstand zur Blickachse erreichen diese Werte 1.200 lx bzw. 25.500 lx .

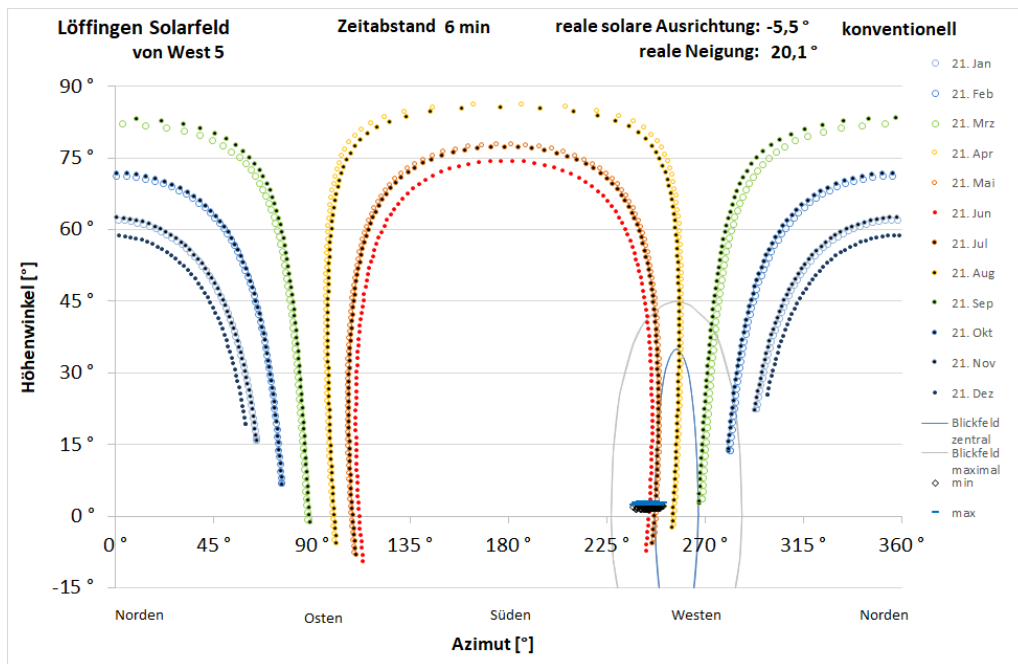


Abbildung 30: Reflexionsdiagramm für den fünften Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen

Blickpunkt von West 6 (W6)

Für den sechsten Punkt aus westlicher Richtung ergibt sich für die senkrecht errichteten Module das Reflexionsdiagramm in Abbildung 31.

Reflexionen dieser Module zu diesem Punkt sind ausgeschlossen, ebenso für den weiteren Verlauf der Fahrstrecke.

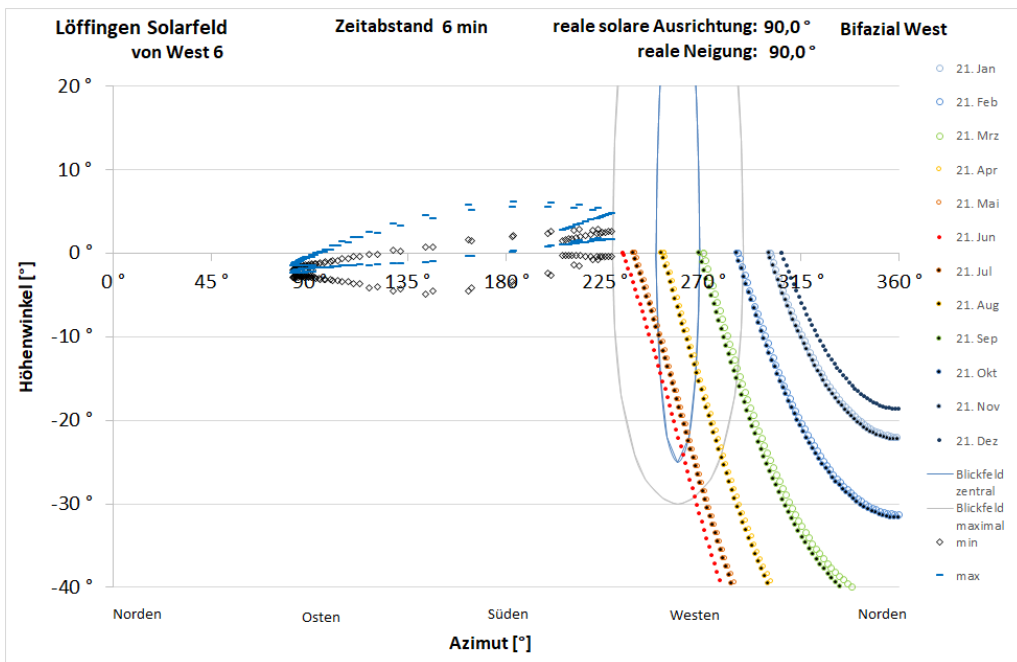


Abbildung 31: Reflexionsdiagramm für den sechsten Punkt aus Westen und die senkrecht errichteten Modulreihen

Für die konventionell errichteten Module ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 32.

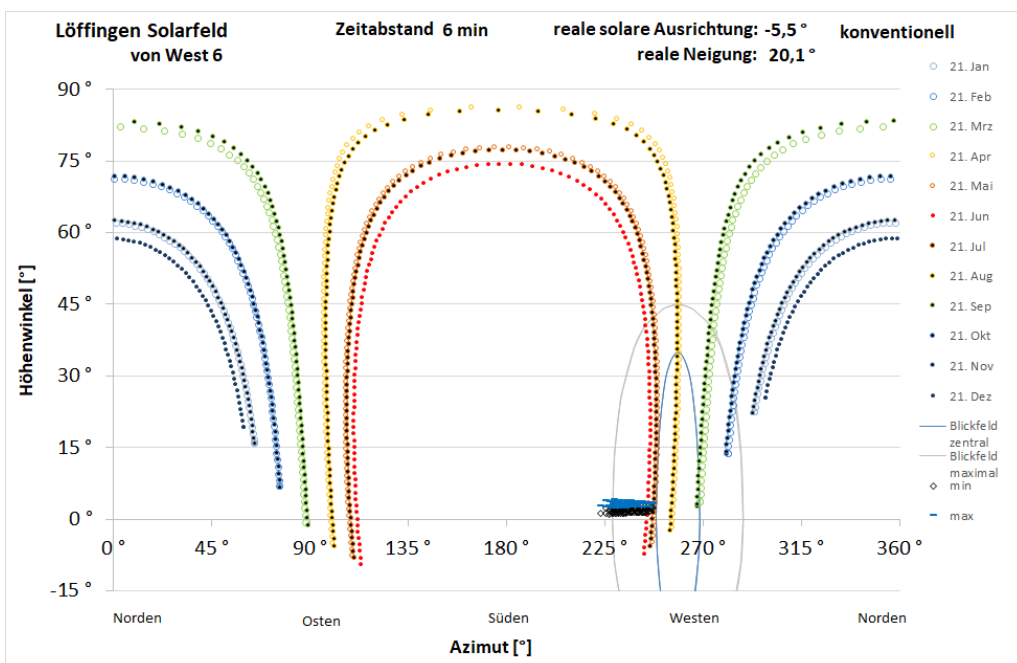


Abbildung 32: Reflexionsdiagramm für den sechsten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen

Hier sind Reflexionen nur noch möglich zwischen $11,1^\circ$ Abstand zur Blickachse und $14,1^\circ$, das zentrale Blickfeld ist somit frei.

Die Winkelhöhe der reflektierenden Fläche im Blickfeld wächst mit zunehmendem Abstand zur Blickachse noch geringfügig auf $0,85^\circ$ an und die von Reflexionen an Fahreraugen bewirkten Beleuchtungsstärken wachsen im selben Maß noch an auf fast 1.500 lx, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von über 29.000 lx.

Danach enden mögliche Reflexionen wieder an der Tagesganglinie des 21. Juni.

Im weiteren Verlauf der Strecke verlassen die Verkehrsteilnehmer schnell den Bereich möglicher Reflexionen.

6 Bewertung der Blendrisiken

6.1 Südliche Fahrbahn aus Westen kommend

Für Verkehrsteilnehmer auf der südlichen Fahrbahn, die aus Westen kommen, wird festgestellt, dass sie von Reflexionen der senkrecht errichteten Modulreihen nirgends betroffen sein können.

Die konventionell errichteten Modulreihen im Südosten dagegen können in den Morgenstunden v. a. der Monate Mai und Juli für einige Minuten Reflexionen auf die gesamte untersuchte Strecke von über 500 m richten.

Über einen großen Teil der Strecke hinweg können diese Reflexionen im besonders kritischen Bereich des zentralen Blickfeldes von Fahrzeugführern bis 5° Abstand zur Blickachse auftreten und auf den ersten etwa 300 m sogar direkt auf der Blickachse. Die im Blickfeld von Reflexionen eingenommene Winkelhöhe wächst dabei auf den ersten 300 m von 0,2° auf 0,35° an, die von ihnen an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke bleibt im engsten Umfeld der Blickachse allerdings auf 600 lx beschränkt, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 22.000 lx.

Auf den folgenden 200 m verlagern sich mögliche Reflexionen weiter von der Blickachse weg, wobei ihre im Blickfeld eingenommene Winkelhöhe mit dem Abstand zur Blickachse anwächst, ebenso wie ihre Intensität. Ab 7° Abstand zur Blickachse, also noch immer im zentralen Blickfeld, werden 1.000 lx an Fahreraugen bewirkter Beleuchtungsstärke überschritten, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 22.000 lx. Die maximale Winkelhöhe im Blickfeld wird mit 0,81° am Ende der untersuchten Strecke bei 14,1° Abstand zur Blickachse erreicht, ebenso wie die maximale, an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke von 1.500 lx, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 29.000 lx.

Einerseits treten alle diese Reflexionen zu Zeiten voll entwickelter Tageshelligkeit auf, mit der Folge, an die Helligkeit adaptierter Augen, und die innerhalb des besonders kritischen Bereichs rund um die Blickachse auftretenden Reflexionen bewirken an Fahreraugen noch keine so großen Beleuchtungsstärken, dass eine direkte physiologische Blendung wahrscheinlich ist. Andererseits ist hier der Zeitfaktor zu berücksichtigen: Über eine Strecke von 300 m hinweg kann die reflektierende Fläche genau auf der Blickachse liegen und allmählich anwachsen. Bei Geschwindigkeiten von 80 km/h bedeutet die Strecke von 300 m eine Dauer von 13,5 Sekunden, bei 100 km/h noch immer über 10 Sekunden. Bei einer solchen Zeitdauer übt auch ein „kleinerer heller Fleck“ genau auf der Blickachse einen zunehmenden Reiz zur Blickabwendung aus, der vermieden werden sollte.

Im nachfolgenden Kapitel 7 werden hierfür Blendschutzmaßnahmen empfohlen und beschrieben.

6.2 Nördliche Fahrbahn aus Osten kommend

6.2.1 Reflexionen der senkrecht zu errichtenden Module

Für Verkehrsteilnehmer auf der nördlichen Fahrbahn, die aus Osten kommen, wird festgestellt, dass sie von Reflexionen der senkrecht errichteten Modulreihen in etwas ähnlicher Weise betroffen sein können, wie es auf der Gegenfahrbahn durch Reflexionen der konventionellen Anlage festgestellt wurde: Die Strecke, auf der mit Reflexionen direkt auf der Blickachse zu rechnen ist, hat mit etwa 300 m eine ähnliche Länge, die Winkelhöhe der reflektierenden Fläche im Blickfeld ist sogar noch etwas größer. Dafür ist andererseits die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke noch einmal deutlich geringer und die Sonne steht fast genau im Rücken der Fahrzeugführer und leuchtet damit die vor ihnen liegende Szenerie direkt aus, wobei die von ihr bewirkte Beleuchtungsstärke wiederum auch deutlich geringer ist als im Fall der Gegenfahrbahn.

Angesichts der zeitlichen Dauer sollte aber auch hier der unmittelbare Bereich der Blickachse von Reflexionen freigehalten werden. Entsprechende Blendschutzmaßnahmen dafür werden im nachfolgenden Kapitel 7 beschrieben.

Für die seitlich der Blickachse auftretenden Reflexionen wird festgestellt, dass sie insgesamt größere Winkelhöhen im Blickfeld einnehmen können, ab 5° Abstand zur Blickachse, also außerhalb des besonders kritischen Bereichs 1,6°, ab 10° Abstand zur Blickachse, also außerhalb des zentralen Blickfeldes 1,7° und mit noch größeren Abständen zur Blickachse sogar bis nahezu 3,6°. In allen Fällen bleibt aber die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke in so niedrigen Bereichen, dass eine Blendung ausgeschlossen werden kann, zumal stets die Sonne im Rücken der Fahrzeugführer stehend das Blickfeld vor ihnen mit deutlich über 20-facher Beleuchtungsstärke ausleuchtet.

6.2.2 Reflexionen der konventionellen Anlage

Verkehrsteilnehmer auf der nördlichen Fahrbahn, die aus Osten kommen, sind möglichen Reflexionen des konventionellen Anlagenteils nur innerhalb einer sehr kurzen Strecke von 75 m ausgesetzt und die Betroffenheit zu einem gegebenen Zeitpunkt des Vorbeifahrens ist noch einmal sehr viel kürzer, da sich die Reflexionsrichtungen, die einzelne Teilstücke der 75-m-Strecke betreffen können, über einen Zeitraum von 2 Monaten, jeweils im Früh- bzw. Spätsommer, hinweg verteilen.

Die Reflexionen treten darüber hinaus ausschließlich mit einem Abstand zur Blickachse von über 12° außerhalb des zentralen Blickfeldes auf. Flächengröße und Reflexionsintensität wachsen mit dem Abstand zur Blickachse und die an Fahreraugen bewirkte Beleuchtungsstärke übersteigt 650 lx erst ab 20° Abstand zur Blickachse, bei gleichzeitiger Beleuchtung senkrecht von der Sonne bestrahlter Objekte von 18.000 lx.

Eine Sichtbeeinträchtigung kann von derartigen Reflexionen nicht ausgehen.

7 Blendschutzmaßnahmen

Es ist ohnehin beabsichtigt, den in gesondertem Blendgutachten bewerteten Solarzaun zu errichten, dessen Lage in Abbildung 33 durch eine rote Linie gekennzeichnet ist.

Seine Errichtung würde die Blickachse der von Osten kommenden Verkehrsteilnehmer vollständig frei halten von Reflexionen und darüber hinaus weitere, nicht als blendrelevante Reflexionen eingestufte Reflexionen in beiden Fahrtrichtungen reduzieren.

Für das Freihalten der Blickachse des Gegenverkehrs, der von Westen kommt, würde er allerdings nicht ausreichen. Hierfür wird empfohlen, die östliche Hälfte der südlichsten konventionellen Modulreihe entfallen zu lassen. Die nicht zu errichtenden Tische sind in Abbildung 33 durch rote Schraffur hervorgehoben.

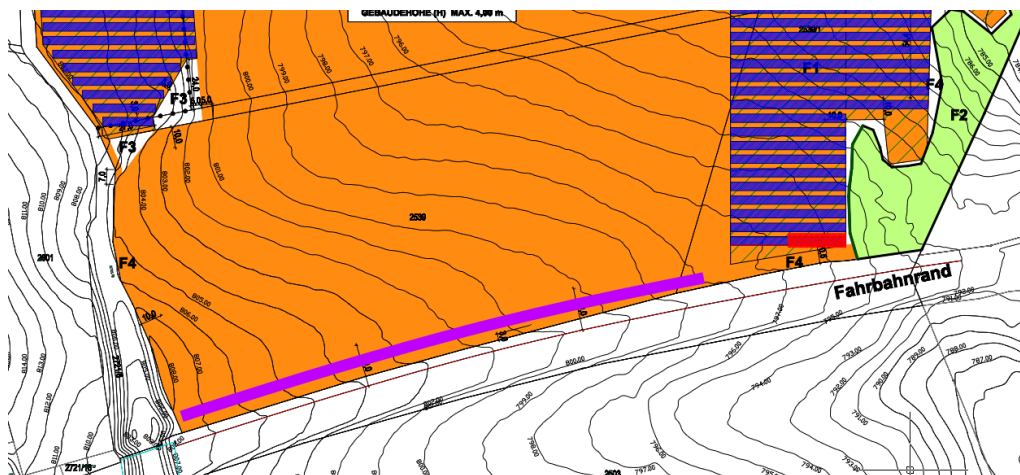


Abbildung 33: Lage des Solarzauns (lila Linie) und entfallende konventionelle Tische (rot schraffiert)

8 Verwendete Materialien

8.1 Dokumente vom Auftraggeber

- ▶ Datei „Solarpark Agri-PV Löffingen 2022-09-15.dwg“
- ▶ Datei „Solarpark Agri-PV Löffingen Plan 2022-10-04.pdf“

8.2 Literatur

- ▶ Wittlich, M.: Blendung – Theoretischer Hintergrund, Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA); Sankt Augustin 2010
- ▶ Schattenwurf-Richtlinie: Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweis, verabschiedet auf der 103. Sitzung des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI), 6.-8.5.2002
- ▶ LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz): Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen; Beschluss der LAI vom 13.09.2012, Anhang 2 – Stand 3.11.2015; <http://www.lai-immissionsschutz.de/servlet/is/20170/Hinweise%20zur%20Messung%20Beurteilung%20und%20Minderung%20von%20Lichtimmissionen.pdf?command=downloadContent&filename=Hinweise%20zur%20Messung%20Beurteilung%20und%20Minderung%20von%20Lichtimmissionen.pdf>
- ▶ Fischbach, M.; Mack, M.; Haselhuhn, R.: Blendgutachten Photovoltaik – ein Statusbericht aus der Gutachterpraxis; Tagungsband 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie 12.-14.3.2014 Bad Staffelstein; Hsg.: OTTI e.V.
- ▶ Eicker, U.: Solare Technologien für Gebäude; 1. Aufl. B. G. Teubner GmbH Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2001
- ▶ Reidenbach H.-D., Dollinger K., Ott G., Janßen M., Brose M. (2008): Blendung durch optische Strahlungsquellen. Bericht der BAUA, Forschung Projekt 2185
- ▶ Kaufmann, H.: Strabismus. Stuttgart, Enke, 1986
- ▶ Empfehlungen der Strahlenschutzkommission: Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren; verabschiedet in der 205. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Februar 2006
- ▶ DIN 5034-2:1985-02 Tageslicht in Innenräumen; Grundlagen

9 *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 1: Lage des geplanten Solarparks (orange Fläche: Agri-PV, grün schraffiert: konventionelle Modultische) und der Bundesstraße B 31. Quelle: Kundenmaterial auf Hintergrundbild von Google Earth Pro.....	4
Abbildung 2: Blendsituationen. Gegenstände auf der Sichtachse zur Blendquelle sind nicht mehr wahrnehmbar.	7
Abbildung 3: Blickfelder von Tabelle 1. Der Achsenschnittpunkt $0^{\circ}/0^{\circ}$ stellt dabei einen Punkt auf der Blickachse dar, auf den die Augen fokussieren, und nicht notwendigerweise einen Punkt auf dem Horizont.....	9
Abbildung 4: Auswirkung des Einfallwinkels auf den Transmissionsgrad für Modulgläser	11
Abbildung 5: Lageplan Agri-Photovoltaik Löffingen (auf orangener Fläche), mit konventionellen Modulreihen (blau) auf nordwestlicher und südöstlicher Teilfläche; Höhenlinien im 1-m-Abstand schwarz (Quelle: Kundenmaterial, bearbeitet)	12
Abbildung 6: Beispiel für senkrecht errichtete Modulreihen (Quelle: Kundenmaterial)	13
Abbildung 7: Verlauf der B 31 im Bereich des Baufeldes (Quelle: Google Earth Pro)	13
Abbildung 8: Darstellung des Reflexionsstrahls anhand von Azimut und Höhenwinkel wie im Reflexionsdiagramm verwendet und Beschreibung des Abstandswinkels zwischen Blickrichtungen zur Sonne und zum Reflexionspunkt.....	15
Abbildung 9: Reflexionsdiagramm für die Westseite der senkrecht aufgestellten bifazialen Module am Standort der Anlage mit waagrecht aufgetragen Azimut- und senkrecht aufgetragenen Höhenwinkeln.....	16
Abbildung 10: Reflexionsdiagramm für die Ostseite der senkrecht aufgestellten bifazialen Module am Standort der Anlage mit waagrecht aufgetragen Azimut- und senkrecht aufgetragenen Höhenwinkeln.....	17
Abbildung 11: Reflexionsdiagramm für die konventionell errichteten Modultische am Standort der Anlage mit hangbedingter Ausrichtung von $-5,5^{\circ}$ und Neigung von $20,1^{\circ}$, waagrecht aufgetragen Azimut- und senkrecht aufgetragenen Höhenwinkel	17
Abbildung 12: Beispiel für Bandbreite möglicher Höhenwinkel	18
Abbildung 13: Übersicht über die Blickpunkte für Verkehr aus östlicher (O1 bis O6) und aus westlicher (W1 bis W6) Richtung	19
Abbildung 14: Reflexionsdiagramm für den ersten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	21

Abbildung 15: Reflexionsdiagramm für den zweiten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	22
Abbildung 16: Laubwald innerhalb der Fläche des B-Plan-Geltungsbereiches hellgrün markiert und als Fläche F2 gekennzeichnet.....	23
Abbildung 17: Reflexionsdiagramm für den zweiten Punkt aus Osten und die konventionell errichteten und unabgeschirmten Module	23
Abbildung 18: Reflexionsdiagramme für die konventionellen Tisch und Punkte hinter dem Punkt von Ost 2, vollständig für 31 m hinter Punkt O2, ausschnittweise für 46 m und 62 m hinter O2	24
Abbildung 19: Reflexionsdiagramm für den dritten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	25
Abbildung 20: Reflexionsdiagramm für den vierten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	26
Abbildung 21: Reflexionsdiagramm für den fünften Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	27
Abbildung 22: Reflexionsdiagramm für den sechsten Punkt aus Osten und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	28
Abbildung 23: Reflexionsdiagramm für den ersten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen.....	29
Abbildung 24: Reflexionsdiagramm für den zweiten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen.....	30
Abbildung 25: Reflexionsdiagramm für den dritten Punkt aus Westen und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	31
Abbildung 26: Reflexionsdiagramm für den dritten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen, soweit sie nicht von den senkrechten Modulen abgeschirmt werden.....	31
Abbildung 27: Reflexionsdiagramm für den vierten Punkt aus Westen und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	32
Abbildung 28: Reflexionsdiagramm für den vierten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen, soweit sie nicht von den senkrechten Modulen abgeschirmt werden.....	33
Abbildung 29: Reflexionsdiagramm für den fünften Punkt aus Westen und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	34
Abbildung 30: Reflexionsdiagramm für den fünften Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen.....	35

Abbildung 31: Reflexionsdiagramm für den sechsten Punkt aus Westen und die senkrecht errichteten Modulreihen.....	36
Abbildung 32: Reflexionsdiagramm für den sechsten Punkt aus Westen und die konventionell errichteten Modulreihen.....	36
Abbildung 33: Lage des Solarzauns (rote Linie) und entfallende konventionelle Tische (rot schraffiert)	40

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Menschliches Gebrauchsblickfeld (vertikal positiv ist oben, negativ unten)8