

Solarpraxis Engineering GmbH · Zinnowitzer Straße 1 · 10115 Berlin, Germany

► **Blankensee**

*Analyse der Reflexionswirkungen einer
Photovoltaikanlage*

Auftraggeber:

Wattner Projektentwicklungsgesellschaft mbH
Frau Nina Schimang
Maximinenstr. 6
50668 Köln

erstellt von:

Wolfgang Rosenthal
Solarpraxis Engineering GmbH
Zinnowitzer Straße 1
10115 Berlin Germany
Tel. 030/ 726 296-396
Fax. 030/ 726 296-360
E-Mail: Wolfgang.Rosenthal@solarpraxis.com
Internet: www.solarpraxis.com

Datum: 04.08.2017



Projektnummer: P17272/v.1



Inhalt

1	Zweck und Gegenstand des Gutachtens	4
2	Zusammenfassung der Ergebnisse	7
3	Einleitung	8
3.1	Blendung.....	8
3.2	Entstehung von Reflexionen bei Photovoltaikanlagen	11
3.3	Verwendete Azimut-Winkelangaben	12
4	Situation vor Ort	13
4.1	Die Photovoltaikanlage	13
4.1.1	Südwestliches Baufeld – Modulreihen 1 bis 29	14
4.1.2	Hauptteil des nordöstlichen Baufeldes – Modulreihen 30 bis 62a.....	15
4.1.3	Nördlichste Spitze des nordöstlichen Baufeldes – Modulreihen 63 bis 73	17
4.2	Die Bahnlinie.....	17
5	Berechnungen	18
5.1	Methodik der Berechnung	18
5.1.1	Geometrische Aspekte.....	18
5.1.2	Lichttechnische Aspekte	21
5.2	Eingrenzung potenziell relevanter Reflexionsrichtungen	22
5.2.1	Südwestliches Baufeld.....	23
5.2.2	Hauptteil nordöstliches Baufeld	24
5.2.3	Nördlichste Spitze des nordöstlichen Baufelds	26
5.3	Analyse verbleibender Blendrisiken.....	27
5.3.1	Südwestliches Baufeld.....	27
5.3.2	Hauptteil nordöstliches Baufeld	28
5.3.3	Nördlichste Spitze des nordöstlichen Baufelds	30
6	Bewertung der Ergebnisse	32
7	Verwendete Materialien.....	33

7.1	Dokumente vom Auftraggeber	33
7.2	Literatur	33
8	Abbildungsverzeichnis	34
9	Tabellenverzeichnis	36





1 Zweck und Gegenstand des Gutachtens

Es soll untersucht werden, ob von den Modulen der geplanten Photovoltaikanlage nordnordöstlich von Blankensee (Mecklenburg) an der Bahnlinie zwischen Blankensee und Cammin Sonnenlicht auf diese Bahnlinie reflektiert werden kann und ob dadurch gegebenenfalls störende Blendwirkungen auftreten können. Die Lage der Bahnlinie und der geplanten Anlage ist in Abbildung 1 zu erkennen. Die geplante Belegung ist in Abbildung 2 dokumentiert.

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.

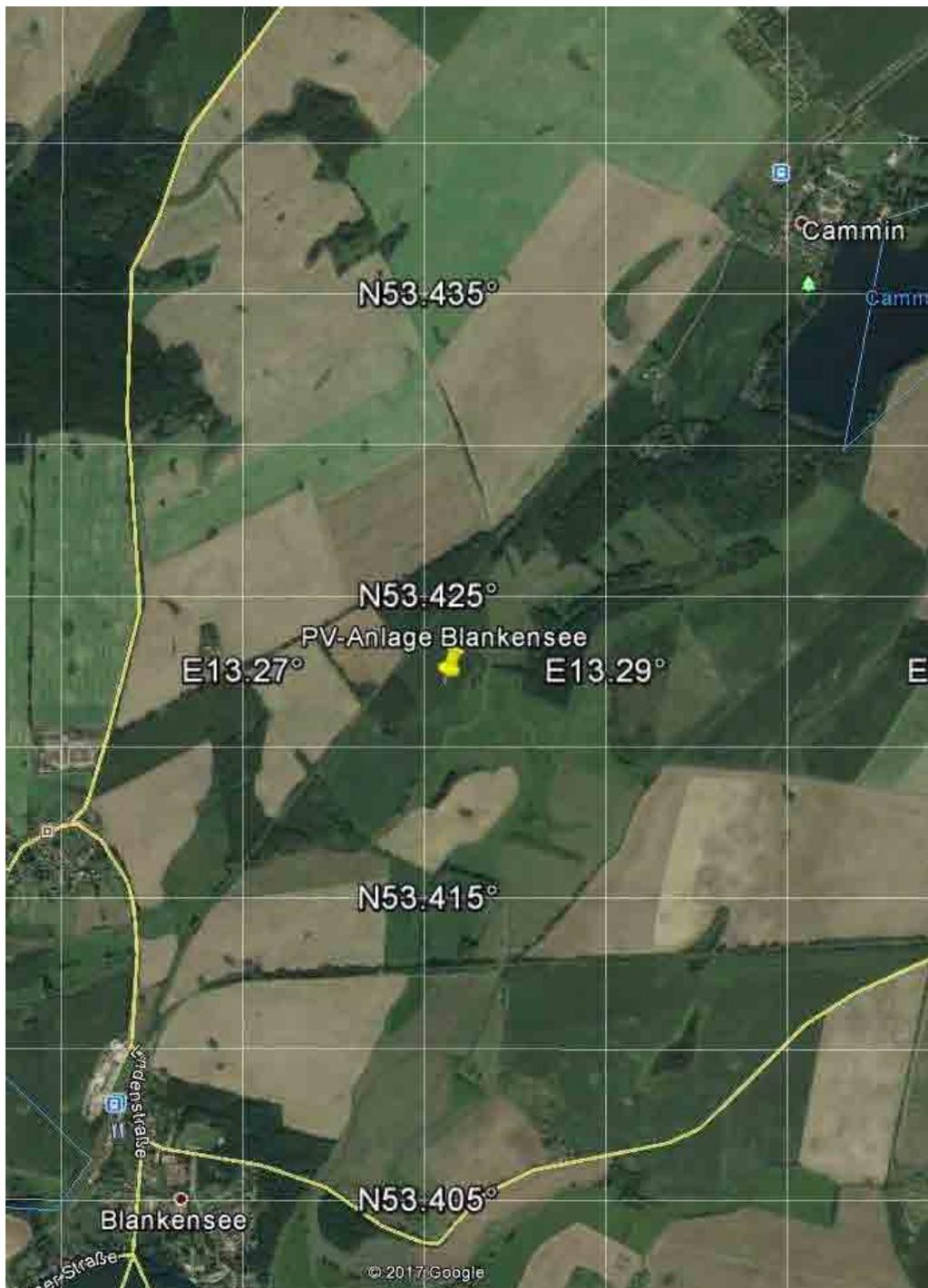


Abbildung 1: Lage der geplanten Anlage zwischen Blankensee und Cammin

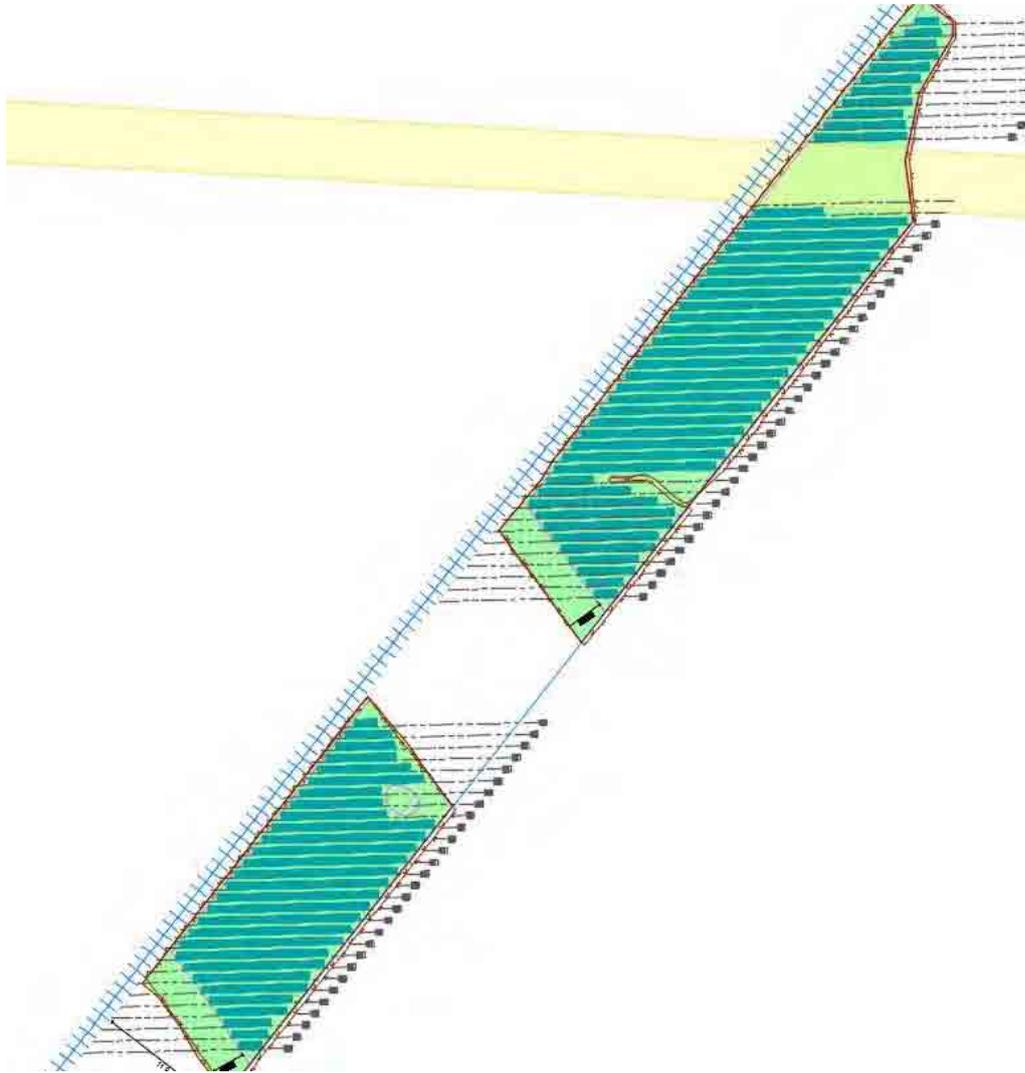


Abbildung 2: Belegungsplan der Anlage (Modultische blaugrün)



2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurde festgestellt, dass in das zentrale Blickfeld von Zugführern in Richtung Nordost keinerlei Reflexionen gerichtet sein können und mögliche Reflexionen zum Rand des maximalen Blickfeldes hin kein Blendrisiko darstellen. In das Blickfeld von Zugführern in der Gegenrichtung können gar keine Reflexionen gelangen.

Zusätzliche Blendschutzmaßnahmen sind damit nicht erforderlich.



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 B-Planes durch die Gemeinde an berechnete 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 Leuchtdichteverteilung 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 Leuchtdichteverteilungen 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 3 zeigt zwei Beispiele für Blendsituationen. Auf der Sichtachse zur Blendquelle werden Gegenstände unerkennbar.²



Abbildung 3: Gegenstände auf der Sichtachse zur Blendquelle sind nicht mehr wahrnehmbar

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.



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, 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}

³ Reidenbach u. a. 2008

⁴ Kaufmann 1986



Das maximale Gebrauchsblickfeld (im Allgemeinen hier einfach als „Blickfeld“ benannt) und das eingeschränkte für Sehaufgaben („zentrales Blickfeld“) werden in Tabelle 1 und in Abbildung 4 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	$\pm 9^\circ - \pm 10^\circ$	$+25^\circ, -35^\circ$
maximal	Blickfeld	$\pm 30^\circ$	$+30^\circ, -45^\circ$

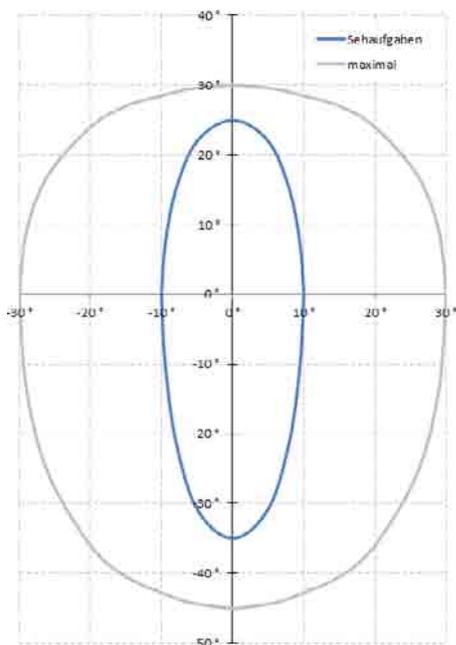


Abbildung 4: Blickfelder von Tabelle 1; der Achsenschnittpunkt $0^\circ/0^\circ$ stellt dabei einen Punkt auf der Blickachse dar, auf den die Augen fokussieren, und nicht notwendigerweise einen Punkt auf dem Horizont

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 um die Sehachse herum liegt. Die beim photopischen Sehen (Tages- oder Zapfensehen) aktivierten farbempfindlichen 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 5 verdeutlicht.

⁵ Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 2006

⁶ Fischbach u.a. 2014

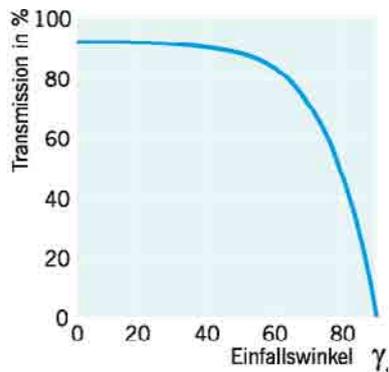


Abbildung 5: Auswirkung des Einfallswinkels auf den Transmissionsgrad für Modulgläser

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 6 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 ergebenden Azimutangaben 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 Photovoltaikanlage

Die geplante Anlage soll östlich der Bahnlinie auf zwei Baufeldteilen, einer nordöstlich eines kleinen Waldstücks und einer südwestlich davon, errichtet werden. Der nordöstliche Teil ist zusätzlich noch durch einen nicht belegten Bereich unterteilt, über dem eine Freileitung verläuft. In Abbildung 6 ist der Belegungsplan mit den Modulreihen und der Plan mit den Höhenlinien auf Google Earth Hintergrund dargestellt.

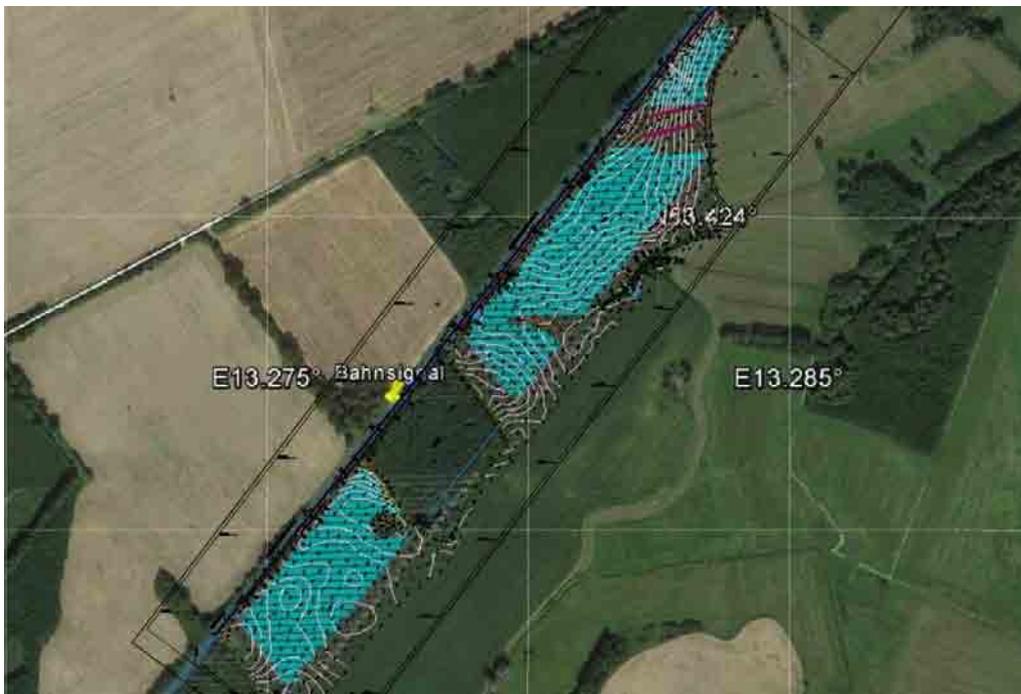


Abbildung 6: Modulreihen (hellblau) und Höhenlinien (rosa) über Google Earth Hintergrund

Um die drei Pläne in Übereinstimmung zu bringen, mussten sowohl der Plan mit den Höhenlinien als auch der Belegungsplan geringfügig gedreht werden ($+1^\circ$ bzw. $-1,4^\circ$). Die Ausrichtung von Google Earth wird als Basis für die Berechnungen verwendet, da die Darstellung an geografisch Nord orientiert ist, was für Sonnenstands- und Reflexionsberechnungen entscheidend ist. Belegungsplan und Höhenlinien basieren dagegen auf offensichtlich verschiedenen Bezugssystemen, die jeweils an einem rechtwinkligen Gitter ausgerichtet sind, das nur in der jeweiligen Bandmitte mit geografisch Nord exakt übereinstimmt.

So ergibt sich für die Modulreihen anstelle der scheinbaren Ausrichtung direkt nach Süden eine Abweichung von $-1,4^\circ$ in der Ebene.

Die Unterkante der Module soll 80 cm über dem Baugrund liegen, ihre Oberkante bei 2,58 m (s. Abbildung 7). Die Tischneigung ist auf 17° festgelegt.

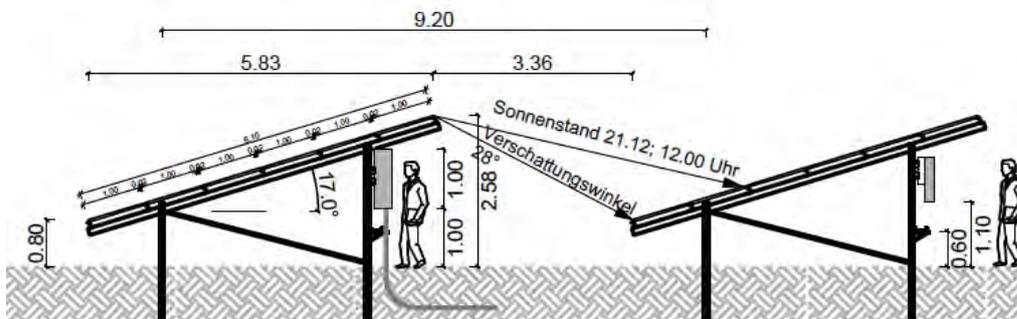


Abbildung 7: Seitlicher Schnitt der Modultische

Der Baugrund ist jedoch nicht eben, wie an den Höhenlinien zu erkennen ist. Steht ein Tisch in West-Ost-Richtung nicht eben, so ändern sich damit Ausrichtung und Neigung der jeweiligen Strahlung empfangenden und reflektierenden Ebene der auf ihm montierten Moduloberflächen. Um die sich daraus ergebenden Orientierungen zu berücksichtigen, werden zunächst maximale West-Ost-Steigungen und -Gefälle anhand der Höhenangaben bestimmt, getrennt für die drei sich ergebenden Einzelbereiche der Anlage.

4.1.1 Südwestliches Baufeld – Modulreihen 1 bis 29

Die Modulreihen sind von Süden nach Norden durchnummeriert. Das südwestliche Baufeld enthält die Reihen 1 bis 29.

In Abbildung 8 sind ausgewählte Höhenlinien zur Vermittlung eines optischen Eindrucks des Geländes hervorgehoben. An der Südspitze bei Modulreihe 1 hat das Gelände seine maximale Höhe mit 68,5 m. Zur östlichen umplanten Ecke hin liegt die Höhe bei den Reihen 23 bis 25 bei nur 65 m und steigt von dort zur Nordspitze hin auf 67,5 m an. An der Westkante zur Bahnlinie hin steigt das Gelände von 66 m bei Reihe 9 auf etwas über 67 m bei Reihe 14 und fällt dann bis Reihe 22 auf 65,5 m ab. Ab Reihe 26 steigt es dann zur Nordspitze bei Reihe 29 auf 67,5 m an. Die stärkste West-Ost-Steigung eines einzelnen Tisches beträgt 2,9° in Reihe 28. Das stärkste West-Ost-Gefälle hat der mittlere Tisch von Reihe 12 mit -2,6°.

Für die reale Ausrichtung und Neigung der reflektierenden Ebene bedeutet das eine Variationsbreite, die in Tabelle 2 dargestellt ist.

Tabelle 2: Variationsbreite der realen Ausrichtung und Neigung der reflektierenden Flächen im Südfeld

West-Ost-Richtung	Neigung	Reale Ausrichtung	Reale Neigung
Steigung maximal	+2,9°	+8,1°	17,2°
Gefälle maximal	-2,6°	-9,9°	17,2°



Bei der Berechnung der Ausrichtung ist die Abweichung von der reinen Südausrichtung um $-1,4^\circ$ bereits mitberücksichtigt.

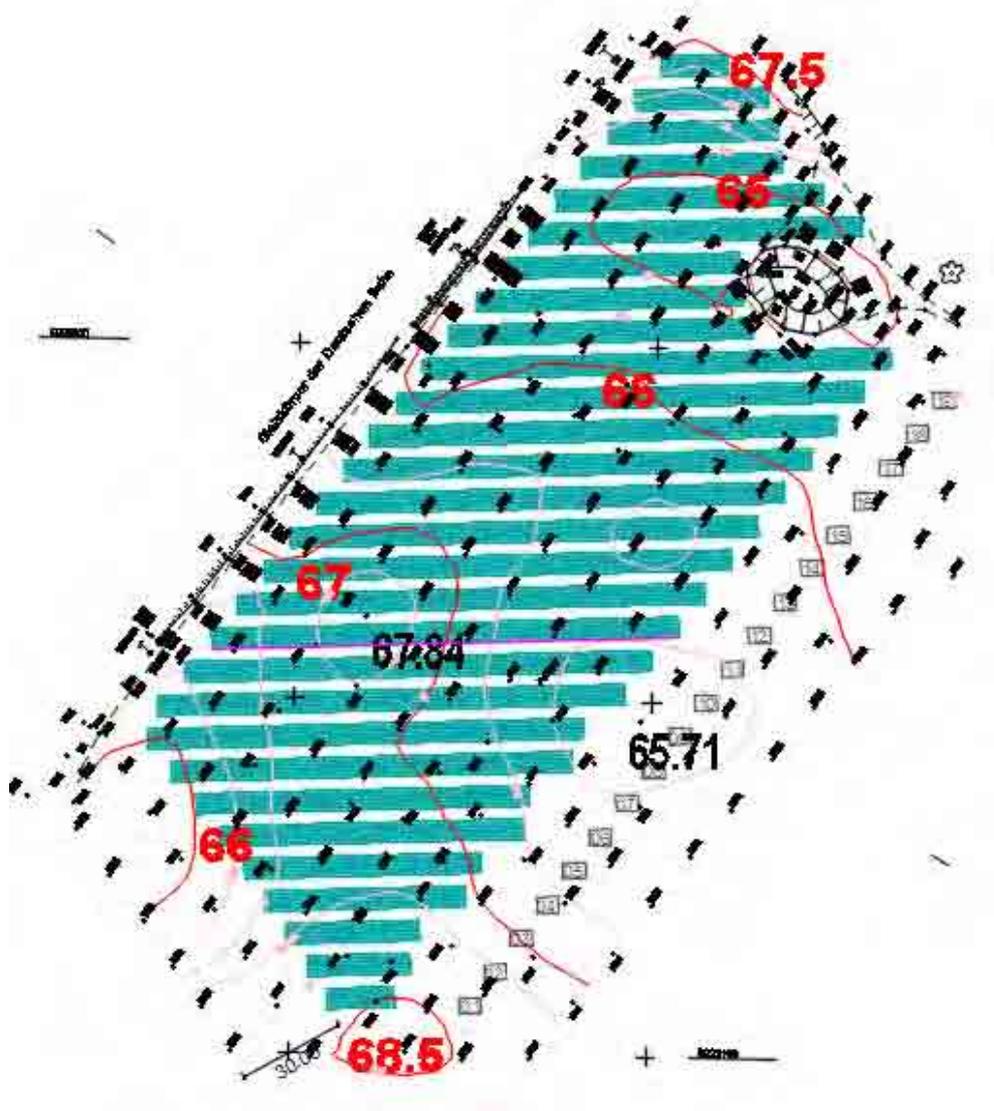


Abbildung 8: Südwestfeld mit einzelnen hervorgehobenen Höhenlinien

4.1.2 Hauptteil des nordöstlichen Baufeldes – Modulreihen 30 bis 62a⁷

Die Reihen 30 bis 62a liegen zwischen einem Wäldchen und der Freileitung.

⁷ Im Belegungsplan ist nördlich der Modulreihe 62 noch eine halbe Reihe ohne Nummer, die hier mit 62a bezeichnet werden soll



In Abbildung 9 sind ausgewählte Höhenlinien zur Vermittlung eines optischen Eindrucks des Geländes hervorgehoben.



Abbildung 9: Hauptfeld mit einzelnen hervorgehobenen Höhenlinien und Höhenpunkten

An der Südspitze bei Reihe 30 liegt die Höhe bei etwa 66,5 m. Sie fällt bis zur Ostseite von Reihe 37 fast auf 63 m ab. An der Nordspitze erreicht das Feld seine maximale Höhe von 69 m nahe an der Bahnlinie. Es herrscht nahezu überall ein mehr oder weniger starkes Gefälle von West nach Ost. Die maximale Steigung erreicht beim 2. Tisch der Reihe 46 gerade einmal 0,8°. Das stärkste Gefälle von -3,1° tritt beim 6. Tisch von links in Reihe 45 auf.

Für die reale Ausrichtung und Neigung der reflektierenden Ebene bedeutet das eine Variationsbreite, die in Tabelle 3 dargestellt ist.



Tabelle 3: Variationsbreite der realen Ausrichtung und Neigung der reflektierenden Flächen im Hauptfeld

West-Ost-Richtung	Neigung	Reale Ausrichtung	Reale Neigung
Steigung maximal	+0,8°	+1,1°	17,0°
Gefälle maximal	-3,1°	-11,4°	17,2°

4.1.3 Nördlichste Spitze des nordöstlichen Baufeldes – Modulreihen 63 bis 73

Nördlich der Freileitung herrscht ausschließlich Gefälle in West-Ost-Richtung. Vom westlichen Ende der Reihe 63 (Höhe fast 69 m) fällt das Gelände entlang der Bahnlinie nach Norden auf etwas über 64 m ab und die Reihe 63 selbst fällt nach Osten hin auf 63,5 m ab.

Der mittlere Tisch von Reihe 65 erreicht das maximale Gefälle des Hanges mit -6,3°. Das flachste Gefälle liegt beim östlichsten Tisch von Reihe 63 vor mit -1,9°.

Tabelle 4: Variationsbreite der realen Ausrichtung und Neigung der reflektierenden Flächen nördlich der Freileitung

West-Ost-Richtung	Neigung	Reale Ausrichtung	Reale Neigung
Gefälle minimal	-1,9°	-7,4°	17,1°
Gefälle maximal	-6,3°	-21,3°	18,0°

4.2 Die Bahnlinie

Vom Gleiskörper der Bahn liegen ebenfalls vermessene Höhen vor. Im gesamten Bereich neben dem südwestlichen Teilfeld beträgt die Höhe 67 m. Im Bereich des nordöstlichen Teilfeldes steigt die Höhe etwas an bis auf 68,5 m an der nördlichsten Spitze der Anlage. Etwa in der Mitte des kleinen Wäldchens zwischen den beiden Teilfeder befindet sich ein Bahnsignal an der Westseite der Bahnlinie.



5 Berechnungen

5.1 Methodik der Berechnung

5.1.1 Geometrische Aspekte

Zunächst wird eine Aufstellung mit sämtlichen Sonneneinfallswinkeln im Jahresverlauf am Standort Blankensee (geografische Länge 13,28°, Breite 53,42°) in 6-minütiger Auflösung für 12 Tage im Jahr erstellt (jeweils der 21. jeden Monats)⁸ und die sich daraus ergebenden Reflexionsrichtungen werden bestimmt. Jedem Einfallswinkel des Sonnenlichts entspricht nach dem Reflexionsgesetz bei ideal gerichteter Reflexion („Einfallswinkel = Ausfallswinkel“) genau ein Ausfallswinkel reflektierter Strahlung bei gegebener reflektierender Ebene. Die danach physikalisch möglichen Reflexionsrichtungen lassen sich wiederum anschaulich in einem Diagramm darstellen, das über dem Horizont, aus Sicht eines beliebigen Reflexions- oder potenziellen Blendpunktes heraus, alle möglichen Reflexionsrichtungen durch die Koordinaten Azimut- und Höhenwinkel beschreibt (siehe Abbildung 10). Mögliche Abweichungen der realen Reflexionen von den ideal gerichteten (durch Bündelauflerung oder Versatz) werden im Rahmen der Einzelberechnungen und -bewertungen bei Bedarf durch Sicherheitszuschläge abgeschätzt.

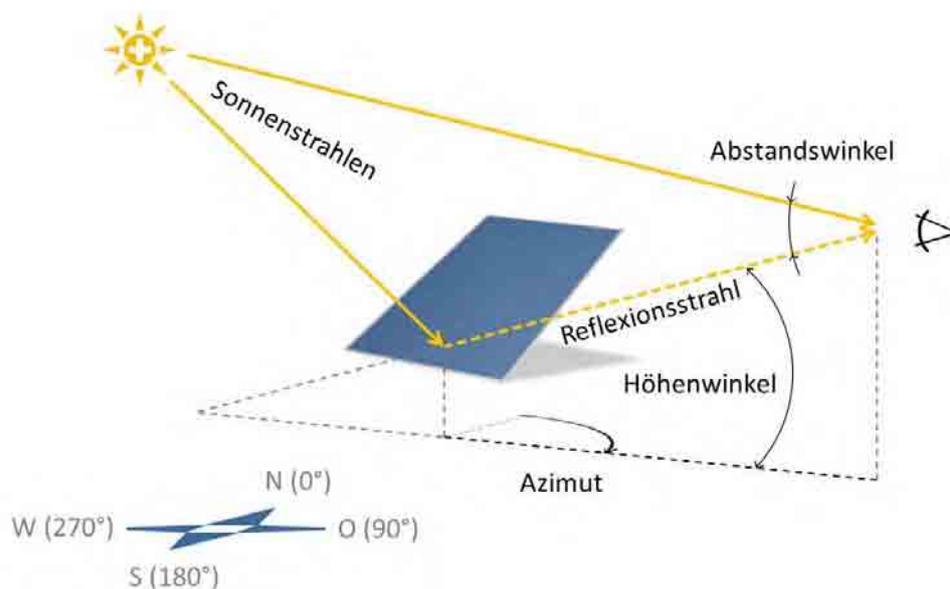


Abbildung 10: Darstellung des Reflexionsstrahls anhand von Azimut und Höhenwinkel wie im Reflexionsdiagramm verwendet und Beschreibung des Abstandswinkels zwischen Blickrichtungen zur Sonne und zum Blendpunkt

⁸ Berechnung nach Eicker 2001



Ebenfalls in Abbildung 10 ist der Abstandswinkel zwischen den Blickrichtungen zur Sonne und zum Blendpunkt beschrieben.

Für einen beliebigen Punkt der mit $-1,4^\circ$ fast südlich ausgerichteten Module mit 17° Neigung ergibt sich so bei waagrecht stehendem Tisch das in Abbildung 11 dokumentierte Reflexionsdiagramm.

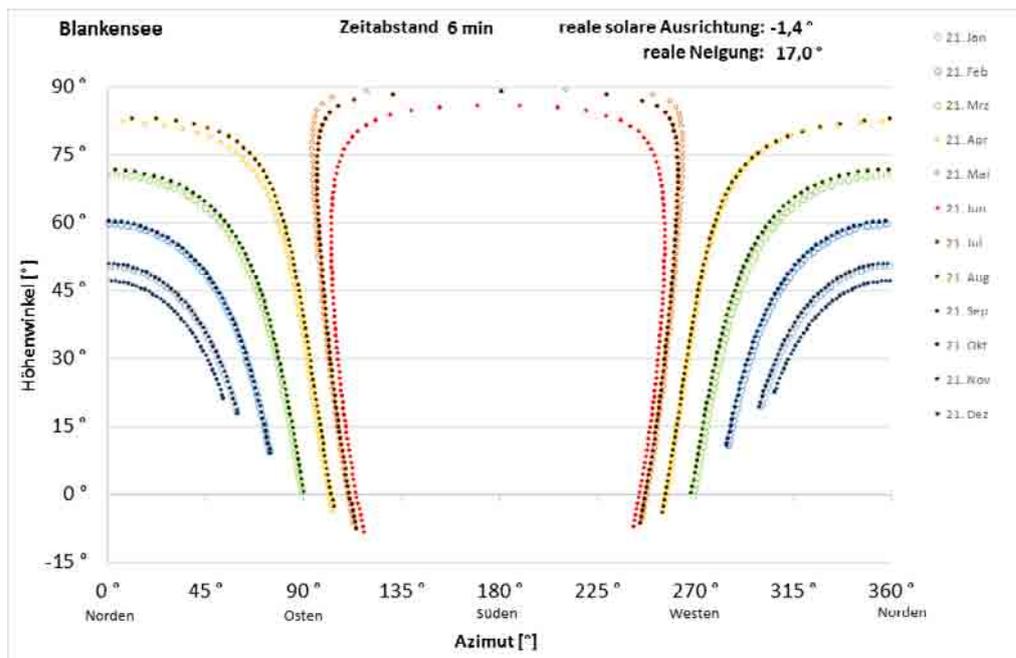


Abbildung 11: Reflexionsdiagramm aus Sicht eines beliebigen potenziellen Blendpunktes eines waagrecht stehenden Tisches, ausgerichtet mit $-1,4^\circ$ und einer Neigung von 17° am Standort der Anlage; waagrecht aufgetragen sind die Azimutwinkel von Norden (0°) über Osten (90°), Süden (180°) nach Westen (270°), senkrecht die Höhenwinkel

Vorliegend ergibt sich aber eine recht große Variationsbreite für die hangbedingte Abweichung der realen Orientierung der reflektierenden Ebene, wie in Abschnitt 4.1 dargelegt wurde. Nachfolgend werden deshalb hier zwei Reflexionsdiagramme für die größte Steigung in West-Ost-Richtung (Abbildung 12) sowie für das maximale Gefälle (Abbildung 13) dargestellt, die im Bereich der gesamten Anlage auftreten.

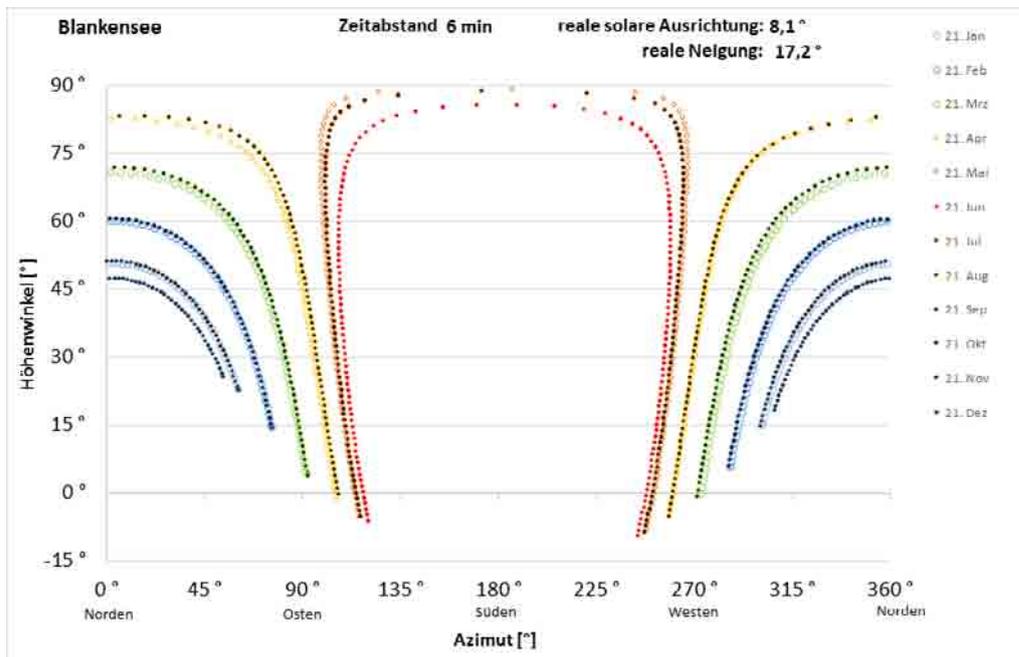


Abbildung 12: Reflexionsdiagramm für maximale Steigung in West-Ost-Richtung

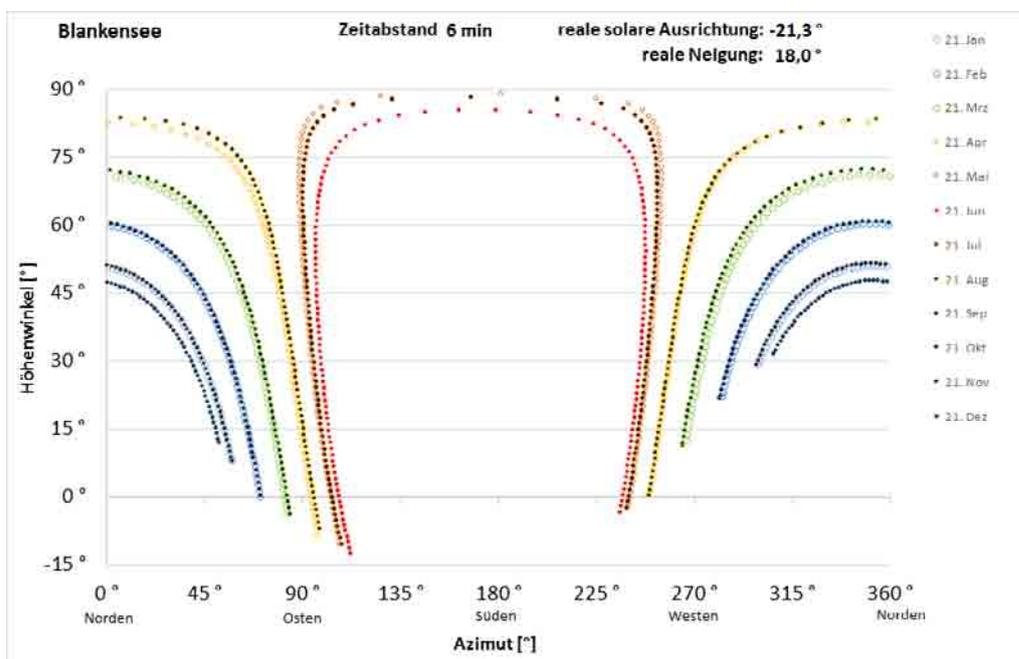


Abbildung 13: Reflexionsdiagramm für maximales Gefälle in West-Ost-Richtung

Liegt ein Blickpunkt innerhalb des betroffenen Bereichs (d.h. zwischen den Kurven für den 21. Juni und den 21. Dezember oder darüber) im Reflexionsdiagramm, so kann anhand des Diagramms die Dauer und Jahreszeit potenzieller Reflexionen abgeschätzt werden (der Abstand zwischen zwei



Markierungspunkten eines Tages entspricht 6 Minuten). Sofern es auf konkrete Uhr- und Jahreszeiten oder die jeweilige Dauer potenzieller Reflexion ankommt, erlauben die Datentabellen eine noch genauere Ermittlung.

Wenn die genauere tägliche Einwirkdauer oder jährliche Aufsummierung der Einwirkdauer gewünscht ist, kann für einen definierten Zeitraum und Azimutbereich unter Annahme einer punktförmigen Sonne in einer minütlichen Auflösung ein sogenannter „Blendkalender“ erstellt werden.

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 oder hier um Zugführer in hohen oder niedrigen Zügen.

Abbildung 14 verdeutlicht dies skizzenhaft: Maximale Höhenwinkel ergeben sich von niedrigsten Modulkanten zu höchstmöglichen Fahreraugen in großen LKW und minimale Höhenwinkel von obersten Modulkanten 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. Für Zugführer werden die Augenhöhen zwischen 2 und 4 m über Gleis angesetzt.

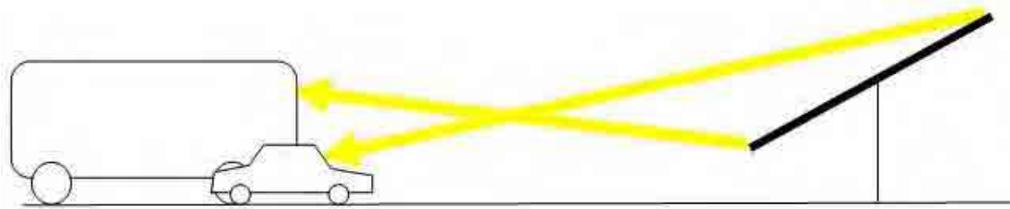


Abbildung 14: Beispiel für Bandbreite möglicher Höhenwinkel

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

Wie in Abschnitt 3.1 ausgeführt ist für eine Entscheidung, ob reflektiertes Sonnenlicht eine potenzielle Verkehrsgefährdung darstellen kann oder nicht, das Verhältnis der Beleuchtungsstärke am Auge durch Sonnenlichtreflexionen der zu prüfenden Anlage einerseits und der Beleuchtungsstärke durch direktes, gestreutes oder diffus an der Umgebung reflektiertes Licht andererseits wesentlich.

Zur Abschätzung der Beleuchtungsstärken ist zunächst der Sonnenhöhenwinkel zu Zeitpunkten möglicher Betroffenheit durch Anlagenreflexionen zu bestimmen, 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.



5.2 Eingrenzung potenziell relevanter Reflexionsrichtungen

Wie in Abschnitt 3.1 dargelegt, können Reflexionen außerhalb des Blickfeldes 30° rechts oder links der Blickachse zu keinerlei Blendrisiken führen und sehr kritisch sind nur Reflexionen innerhalb des zentralen Blickfeldes (10° neben der Blickachse), besonders sehr nahe der Blickachse ($\pm 5^\circ$). Die Bahnlinie weist im gesamten relevanten Bereich für Zugführer aus Südwesten eine einheitliche Azimutrichtung von $37,9^\circ$ auf. Aus Nordost kommende Zugführer blicken nur auf die Rückseiten der Module, solange sich diese vor ihnen in ihrem Blickfeld befinden. Da das Signal auf dieser Seite steht, kann es auch nicht aufgrund von Blendung übersehen werden.

Aus dieser Blickrichtung von $37,9^\circ$ kann abgeleitet werden, dass das zentrale Blickfeld bis $47,9^\circ$ reicht und das maximale bis $67,9^\circ$. Blendrelevante Reflexionen müssen entgegengerichtet sein. Ins zentrale Blickfeld können also nur Reflexionen mit mindestens $227,9^\circ$ gerichtet sein, ins maximale Blickfeld können auch Reflexionen bis zu $247,9^\circ$ reichen. Darüber hinaus besteht von vornherein kein Blendrisiko.

Weiterhin können Bereiche relevanter Höhenwinkel eingegrenzt werden. Maximale positive Höhenwinkel treten bei minimaler Entfernung und maximalem Höhenunterschied auf, minimale negative Höhenwinkel ergeben sich bei minimaler Entfernung aus betragsmäßig größten negativen Höhenunterschieden.

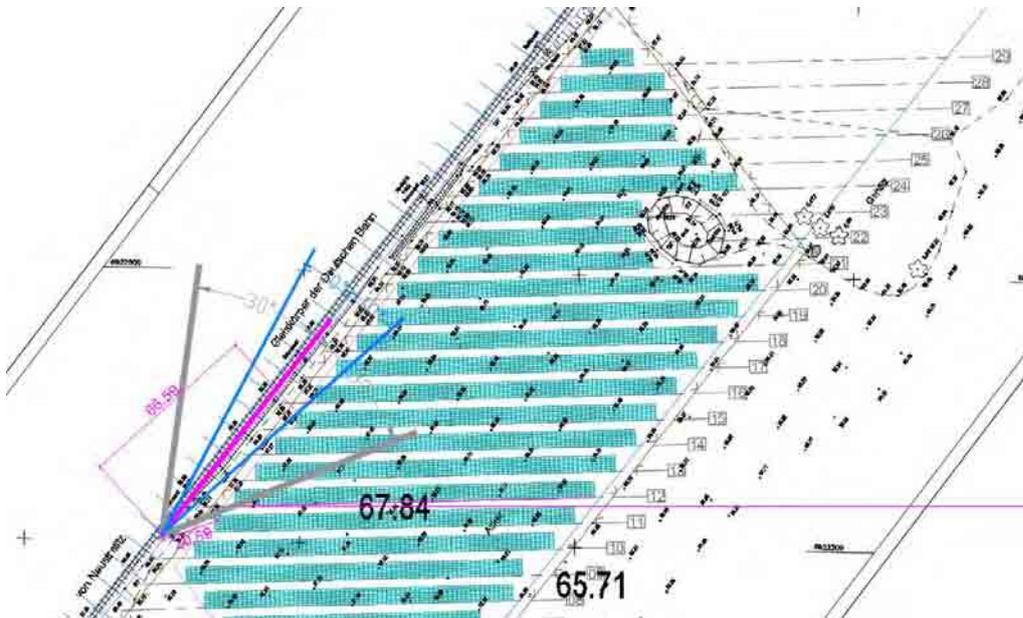


Abbildung 15: Blickfelder eines von Südwest kommenden Zugführers, maximal 30° (grau abgegrenzt) rechts und links der Blickachse (lila) und zentral (blau abgegrenzt) 10° um Blickachse, ergeben Mindestabstände zu Modulen von 20,59 bzw. 66,59 m

Der minimale Abstand zwischen Zugführer und nächstgelegenen Modulen entlang des äußersten Randes des Blickfeldes 30° rechts der Bahnlinie beträgt etwa 20 m, für das zentrale Blickfeld 10° rechts der Blickachse ergeben sich 66 m (s. Abbildung 15).



Wegen der unterschiedlichen Höhenlagen und Geländeoberflächen in den drei Teilfeldern werden diese im Folgenden getrennt untersucht.

5.2.1 Südwestliches Baufeld

Die Höhendifferenz von untersten Modulkanten (0,8 m über Gelände; niedrigste Geländehöhe neben dem Gleis 65,5 m, ergibt 66,3 m) zu Augen von Zugführern in größten Triebwagen (4 m über Gleishöhe von 67 m ergibt 71 m) beträgt 4,7 m. Mit den oben genannten jeweiligen minimalen Entfernungen errechnet sich ein maximaler Höhenwinkel von $13,2^\circ$ am Rand des maximalen Blickfeldes und von $4,1^\circ$ am Rand des zentralen. Negative Höhenwinkel können sich von höchstgelegenen Moduloberkanten (maximale Geländehöhe nahe der Bahnlinie 67,5 m plus Moduloberkante 2,6 m, ergibt 70,1 m) zu niedrigsten Zugführeraugen (67 m Gleishöhe plus 2 m Augenhöhe über Gleis, ergibt 69 m) mit nicht weniger als $-1,1$ m ergeben, was zu minimalen Höhenwinkeln von $-3,1^\circ$ (Blickfeldrand) bzw. $-1,1^\circ$ (Rand des zentralen Blickfelds) führt.

Werden diese kritischen Bereiche ins Reflexionsdiagramm eingezeichnet, ist zu erkennen, ob derartige Reflexionen auftreten können.

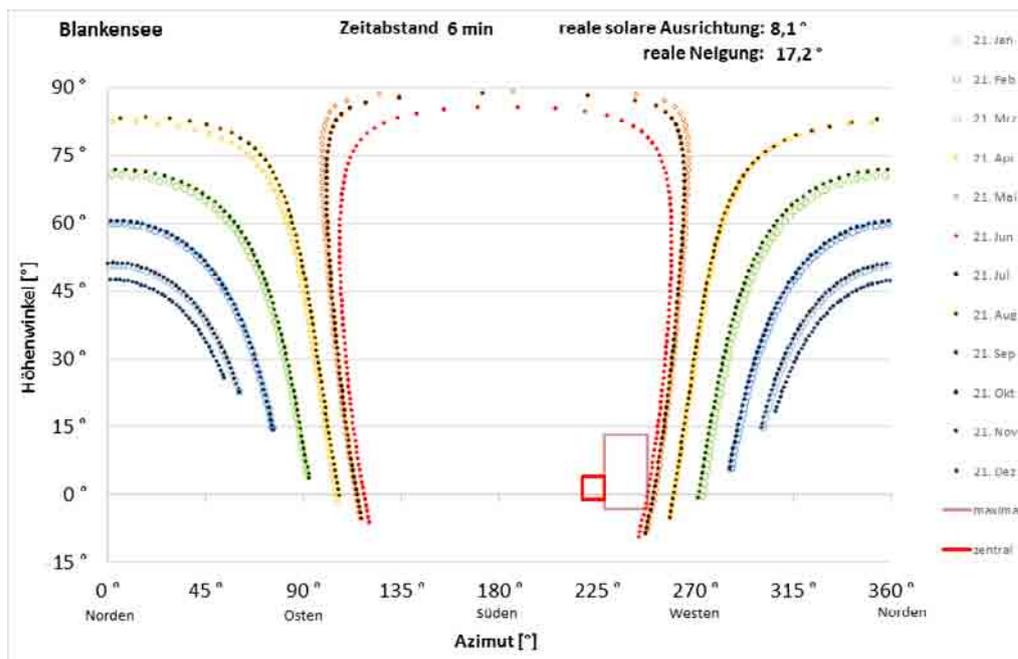


Abbildung 16: Kritische Bereiche für maximales (rosa) und zentrales (rot) Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximale West-Ost-Steigung eines Modultisches

Für Module mit maximaler West-Ost-Steigung, die zu einer realen Ausrichtung der reflektierenden Ebene von $8,1^\circ$ führt, zeigt Abbildung 16, dass das zentrale Blickfeld unter keinen Umständen betroffen sein kann und das maximale allenfalls am äußersten Rand mit negativen Höhenwinkeln.

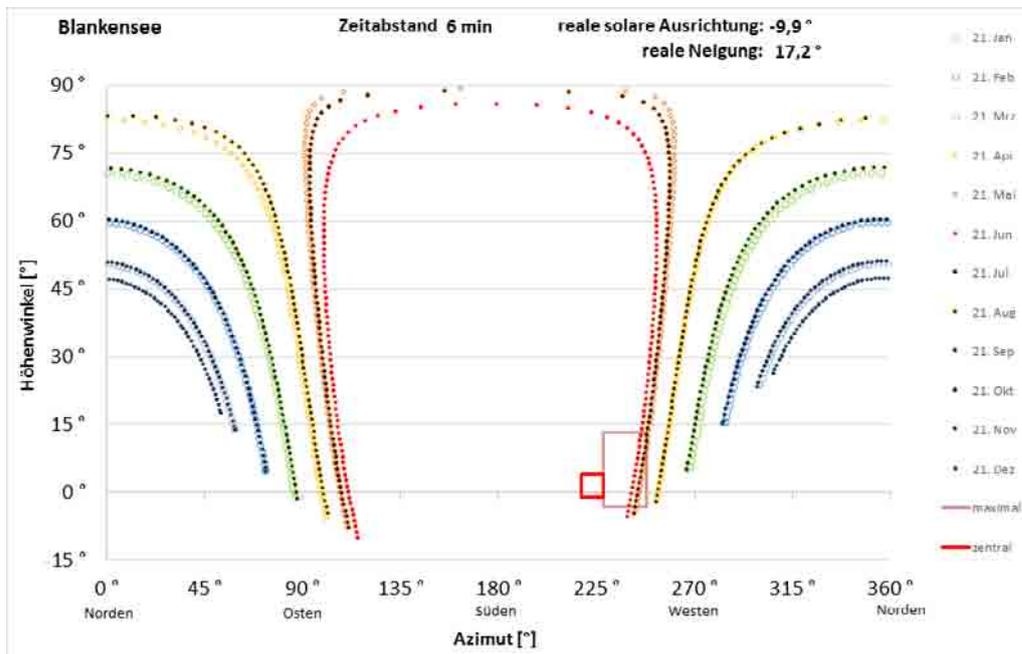


Abbildung 17: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximales West-Ost-Gefälle eines Modultisches

Für Module mit maximalem West-Ost-Gefälle, das zu einer realen Ausrichtung der reflektierenden Ebene von $-9,9^\circ$ führt, zeigt Abbildung 17, dass das zentrale Blickfeld ebenso wenig betroffen sein kann und das maximale nur am äußeren Rand.

5.2.2 Hauptteil nordöstliches Baufeld

Die Höhendifferenz von untersten Modulkanten (0,8 m plus niedrigste Geländehöhe neben dem Gleis in diesem Bereich 64,5 m, ergibt 65,3 m) zu Augen von Zugführern in größten Triebwagen (4 m über Gleishöhe von 67 m im Bereich der niedrigsten Baufeldhöhen ergibt 71 m) beträgt 5,7 m. Mit den oben genannten jeweiligen minimalen Entfernungen errechnet sich ein maximaler Höhenwinkel von $15,9^\circ$ am Rand des maximalen Blickfeldes und von $4,9^\circ$ am Rand des zentralen. Negative Höhenwinkel können sich von höchstgelegenen Moduloberkanten (maximale Geländehöhe nahe der Bahnlinie 69 m plus Moduloberkante 2,6 m, ergibt 71,6 m) zu niedrigsten Zugführeräugen (67 m Gleishöhe plus 2 m Augenhöhe über Gleis, ergibt 69 m) mit nicht weniger als $-2,6$ m ergeben, was zu minimalen Höhenwinkeln von $-7,4^\circ$ (Blickfeldrand) bzw. $-2,3^\circ$ (Rand des zentralen Blickfelds) führt.

Werden diese kritischen Bereiche in die Reflexionsdiagramme für die Extremwerte der West-Ost-Neigungen von Tischen im Hauptfeld eingezeichnet, ergeben sich Abbildung 18 und Abbildung 19.

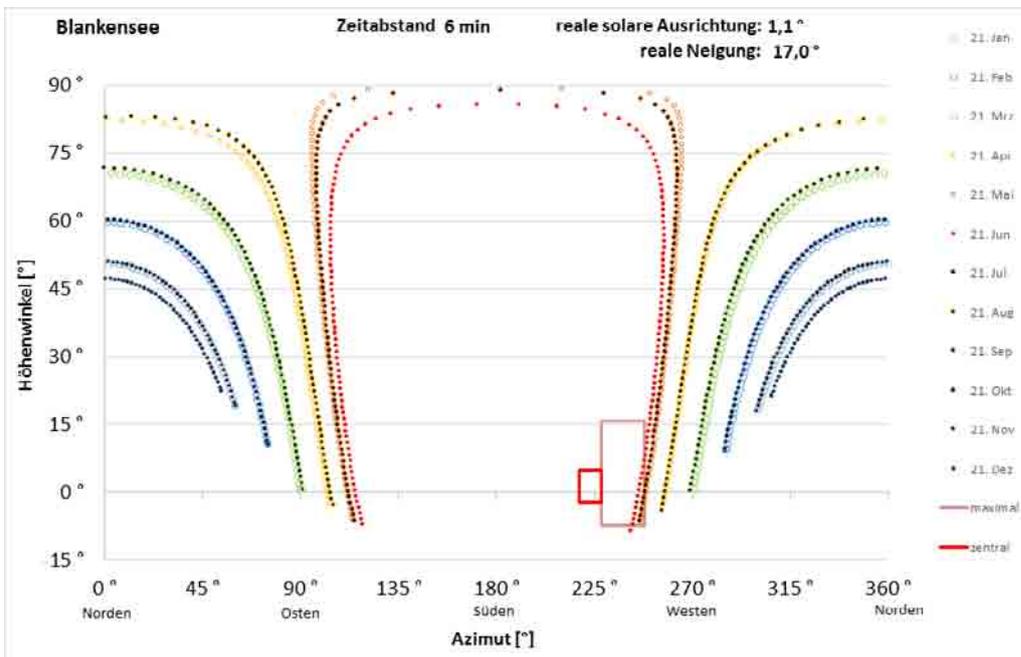


Abbildung 18: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximale West-Ost-Steigung eines Modultisches im Hauptfeld

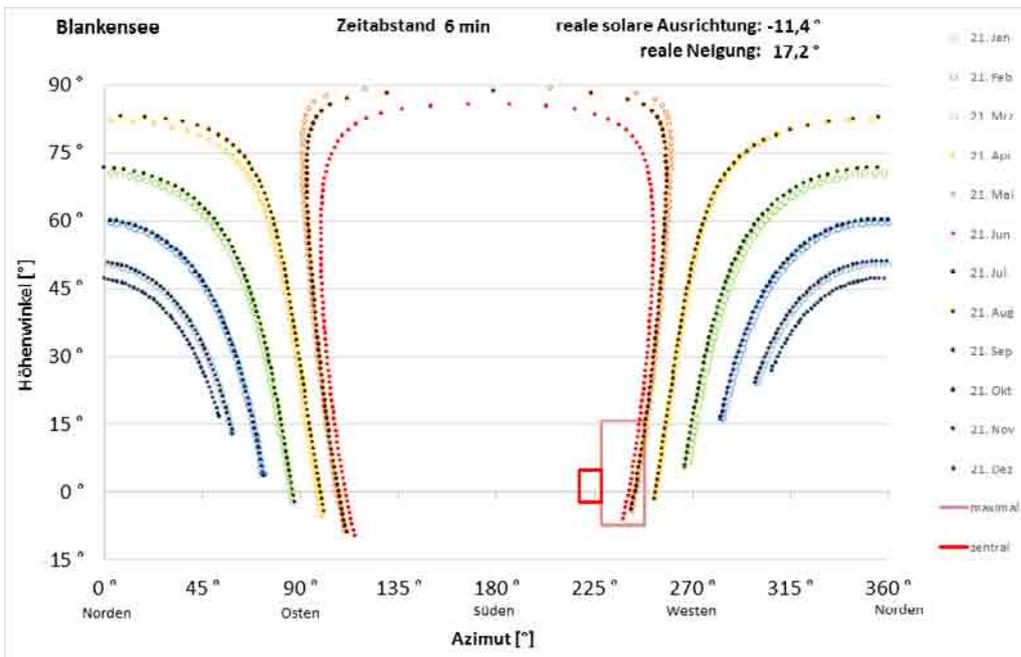


Abbildung 19: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximales West-Ost-Gefälle eines Modultisches im Hauptfeld



Ähnlich wie für den Bereich des südwestlichen Feldes kann festgestellt werden, dass das zentrale Blickfeld unter keinen Umständen betroffen sein kann und das maximale nur zu seinem Rand hin.

5.2.3 Nördlichste Spitze des nordöstlichen Baufelds

Die Höhendifferenz von untersten Modulkanten (0,8 m plus niedrigste Geländehöhe direkt neben dem Gleis in diesem Bereich 66,5 m, ergibt 67,3 m) zu Augen von Zugführern in größten Triebwagen (4 m über Gleishöhe von 68 m im Bereich noch möglicher Betroffenheit ergibt 72 m) beträgt 4,7 m. Mit den oben genannten jeweiligen minimalen Entfernungen errechnet sich ein maximaler Höhenwinkel von $13,2^\circ$ am Rand des maximalen Blickfeldes und von $4,1^\circ$ am Rand des zentralen. Negative Höhenwinkel können sich von höchstgelegenen Moduloberkanten (maximale Geländehöhe nahe der Bahnlinie 69 m plus Moduloberkante 2,6 m, ergibt 71,6 m) zu niedrigsten Zugführeraugen (67,8 m Gleishöhe plus 2 m Augenhöhe über Gleis, ergibt 69,8 m) mit nicht weniger als -1,8 m ergeben, was zu minimalen Höhenwinkeln von $-5,1^\circ$ (Blickfeldrand) bzw. $-1,6^\circ$ (Rand des zentralen Blickfelds) führt.

Werden diese kritischen Bereiche in die Reflexionsdiagramme für minimales und maximales Gefälle der Modultische in West-Ost-Richtung eingetragen, ergeben sich Abbildung 20 und Abbildung 21.

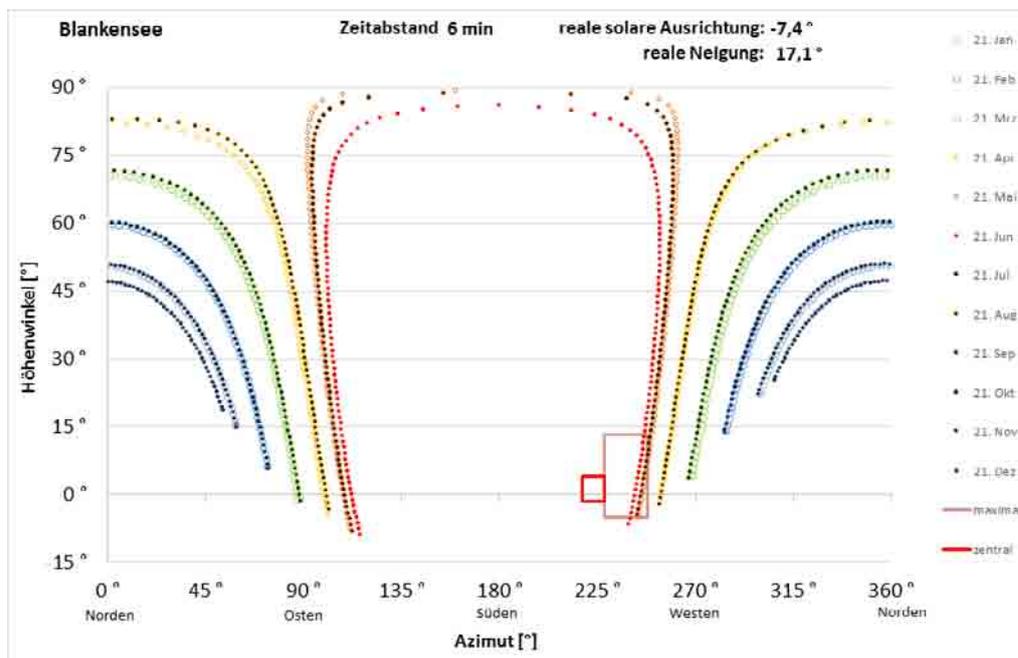


Abbildung 20: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für minimales West-Ost-Gefälle eines Modultisches der Nordspitze

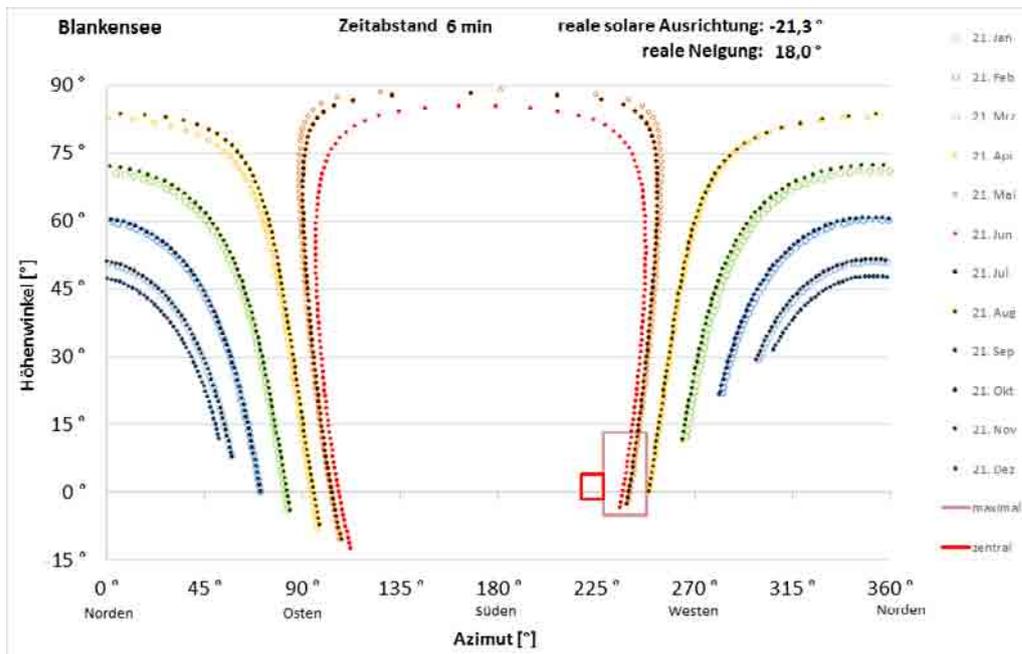


Abbildung 21: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximales West-Ost-Gefälle eines Modultisches der Nordspitze

Auch hier ist das zentrale Blickfeld nie betroffen. Für den Randbereich des maximalen Blickfeldes sind aber Reflexionen aufgrund dieser ersten groben Betrachtung noch nicht auszuschließen.

5.3 Analyse verbleibender Blendrisiken

Nachdem geklärt ist, dass das zentrale Blickfeld in keinem der Fälle von Reflexionen betroffen sein kann, wird im Folgenden untersucht, ob potenzielle Reflexionen im maximalen Blickfeld aufgrund ihrer Größe und Intensität ein Risiko darstellen können.

5.3.1 Südwestliches Baufeld

Wie sich aus den Diagrammen in Abbildung 16 und Abbildung 17 ergibt, reichen sommerliche Reflexionen am weitesten in das Blickfeld hinein. Als Abstand von der Blickachse ergibt sich minimal für stärkstes West-Ost-Gefälle 22° . In Abbildung 22 sind für ausgewählte Punkte auf der Bahnlinie Bereiche von 22 bis 30° (Blickfeldgrenze) eingetragen.

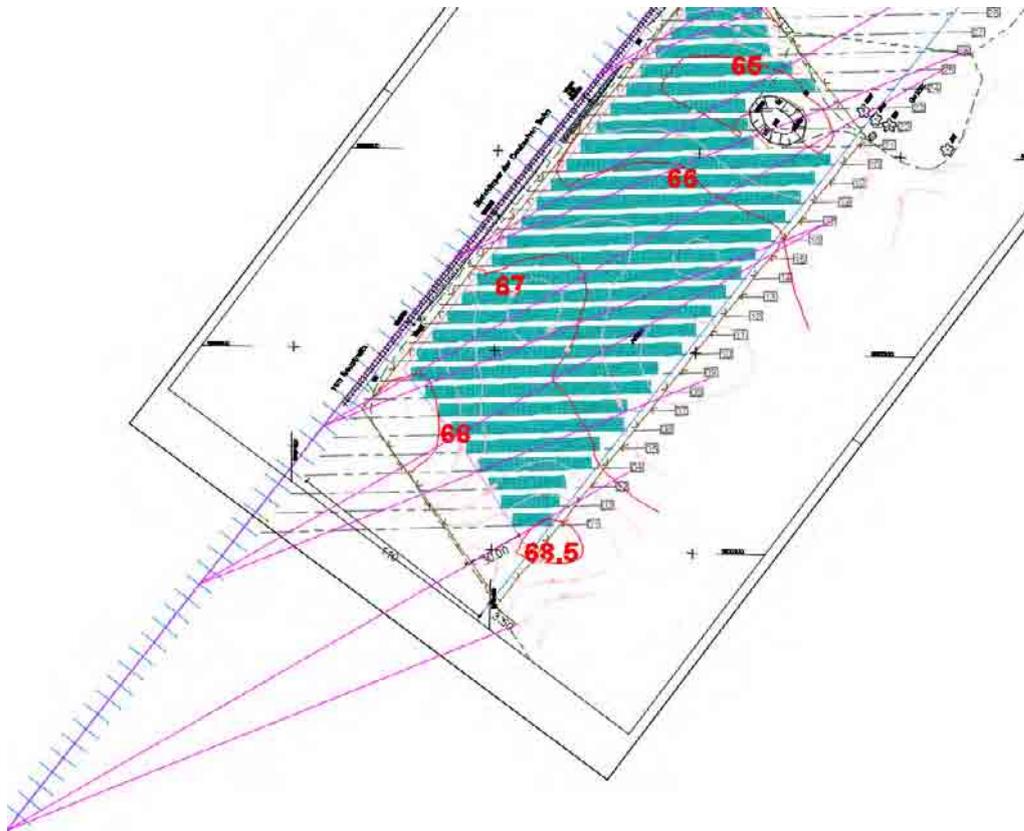


Abbildung 22: Zu untersuchende Winkelbereiche zwischen 22 und 30° rechts der Blickachse (lila abgegrenzt) an 5 exemplarisch gewählten Bahnpunkten

Am südlichsten der 5 Punkte beginnt eine theoretisch mögliche Betroffenheit durch sommerliche Reflexionen von Tischen mit starkem Gefälle. Bis zur Höhenlinie von 67 m liegt aber hauptsächlich west-östlicher Tischanstieg vor.

Bei der weiteren Fahrt nach Nordost variieren Steigung und Gefälle der Tische im untersuchten Winkelbereich immer wieder in unterschiedlicher Art, so dass nicht mit einem einheitlich ausgeprägten Reflexionsbild über den gesamten Sichtbereich zu einem gegebenen Moment zu rechnen ist. Gegen Ende des Südwestfeldes treten am ehesten ähnliche Tischsteigungen im untersuchten Winkelsegment auf, aber hier nimmt die Anzahl der überblickten Modulreihen schon stark ab, so dass auch hier nicht mit großflächiger und intensiver Reflexion zu rechnen ist. Obendrein treten dort nur über eine kurze Strecke von etwa 40 m ähnliche Verhältnisse auf und diese Strecke ist in recht kurzer Zeit (unter 5 Sekunden) durchfahren.

5.3.2 Hauptteil nordöstliches Baufeld

Als Abstand von der Blickachse ergibt sich minimal für stärkstes West-Ost-Gefälle 20,4°. In Abbildung 23 sind diese Winkelbereiche an vier exemplarisch gewählten Punkten hinter dem abschirmenden Wäldchen angezeigt.

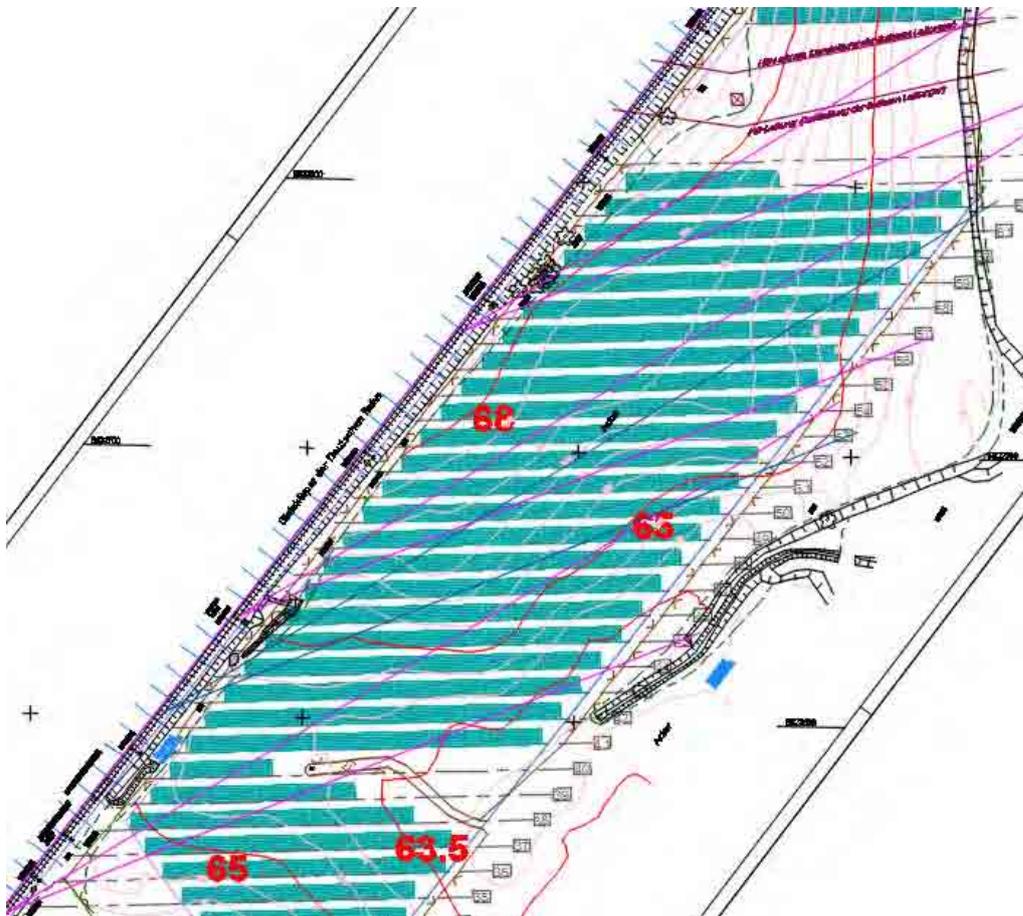


Abbildung 23: Zu untersuchende Winkelbereiche zwischen 20,4 und 30° rechts der Blickachse (lila bzw. blaugrün abgegrenzt) an 4 exemplarisch gewählten Bahnpunkten

Direkt hinter dem Wäldchen ist in dem markierten Blickkegel noch eine recht große Variation von Tischneigungen sowie ein kleiner Teil ohne Tische. Hier ist entsprechend nicht mit ausgeprägten Reflexionsfeldern im Blickfeld zu einem gegebenen Moment zu rechnen. Für den blaugrün eingezeichneten Kegel in Abbildung 23 werden die Reflexionsverhältnisse anhand eines Reflexionsdiagramms genauer analysiert.

Das Diagramm in Abbildung 24 zeigt, dass von Mai bis Juli in den Morgenstunden, konkret vor 7 Uhr Sommerzeit, mit Reflexionen gerechnet werden muss, die einen nicht unerheblichen Höhenwinkel von bis zu 10° im Blickfeld einnehmen können. Sie können zu Beleuchtungsstärken am Auge von Zugführern von bis zu 1.600 lx führen, allerdings nur dann, wenn die Sonne selbst bestrahlte Objekte bereits mit 27.000 lx beleuchtet. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass keineswegs alle Modultische im relevanten Bereich tatsächlich das maximale Gefälle aufweisen und weniger stark geneigte Tische nicht bis zu 20,4° an die Blickachse heran reflektieren können.

Für eine kurze Strecke nördlich des detailliert betrachteten Blickpunktes gelten noch ähnliche Bedingungen, danach verringert sich der Höhenwinkel im Blickfeld bereits wieder, da im Bereich der Freileitung keine Modultische installiert werden.

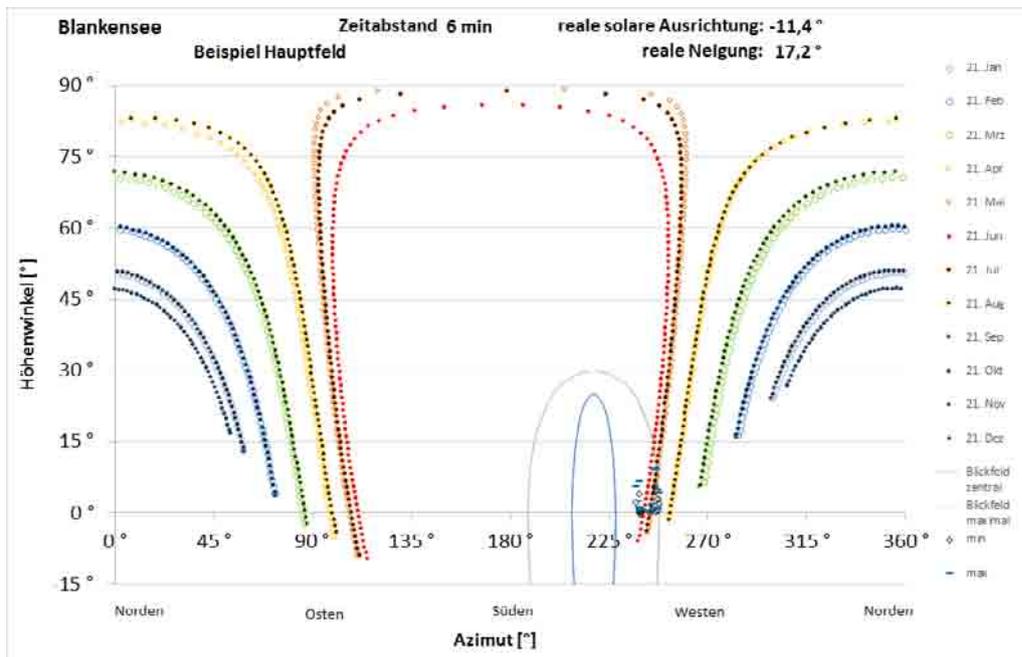


Abbildung 24: Reflexionsdiagramm für den exemplarisch gewählten Punkt auf der Bahnlinie (blaugrün markierter Bereich in Abbildung 22) und Tische mit stärkstem West-Ost-Gefälle als worst-case

5.3.3 Nördlichste Spitze des nordöstlichen Baufelds

Für die folgende Strecke von etwa 200 m treten noch etwas andere Reflexionsverhältnisse auf, da hier ein großer Teil der Modultische eine starke West-Ost-Neigung aufweist, was zu möglichen Reflexionen bis zu 17,7° neben der Blickachse führt. Zusätzlich nimmt der Höhenabstand vom ansteigenden Bahndamm zum etwas abfallenden Gelände der geplanten Anlage zu. Andererseits sind hier die Modulreihen kürzer.

Zur Klärung, welche Auswirkungen aus diesen Unterschieden folgen, wird ein Blickkegel exemplarisch untersucht, der einen großen Teil des nördlichen Restfeldes überstreicht. Seine Lage ist in Abbildung 25 dokumentiert.

Das sich ergebende Reflexionsdiagramm in Abbildung 26 zeigt, dass der Höhenwinkel im Blickfeld deutlich geringer ist als im vorher untersuchten Fall. Berechnungen zur Beleuchtungsstärke durch mögliche Reflexionen ergeben auch geringere Werte (unter 1.000 lx).



Abbildung 25: Exemplarisch untersuchter Blickkegel für das Nordfeld (lila abgegrenzt)

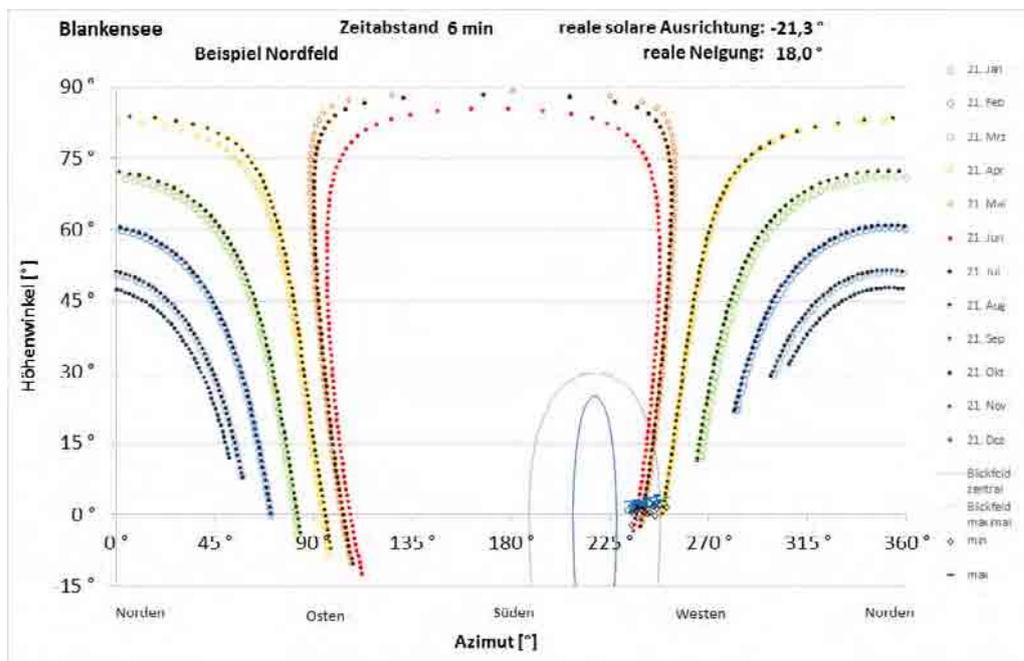


Abbildung 26: Reflexionsdiagramm für den exemplarisch gewählten Punkt auf der Bahnlinie am Ende des Freileitungsbereichs und Tische mit stärkstem West-Ost-Gefälle als worst-case



6 Bewertung der Ergebnisse

Es wurde festgestellt, dass Reflexionen der geplanten Anlage für die Fahrtrichtung Südwest einschließlich des für diese Fahrtrichtung geltenden Signals keinerlei Probleme darstellen können und das zentrale Blickfeld von Zugführern, 10° seitlich der Blickachse, in der Gegenrichtung über die gesamte Strecke hinweg frei von möglichen Reflexionen ist.

Für die Fahrtrichtung Nordost wurde aber auch festgestellt, dass im Blickfeld 30° seitlich der Blickachse in den Sommermonaten etwa bis 7 Uhr Sommerzeit Reflexionen auftreten können, allerdings stets mit einem Mindestabstand von der Blickachse von mindestens 17°.

Diese der Blickachse nächstgelegenen Reflexionen treten nur im Bereich nördlich der Freileitung auf und können maximal knapp 1.000 lx Beleuchtungsstärke am Auge von Zugführern erzeugen bei gleichzeitiger Beleuchtungsstärke der Sonne an senkrecht bestrahlten Objekten von 21.000 lx. Im Bereich südlich der Freileitung treten mit bis zu 1.600 lx etwas höhere Beleuchtungsstärken am Auge von Zugführern auf bei gleichzeitiger Beleuchtungsstärke der Sonne von 27.000 lx. Diese Reflexionen können einen Höhenwinkel im Blickfeld von bis zu 10° einnehmen. Dabei ist der geringst mögliche Abstand zur Blickachse aber 20,4°.

Die mögliche Größe der Reflexionsbilder im Blickfeld könnte bei plötzlichem Auftreten nach Durchfahren einer eher schattigen Strecke dazu verleiten, in die Reflexionen direkt hinein zu blicken, was die Adaptationsfähigkeit der Augen überschreiten könnte. Vorliegend ist aber zur Linken von der Bahnlinie freies Feld, so dass die Augen von Zugführern an die Umgebungshelligkeit voll adaptiert sind. Angesichts dieser Gegebenheiten und der nicht besonders hohen Beleuchtungsintensität durch die Reflexionen wird hier kein Blendrisiko bestehen.

Im Bereich des südwestlichen Feldes ist der Abstand von der Blickachse mit 22° noch größer und die sehr uneinheitliche Geländeoberfläche, der die Tischneigungen folgen, lässt kein einheitliches größeres und intensiveres Reflexionsbild zu.

Nach diesen Feststellungen kann gefolgert werden, dass zusätzliche Blendschutzmaßnahmen nicht erforderlich sind.



7 Verwendete Materialien

7.1 Dokumente vom Auftraggeber

- ▶ Belegungsplan als Datei 170504AW_Blankensee_Belegung_Export.dwg
- ▶ Belegungsplan mit Tischzeichnung der Fa. HANS solar GmbH, Blumenstraße 80, 01307 Dresden vom 5.1.2017 als Datei 170105AW_Blankensee_Belegung 1.pdf
- ▶ Lageplan mit vermessenen Höhen des Baugrunds und der Bahnlinie als Datei 170101_Blankensee_Bestandsplan_V1.dwg
- ▶ Standort des Bahnsignals als kmz-Datei

7.2 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



8 *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 1: Lage der geplanten Anlage zwischen Blankensee und Cammin	5
Abbildung 2: Belegungsplan der Anlage (Modultische blaugrün)	6
Abbildung 3: Gegenstände auf der Sichtachse zur Blendquelle sind nicht mehr wahrnehmbar.....	8
Abbildung 4: 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	10
Abbildung 5: Auswirkung des Einfallwinkels auf den Transmissionsgrad für Modulgläser.....	12
Abbildung 6: Modulreihen (hellblau) und Höhenlinien (rosa) über Google Earth Hintergrund	13
Abbildung 7: Seitlicher Schnitt der Modultische	14
Abbildung 8: Südwestfeld mit einzelnen hervorgehobenen Höhenlinien.....	15
Abbildung 9: Hauptfeld mit einzelnen hervorgehobenen Höhenlinien und Höhenpunkten.....	16
Abbildung 10: Darstellung des Reflexionsstrahls anhand von Azimut und Höhenwinkel wie im Reflexionsdiagramm verwendet und Beschreibung des Abstandswinkels zwischen Blickrichtungen zur Sonne und zum Blendpunkt.....	18
Abbildung 11: Reflexionsdiagramm aus Sicht eines beliebigen potenziellen Blendpunktes eines waagrecht stehenden Tisches, ausgerichtet mit $-1,4^{\circ}$ und einer Neigung von 17° am Standort der Anlage; waagrecht aufgetragen sind die Azimutwinkel von Norden (0°) über Osten (90°), Süden (180°) nach Westen (270°), senkrecht die Höhenwinkel	19
Abbildung 12: Reflexionsdiagramm für maximale Steigung in West-Ost-Richtung	20
Abbildung 13: Reflexionsdiagramm für maximales Gefälle in West-Ost-Richtung.....	20
Abbildung 14: Beispiel für Bandbreite möglicher Höhenwinkel	21
Abbildung 15: Blickfelder eines von Südwest kommenden Zugführers, maximal 30° (grau abgegrenzt) rechts und links der Blickachse (lila) und zentral (blau abgegrenzt) 10° um Blickachse, ergeben Mindestabstände zu Modulen von 20,59 bzw. 66,59 m	22
Abbildung 16: Kritische Bereiche für maximales (rosa) und zentrales (rot) Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximale West-Ost-Steigung eines Modultisches.....	23
Abbildung 17: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximales West-Ost-Gefälle eines Modultisches.....	24
Abbildung 18: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximale West-Ost-Steigung eines Modultisches im Hauptfeld	25



Abbildung 19: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximales West-Ost-Gefälle eines Modultisches im Hauptfeld	25
Abbildung 20: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für minimales West-Ost-Gefälle eines Modultisches der Nordspitze	26
Abbildung 21: Kritische Bereiche für maximales und zentrales Blickfeld im Reflexionsdiagramm für maximales West-Ost-Gefälle eines Modultisches der Nordspitze	27
Abbildung 22: Zu untersuchende Winkelbereiche zwischen 22 und 30° rechts der Blickachse (lila abgegrenzt) an 5 exemplarisch gewählten Bahnpunkten	28
Abbildung 23: Zu untersuchende Winkelbereiche zwischen 20,4 und 30° rechts der Blickachse (lila bzw. blaugrün abgegrenzt) an 4 exemplarisch gewählten Bahnpunkten	29
Abbildung 24: Reflexionsdiagramm für den exemplarisch gewählten Punkt auf der Bahnlinie (blaugrün markierter Bereich in Abbildung 22) und Tische mit stärkstem West-Ost-Gefälle als worst-case	30
Abbildung 25: Exemplarisch untersuchter Blickkegel für das Nordfeld (lila abgegrenzt).....	31
Abbildung 26: Reflexionsdiagramm für den exemplarisch gewählten Punkt auf der Bahnlinie am Ende des Freileitungsbereichs und Tische mit stärkstem West-Ost-Gefälle als worst-case.....	31



9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Menschliches Gebrauchsblickfeld (vertikal positiv ist oben, negativ unten)	10
Tabelle 2: Variationsbreite der realen Ausrichtung und Neigung der reflektierenden Flächen im Südfeld	14
Tabelle 3: Variationsbreite der realen Ausrichtung und Neigung der reflektierenden Flächen im Hauptfeld	17
Tabelle 4: Variationsbreite der realen Ausrichtung und Neigung der reflektierenden Flächen nördlich der Freileitung	17