SOLARPRAXIS
engineering

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

Bliesdorf

Analyse der Reflexionswirkungen einer Photovoltaikanlage

Auftraggeber:
HDS Schilling GmbH
Herr Tilo Schilling
Henriettenstraße 8
09112 Chemnitz

erstellt von:
Wolfgang Rosenthal
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: 19.03.2019

Projektnummer: P19088/v.1

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 ... 9

3.3 Verwendete Azimut-Winkelangaben ... 10

4 Situation vor Ort ... 11

4.1 Die Photovoltaikanlage ... 11

4.2 Die Bahnlinie zwischen Wrietzen und Neutrebbin ... 12

4.2.1 Hinweiszeichen für Züge aus Osten ... 12

4.2.2 Hinweiszeichen für Züge aus Westen ... 13

5 Berechnungen ... 14

5.1 Methodik der Berechnung ... 14

5.1.1 Geometrische Aspekte ... 14

5.1.2 Lichttechnische Aspekte ... 16

5.2 Von Osten kommende Züge ... 16

5.2.1 Punkt 1 von Osten ... 17

5.2.2 Punkte 2 und 3 von Osten ... 19

5.2.3 Punkt 4 von Osten ... 19

5.2.4 Punkte 5 bis 7 von Osten ... 20

5.2.5 Bedeutung für die Erkennbarkeit der Hinweisschilder ... 20

5.3 Von Westen kommende Züge ... 21

5.3.1 Punkt 1 von Westen ... 21

5.3.2 Punkt 2 von Westen ... 23

5.3.3 Punkt 3 von Westen ... 24

5.3.4 Punkt 4 von Westen ... 24

5.3.5 Punkt 5 von Westen ... 25

5.3.6 Punkt 6 aus Westen 26

5.3.7 Bedeutung für die Erkennbarkeit der Hinweisschilder und des Signals 27

6 Bewertung der Ergebnisse 28

7 Verwendete Materialien 30

7.1 Dokumente vom Auftraggeber 30

7.2 Literatur 30

8 Abbildungsverzeichnis 31

9 Tabellenverzeichnis 33

1 Zweck und Gegenstand des Gutachtens

Es soll untersucht werden, ob von den Modulen der geplanten Photovoltaikanlage bei Bliesdorf, zu beiden Seiten der Bahnlinie zwischen Wrietzen und Neutrebbin, Sonnenlicht auf die Bahnlinie reflektiert werden kann und ob dadurch gegebenenfalls störende Blendwirkungen auftreten können. Die Lage der geplanten Anlage sowie der Bahnlinie 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, Fotos und Pläne und unter Zuhilfenahme von Google Earth Pro.

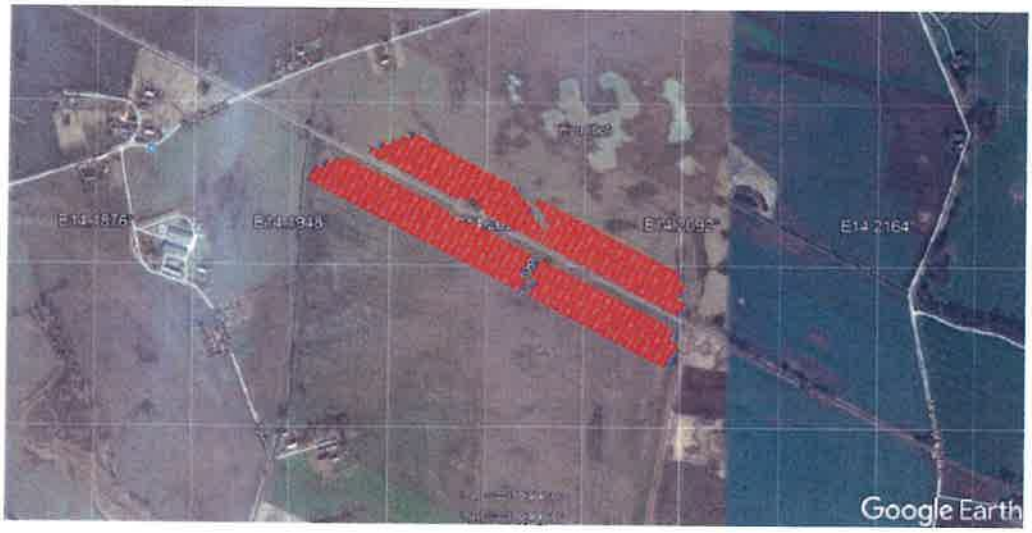

Abbildung 1: Lage der geplanten Anlage (rot) und der Bahnlinie zwischen den Teilfeldern

2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wird festgestellt, dass auftretende Reflexionen zu keinem Zeitpunkt im Jahr die Sehleistung beeinträchtigen können.

Die Erkennbarkeit der Hinweisschilder und Signale wird ebenfalls nicht durch Reflexionen beeinträchtigt.

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 berechtigte 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 $1{,}6 \cdot 10^6$ cd/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]

Abbildung 2: 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°/-40° 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 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	±9° – ±10°	+25°, –35°
maximal	Blickfeld	±30°	+30°, –45°

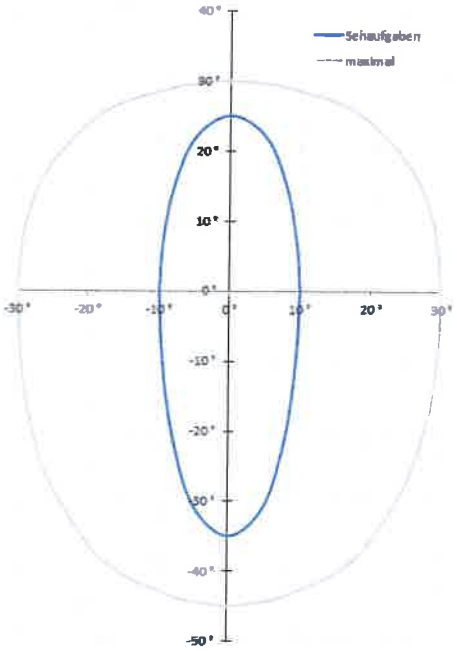

Abbildung 3: Blickfelder von Tabelle 1; der Achsenschnittpunkt 0°/0° stellt dabei einen Punkt auf der Blickachse dar, auf den die Augen fokussieren, und nicht notwendigerweise einen Punkt auf dem Horizont

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 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 ±5° neben der Blickachse als höchst kritisch und derjenige von ±10° als kritisch angesehen (zentrales Blickfeld). Wahrnehmbare Reflexionen außerhalb von ±30° werden hier als physiologisch unerheblich bewertet. Zwischen ±10° und ±30° 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 eingestrahlten 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

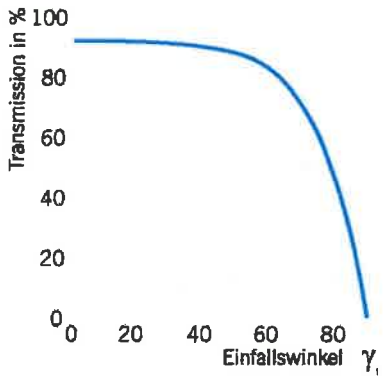

Abbildung 4: Auswirkung des Einfallwinkels auf den Transmissionsgrad für Modulgläser

Die Transmission ist bei senkrechtem Einfall auf die Modulebene (0°) am größten. Mit zunehmendem Einfallwinkel 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 $6 \cdot 10^6$ cd/m² beträgt und um die Mittagszeit $1{,}5 \cdot 10^9$ cd/m² erreicht, muss aber auch bei den niedrigen Reflexionsgraden von Solarmodulen mit dem Eintritt von Absolutblendung (>10^5 cd/m²) bei Beobachtern gerechnet werden.

3.3 Verwendete Azimut-Winkelangaben

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

Da die Berechnungsmethode zur Bestimmung der Reflexionen jedoch aus der Geodäsie entnommen worden ist und dort allgemein vom Norden (=0°) 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

Es werden je 11 Modulreihen nordöstlich und südwestlich parallel zur Bahnlinie errichtet, wie der Belegungsplan in Abbildung 5 zeigt. Daraus ergibt sich eine solare Ausrichtung von 27°. Das Gelände ist nahezu eben, über die gesamte Feldlänge von fast einem Kilometer variieren die vermessenen Höhen lediglich zwischen 3,8 m und 4,6 m ü. NN.

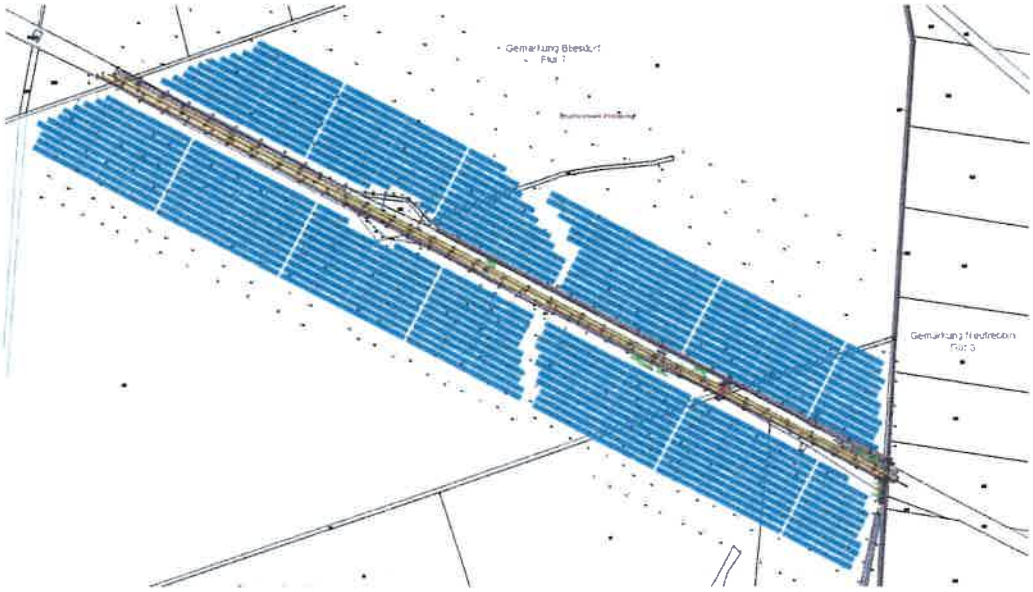

Abbildung 5: Lage der Modultischreihen (blau)

Die Tischneigung wird 17° betragen, die Unterkante der Tische liegt 80 cm über dem Boden und die Oberkante erreicht 2,58 m (s. Abbildung 6).

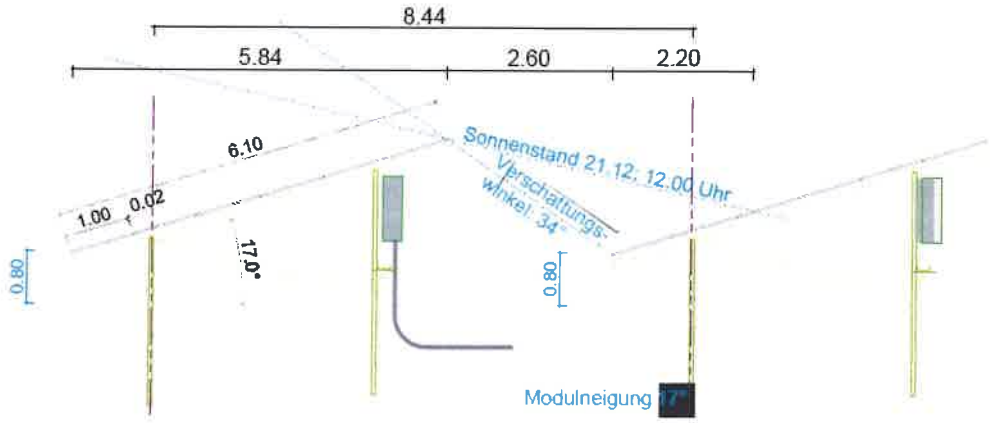

Abbildung 6: Seitlicher Schnitt durch die Tischreihen

4.2 Die Bahnlinie zwischen Wrietzen und Neutrebbin

Die zwischen den Teilfeldern verlaufende Bahnlinie verläuft gerade von Ost-Südost nach West-Nordwest. Die vermessene Gleishöhe liegt am östlichen Ende des Solarparks bei 5,4 m ü. NN und am westlichen Ende bei 5,57 m ü. NN.

4.2.1 Hinweiszeichen für Züge aus Osten

Entlang der Strecke nach Wrietzen befinden sich Hinweiszeichen auf Brücken in etwa 2,4 m über Gleishöhe am Beginn des Solarparks und etwa 100 m hinter dem Solarpark ein Brückenhinweis kombiniert mit Pfeifgebot etwa 2 m über der Gleishöhe (Abbildung 7).

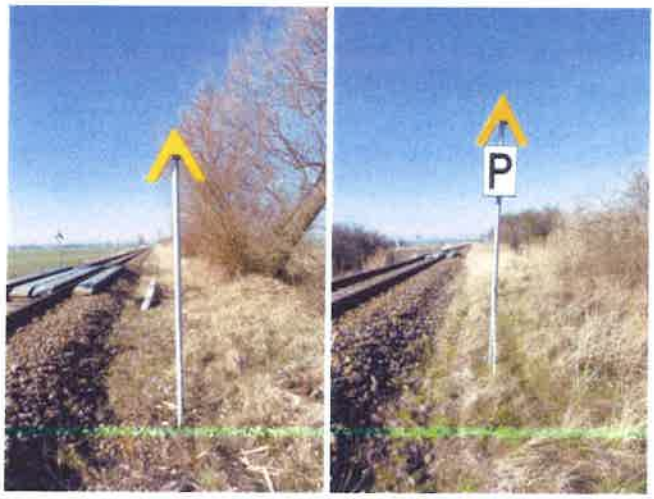

Abbildung 7: Hinweiszeichen auf Brücken entlang der Strecke nach Wrietzen; links zu Beginn des Solarparks, rechts in Kombination mit Gebotszeichen zum Pfeifen etwa 100 m hinter dem Solarpark

4.2.2 Hinweiszeichen für Züge aus Westen

Entlang der Strecke nach Neutrebbin befinden sich zwei Hinweise auf Brücken (Abbildung 8) etwa 120 m vor Beginn des Solarparks in einer Höhe von 2,2 m über Gleishöhe und am Ende des Solarparks in einer Höhe von 2,1 m über Gleishöhe.

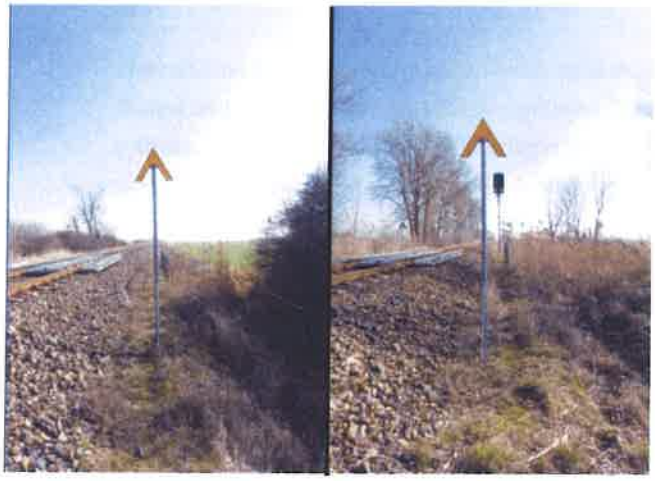

Abbildung 8: Hinweiszeichen auf Brücken entlang der Strecke nach Neutrebbin; links etwa 120 m vor dem Beginn des Solarparks, rechts am Ende des Solarparks

Etwa 150 m vor den letzten Modultischen in dieser Fahrtrichtung befindet sich der Einschaltkontakt für die Bahnübergangssicherung mit dem zugehörigen Merkpfahl (0,9 m bis 2,1 m über Gleishöhe) und hinter den letzten Modulen das Kontrollsignal für die Bahnübergangssicherung (Abbildung 9) in 4,5 m Höhe über Gleishöhe.

Abbildung 9: Merkpfahl für Einschaltkontakt des kommenden gesicherten Bahnübergangs links, folgendes Kontrollsignal für Bahnübergangssicherung rechts

5 Berechnungen

5.1 Methodik der Berechnung

5.1.1 Geometrische Aspekte

Zunächst wird eine Aufstellung mit sämtlichen Sonneneinfallswinkeln im Jahresverlauf am Standort Bliesdorf (geografische Länge 14,2°, Breite 52,7°) in 6-minütiger Auflösung für 12 Tage im Jahr erstellt (jeweils der 21. jeden Monats)[7] 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 Bündelaufweitung oder Versatz) werden im Rahmen der Einzelberechnungen und -bewertungen bei Bedarf durch Sicherheitszuschläge abgeschätzt.

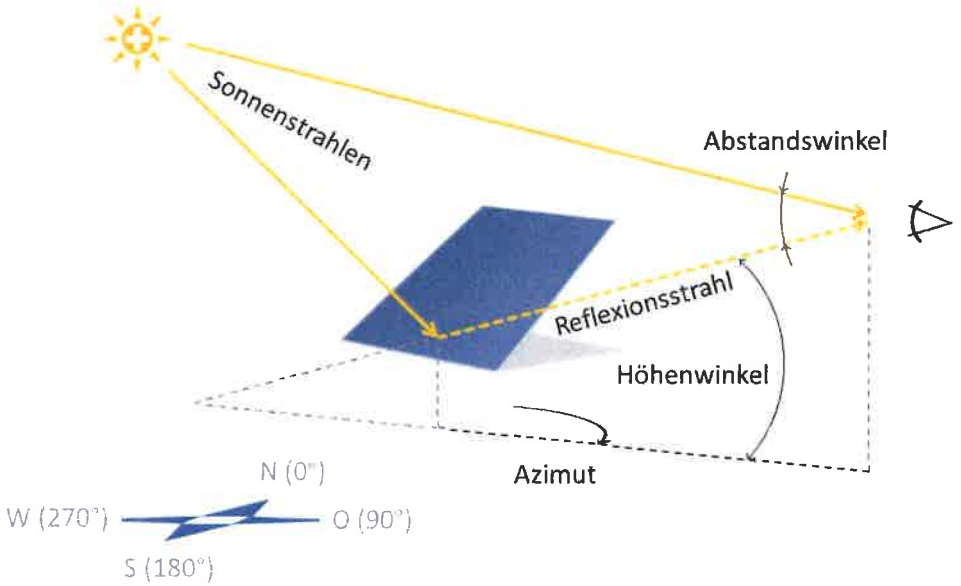

Abbildung 10: Darstellung des Reflexionsstrahls anhand von Azimut und Höhenwinkel wie im Reflexionsdiagramm verwendet und Beschreibung des Abstandswinkels zwischen Blickrichtungen zur Sonne und zum Blendpunkt

[7] 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 27° nach Süd-Südwest ausgerichteten Module mit 17° Neigung ergibt sich so das in Abbildung 11 dokumentierte Reflexionsdiagramm.

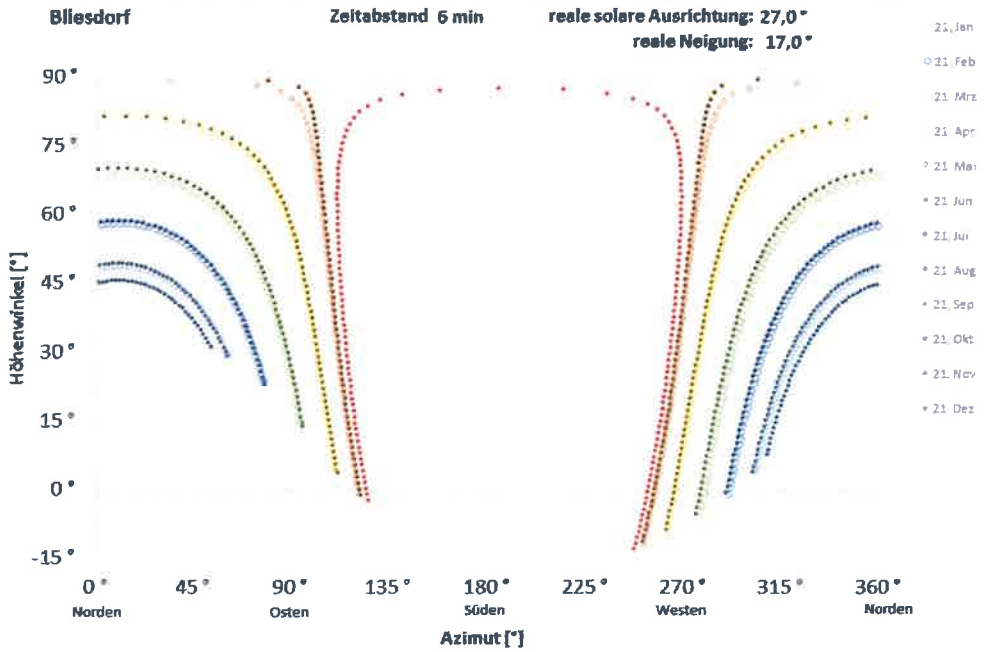

Abbildung 11: Reflexionsdiagramm aus Sicht eines beliebigen potenziellen Blendpunktes der mit 27° ausgerichteten Module mit einer Modulneigung von 17° am Standort der Anlage; waagerecht aufgetragen sind die Azimutwinkel von Norden (0°) über Osten (90°), Süden (180°) nach Westen (270°), senkrecht die Höhenwinkel

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.

Die Höhenwinkel zwischen Betrachtungsort und Anlagenpunkt können variieren, je nach Sitzhöhe des Zugführers.

Abbildung 12 verdeutlicht dies skizzenhaft am Beispiel für den Straßenverkehr: Maximale Höhenwinkel ergeben sich zu höchstmöglichen Fahreraugen in großen LKW und minimale Höhenwinkel zu Fahreraugen in niedrigen PKW. Bei allen Berechnungen für den Zugverkehr wird die minimale Augenhöhe mit 2 m über dem Gleis angesetzt und die maximale mit 4 m.

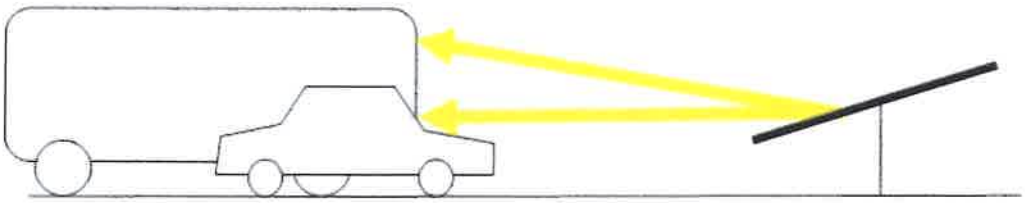

Abbildung 12: Beispiel für Bandbreite möglicher Höhenwinkel anhand vom Straßenverkehr

In den Reflexionsdiagrammen werden deshalb mit „min" und „max" die sich ergebenden Höhenwinkel bezeichnet, um die mögliche Spanne als ungünstigsten Fall zu berücksichtigen.

5.1.2 Lichttechnische Aspekte

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

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 Von Osten kommende Züge

Für von Osten kommende Züge werden exemplarisch 7 Punkte untersucht, deren Lage in Abbildung 13 dokumentiert ist.

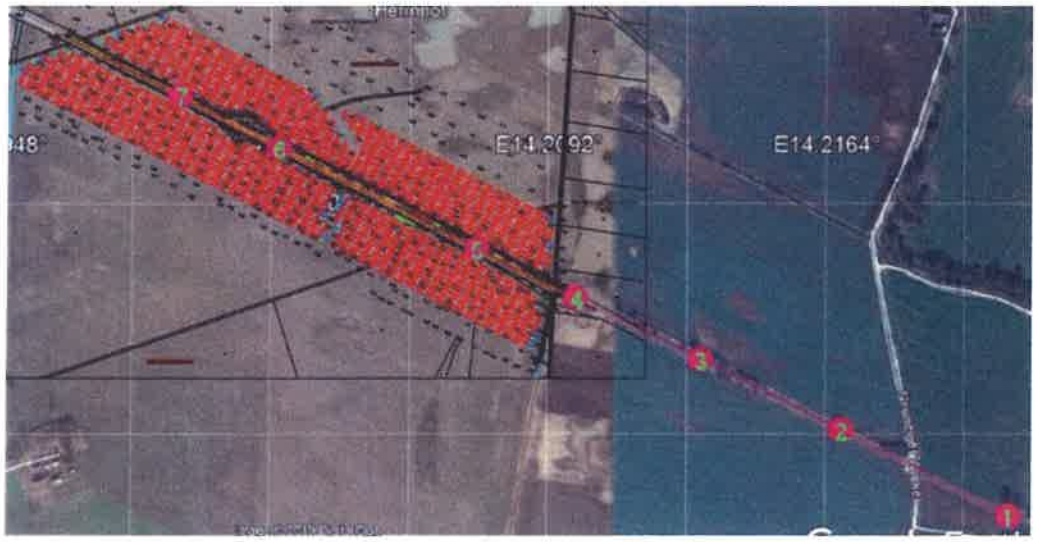

Abbildung 13: Exemplarisch untersuchte Punkte aus östlicher Richtung, lila Kreise in Fahrtrichtung grün durchnummeriert

Der erste Punkt ist etwa 900 m von den nächstgelegenen Modultischen entfernt.

5.2.1 Punkt 1 von Osten

Für ihn ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 14.

Das Diagramm verweist darauf, dass sämtliche Tische von diesem Punkt aus gesehen im zentralen Blickfeld um die Sichtachse herum liegen und von einem Teil Reflexionen zu diesem Punkt gerichtet sein können.

Eine genauere Analyse erlaubt die Detailvergrößerung des relevanten Ausschnitts in Abbildung 15.

Darin ist zu erkennen, dass vom südlichen Teilfeld keine Reflexionen zu Punkt 1 gerichtet sein können und vom nördlichen nur die von der Sichtachse weiter entfernteren Tische zum Ende des Tages hin etwa von Mitte Mai bis Anfang Juni und von Ende Juni bis Ende Juli Reflexionen zu Punkt 1 richten können.

Eine genauere Analyse zeigt, dass in allen Fällen möglicher Reflexionen die Sonne selbst mit maximal 3,5° Höhenwinkel so dicht über der reflektierenden Fläche steht, dass ihre eigene Blendkraft absolut dominiert. Da bei so niedrigen Sonnenständen die Sonne auch nicht von Blendschutzeinrichtungen abgeschirmt werden kann, können keine Reflexionen hier eine eigenständige Blendwirkung hervorrufen.

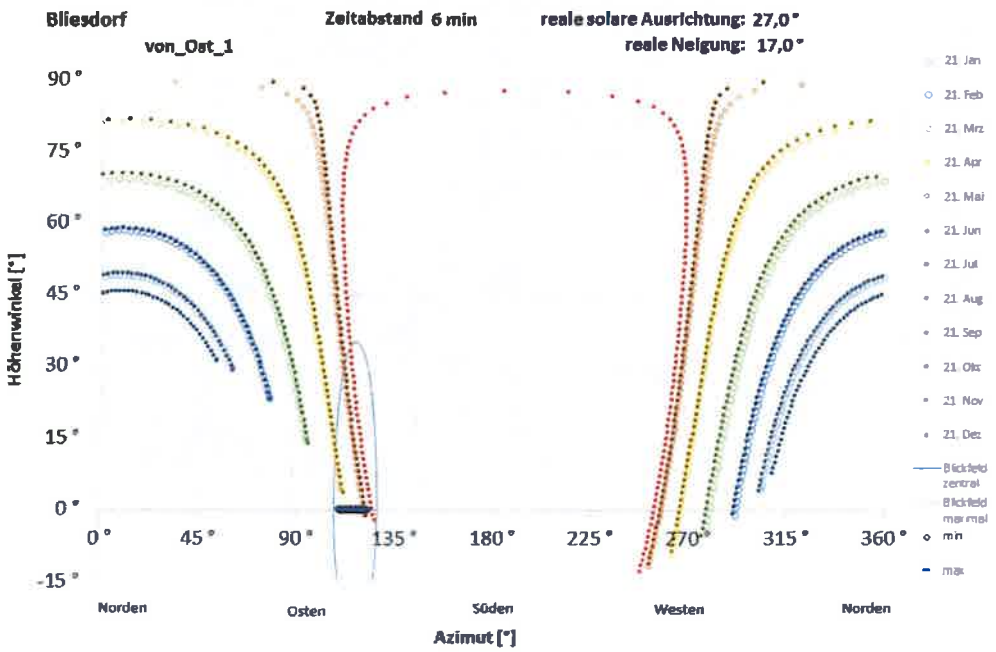

Abbildung 14: Reflexionsdiagramm für Punkt 1 aus östlicher Richtung

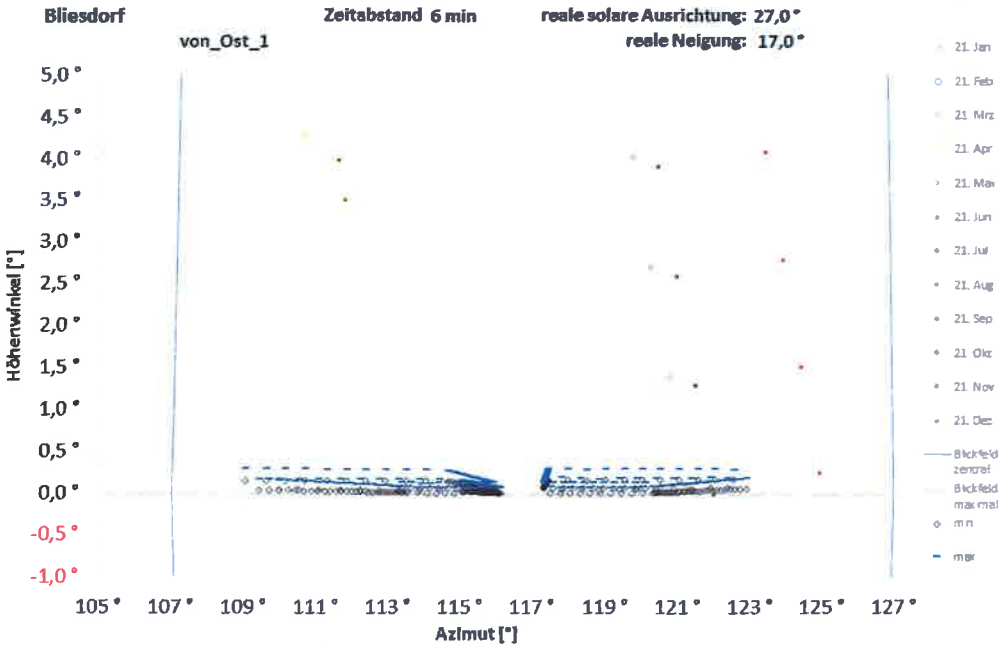

Abbildung 15: Detailvergrößerung von Abbildung 14

5.2.2 Punkte 2 und 3 von Osten

Im folgenden Streckenverlauf bis zum Punkt 3, etwa 300 m vor den ersten Modultischen, (Reflexionsdiagramme in Abbildung 16) ändert sich nur wenig. Die Tische des südlichen Teilfeldes bleiben irrelevant und sämtliche Reflexionen des nördlichen Teilfeldes, die jetzt allerdings auch im Juni auftreten können, treten nur bei dicht über ihnen stehender Sonne mit Höhenwinkeln von unter 5,2° auf.

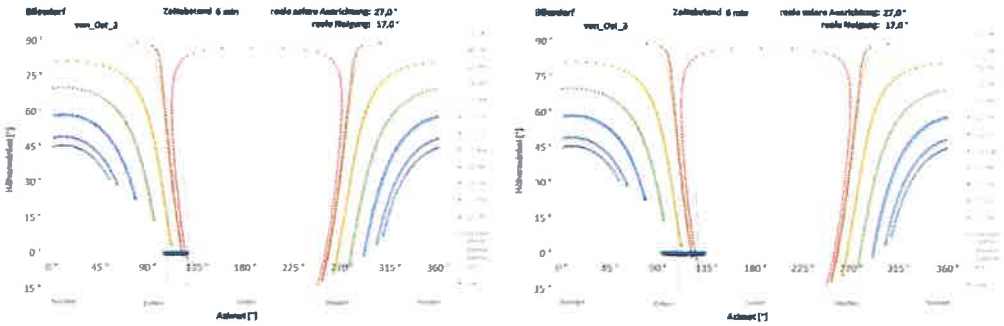

Abbildung 16: Reflexionsdiagramme für Punkt 2 (links) und Punkt 3 (rechts) aus östlicher Richtung

5.2.3 Punkt 4 von Osten

Bei Punkt 4, kurz vor Beginn der Durchfahrt zwischen den Modultischreihen, ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 17.

Die Tische des südlichen Teilfeldes bleiben irrelevant, die Reflexionen des nördlichen Teilfeldes nehmen zur Jahresmitte hin und mit dem Abstand zur Sichtachse zu.

Eine genauere Analyse zeigt, dass innerhalb des besonders kritischen Bereichs bis 5° rechts der Blickachse weiterhin nur so niedrige Sonnenstände zu Reflexionen führen können, dass eine Abschirmung der Sonne durch Blendschutzeinrichtungen noch nicht möglich ist. Erst ab etwa 7° rechts der Blickachse treten Sonnenstände von mehr als 6° auf, so dass eine Abschirmung der Sonne möglich wird und ein eigenständiges Blendpotenzial der Reflexionen zu bedenken ist.

Diese Reflexionsverhältnisse treten nur um den 21. Juni herum auf innerhalb einer Zeitspanne von maximal 12 Minuten. Die reflektierende Fläche kann dabei im Blickfeld eine Winkelhöhe von bis zu 2,5° einnehmen. Die von ihr bewirkte Beleuchtungsstärke an Zugführeraugen kann dabei unter Berücksichtigung von Verschmutzungen und Montagetoleranzen maximal etwa 500 lx erreichen, während senkrecht von der Sonne bestrahlte Objekte bereits mit etwa 12.000 lx beleuchtet werden.

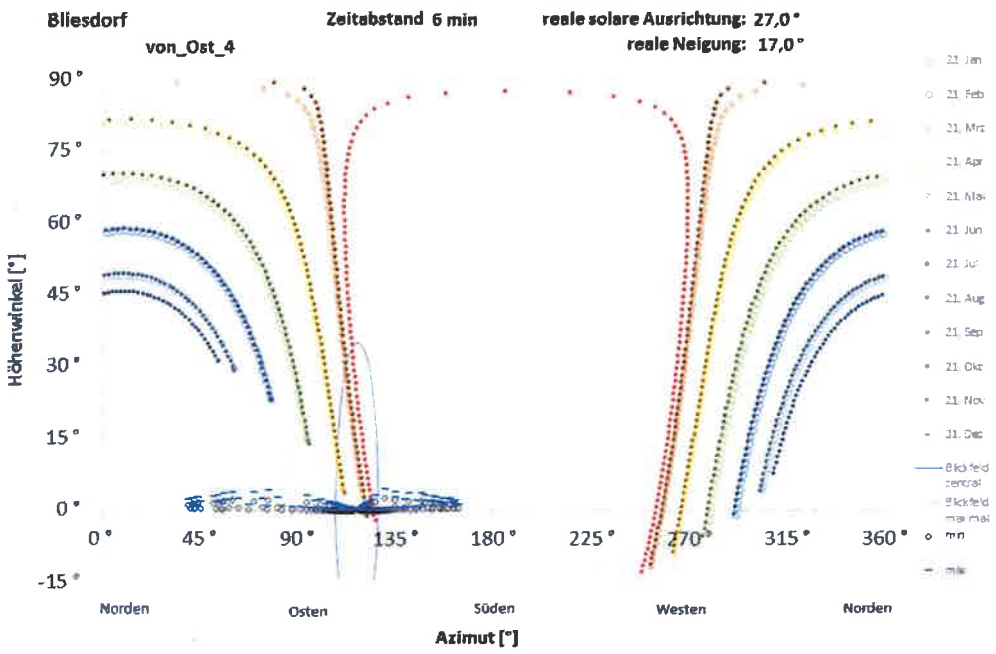

Abbildung 17: Reflexionsdiagramm für Punkt 4 aus östlicher Richtung

5.2.4 Punkte 5 bis 7 von Osten

Im folgenden Streckenverlauf ergeben sich die Reflexionsdiagramme in Abbildung 18. Reflexionen der südlichen Tischreihen treten nicht auf und bedingt durch das nahende Ende des Solarparks nimmt der reflexionsfreie Raum um die Blickachse zu. Bis 7° Abstand zur Blickachse bleibt die nicht abschirmbare Sonne die dominierende Blendquelle. Im verbleibenden Abstand bis 8,5° zur Blickachse treten ähnliche Relationen zwischen den bewirkten Beleuchtungsstärken durch Reflexionen und Sonne auf wie bei Punkt 4, bei zusätzlich abnehmender Winkelhöhe im Blickfeld bedingt durch das nahekommende Ende des Solarparks.

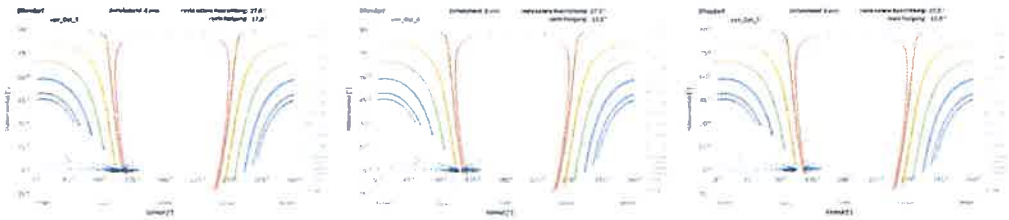

Abbildung 18: Reflexionsdiagramme für die Punkte 5 bis 7 aus östlicher Richtung

5.2.5 Bedeutung für die Erkennbarkeit der Hinweisschilder

Da bis zu 7° rechts der Blickachse Reflexionen kein eigenständiges Blendpotenzial haben, kann in diesem Blickbereich die Erkennbarkeit von Hinweiszeichen auch nicht durch Reflexionen beeinträchtigt sein. Unter Annahme eines Mindestabstands der Hinweiszeichen von der Blickachse

von 3 m ergibt sich somit, dass frühestens ab 25 m vor einem Hinweiszeichen seine Erkennbarkeit beeinträchtigt sein könnte. Hinweiszeichen für die Bahn sind aber so aufgestellt, dass sie bereits in einem wesentlich größeren Abstand erkannt werden können, so dass sich eine detailliertere Untersuchung erübrigt, ob potenzielle Reflexionen mit einem Abstand von über 7° zur Blickachse beeinträchtigend wirken können.

5.3 Von Westen kommende Züge

Für von Westen kommende Züge werden exemplarisch 6 Punkte untersucht, deren Lage in Abbildung 19 dokumentiert ist.

Abbildung 19: Exemplarisch untersuchte Punkte aus westlicher Richtung, lila Kreise in Fahrtrichtung grün durchnummeriert

Der erste Punkt ist etwa 800 m von den nächstgelegenen Modultischen entfernt.

5.3.1 Punkt 1 von Westen

Für den ersten Punkt ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 20. Das Diagramm verweist darauf, dass sämtliche Tische von diesem Punkt aus gesehen im zentralen Blickfeld um die Sichtachse herum liegen und von einem Teil Reflexionen zu diesem Punkt gerichtet sein können.

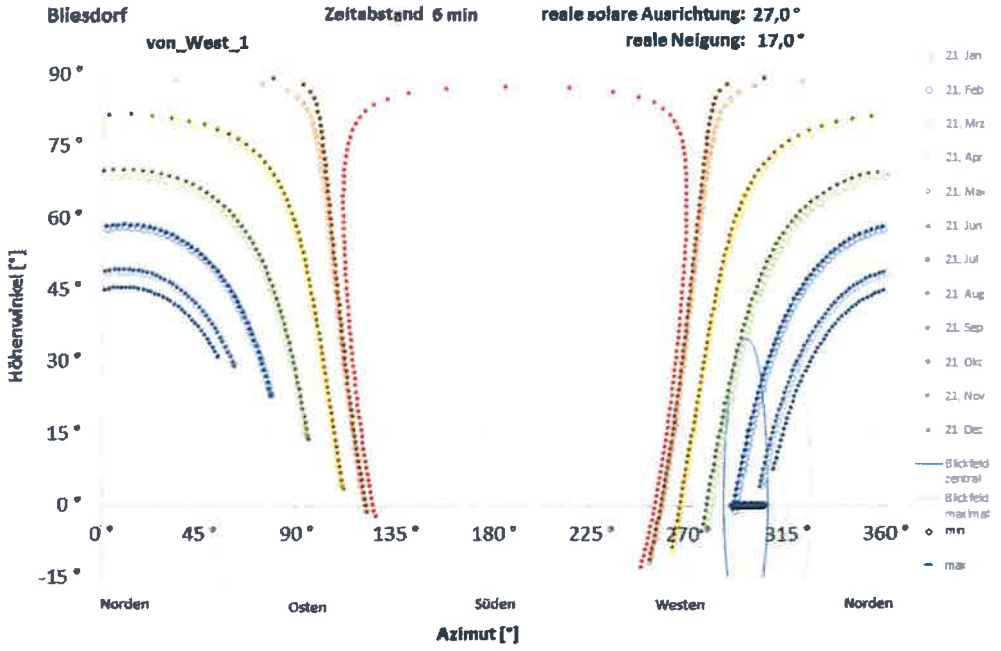

Abbildung 20: Reflexionsdiagramm für Punkt 1 aus westlicher Richtung

Eine genauere Analyse erlaubt die Detailvergrößerung des relevanten Ausschnitts in Abbildung 21.

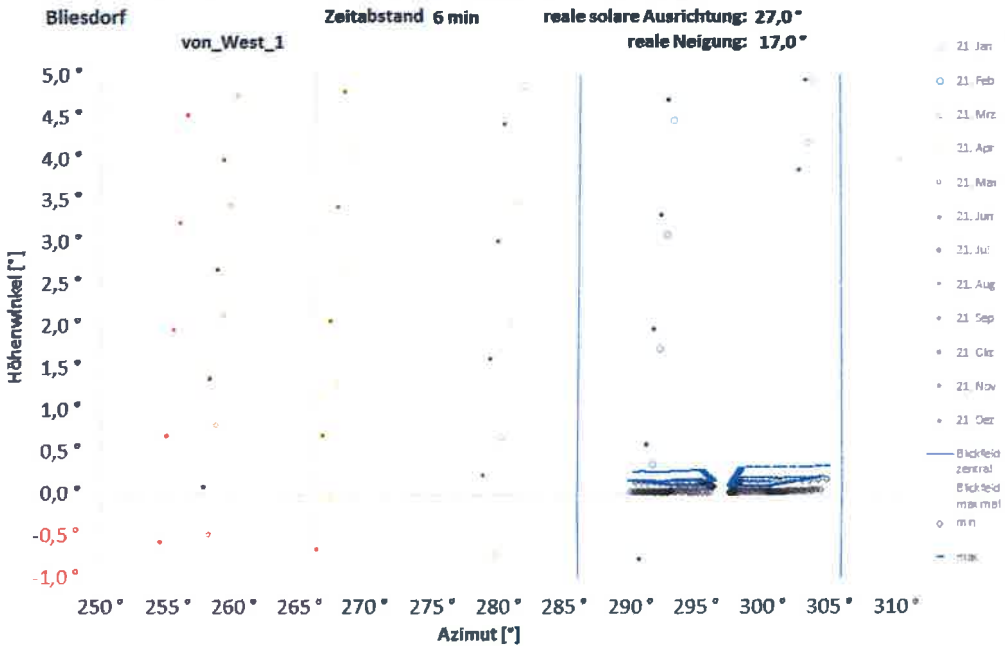

Abbildung 21: Detailvergrößerung von Abbildung 20

Darin ist zu erkennen, dass vom südlichen Teilfeld keine Reflexionen zu Punkt 1 gerichtet sein können und vom nördlichen nur die von der Sichtachse weiter entfernteren Tische zu Beginn des Tages um den 21. Februar und den 21. Oktober herum Reflexionen zu Punkt 1 richten können.

Eine genauere Analyse zeigt, dass in allen Fällen möglicher Reflexionen die Sonne selbst mit maximal 4,1° Höhenwinkel so dicht über der reflektierenden Fläche steht, dass ihre eigene Blendkraft absolut dominiert. Da bei so niedrigen Sonnenständen die Sonne auch nicht von Blendschutzeinrichtungen abgeschirmt werden kann, können keine Reflexionen hier eine eigenständige Blendwirkung hervorrufen.

5.3.2 Punkt 2 von Westen

Für Punkt 2, etwa 375 m vor den ersten Modultischen, ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 22.

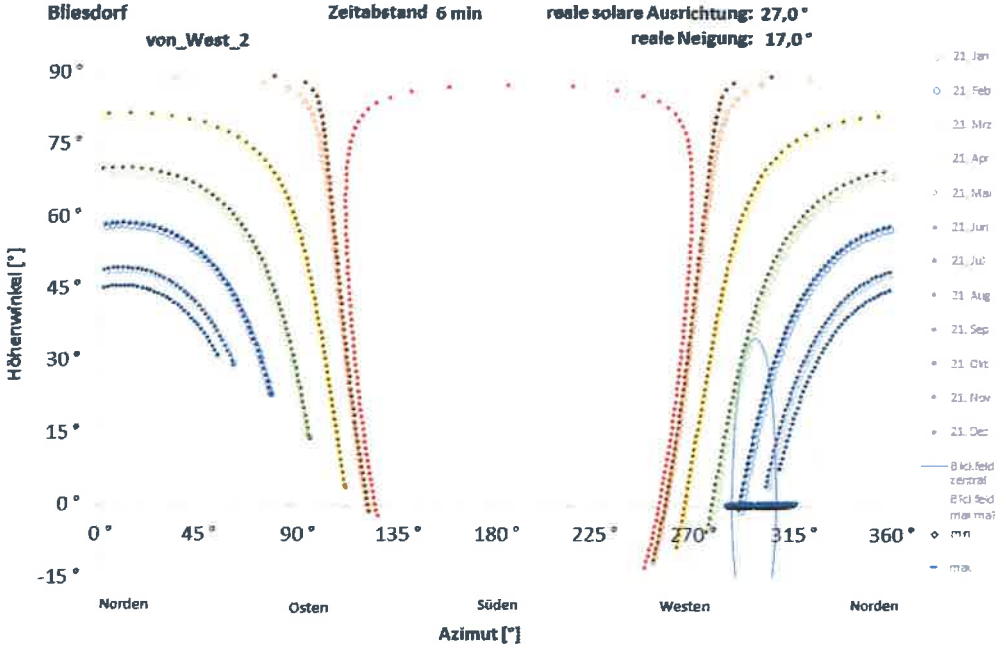

Abbildung 22: Reflexionsdiagramm für Punkt 2 aus westlicher Richtung

Trotz leichter Änderung der Blickrichtung bleibt es dabei, dass von den südlichen Modulreihen keinerlei Reflexionen auf diesen Punkt 2 gerichtet sein können.

Eine genauere Analyse der Reflexionsbedingungen für die nördlichen Modulreihen zeigt, dass sämtliche Reflexionen innerhalb des zentralen Blickfeldes bis 10° links der Blickachse nur bei Sonnenhöhen von unter 6° auftreten können, so dass die dominante Blendquelle der Sonne nicht abgeschirmt werden kann.

Die übrigen Reflexionen außerhalb des zentralen Blickfeldes nehmen eine Flächengröße im Blickfeld ein, deren Winkelhöhe bei 0,2° liegt.

5.3.3 Punkt 3 von Westen

Für Punkt 3, kurz vor Beginn der Durchfahrt zwischen den beiden Teilfeldern, ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 23.

Mögliche Reflexionen des nördlichen Teilfeldes können hier schon bis über den Rand des maximalen Blickfeldes hinaus auf Zugführeraugen gerichtet sein. Innerhalb des zentralen Blickfeldes bis 10° treten aber wieder nur Reflexionen von so niedrigstehender Sonne auf, dass die Sonne als dominierende Blendquelle nicht abgeschirmt werden kann. Die Flächengröße der Reflexionen im Blickfeld wächst mit zunehmendem Abstand zur Blickachse kontinuierlich auf maximal 2° Winkelhöhe am Rand des zentralen Blickfeldes an.

Außerhalb des zentralen Blickfeldes verringert sich die Flächengröße bei steigender Intensität der Reflexionen. Am Rand des maximalen Blickfeldes bei 30° links der Blickachse können die Reflexionen mit einer Winkelhöhe von nur noch 0,6° unter Berücksichtigung von Verschmutzung und Montagetoleranzen bis zu 1.500 lx Beleuchtungsstärke an Zugführeraugen bewirken. Zu diesen Zeiten beleuchtet die Sonne senkrecht bestrahlte Objekte bereits mit 30.000 lx.

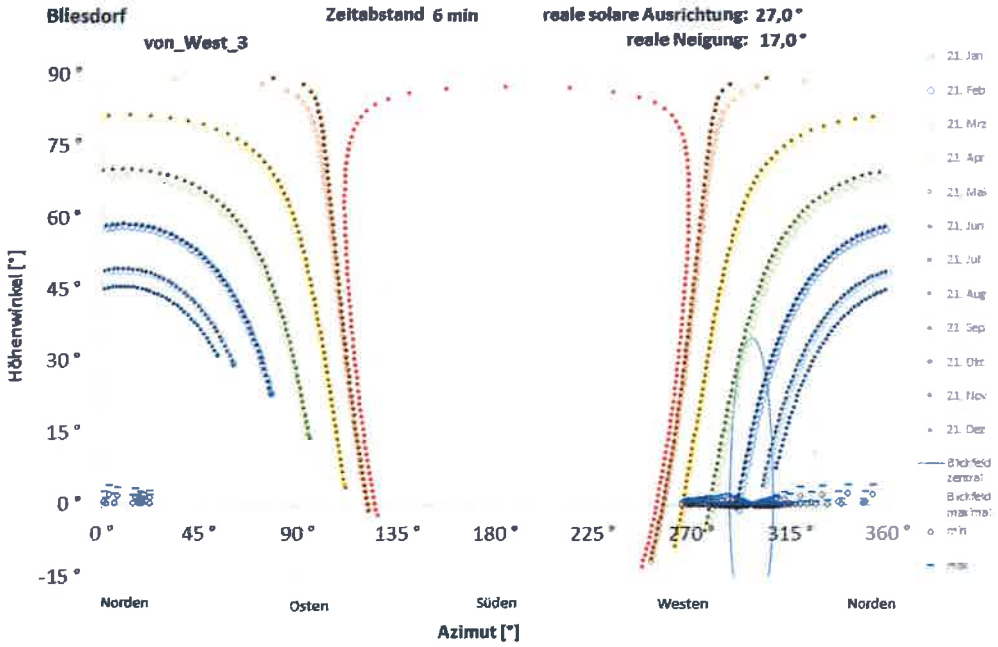

Abbildung 23: Reflexionsdiagramm für Punkt 3 aus westlicher Richtung

5.3.4 Punkt 4 von Westen

Für Punkt 4 ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 24.

Bis 8° links der Blickachse bleibt die nicht abschirmbare Sonne die dominante Blendquelle. Die Flächengröße der Reflexionen im Blickfeld haben hier eine Winkelhöhe von 2° und können an Zugführeraugen Beleuchtungsstärken von 430 lx bewirken, während die Sonne senkrecht bestrahlte

Objekte mit 12.000 lx beleuchtet. Mit zunehmendem Abstand von der Blickachse wachsen Flächengröße und bewirkte Beleuchtungsstärke der Reflexionen bis zum Rand des maximalen Blickfeldes bei 30° links der Blickachse kontinuierlich an auf 6° und 2.000 lx.

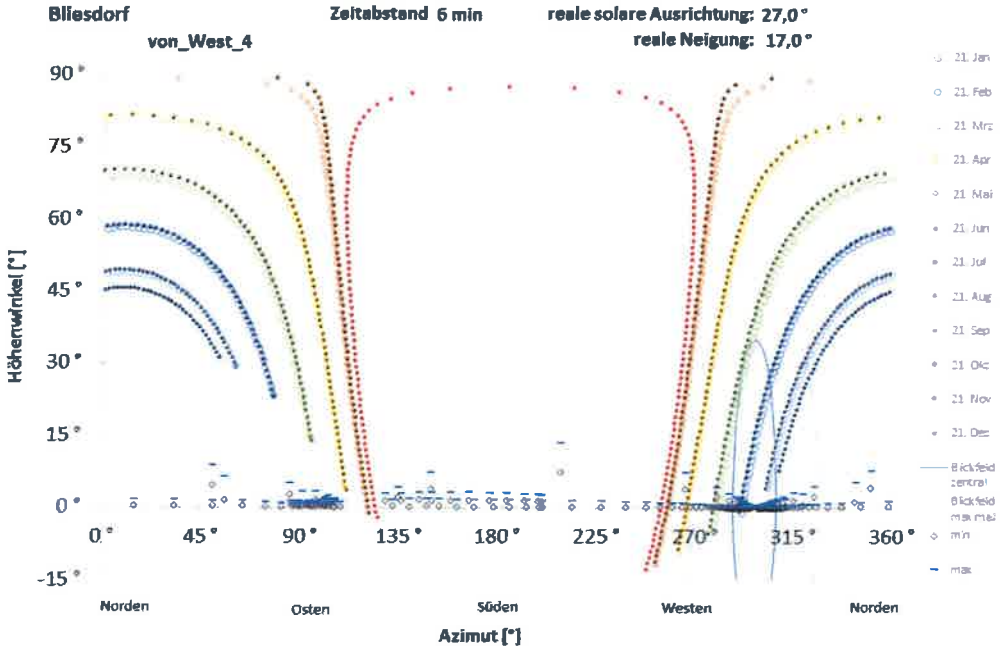

Abbildung 24: Reflexionsdiagramm für Punkt 4 aus westlicher Richtung

5.3.5 Punkt 5 von Westen

Für Punkt 5 ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 25.

Gegenüber Punkt 4 ändert sich bis hier lediglich, dass bedingt durch das nahende Ende des Solarparks Reflexionen weniger nahe der Blickachse beginnen.

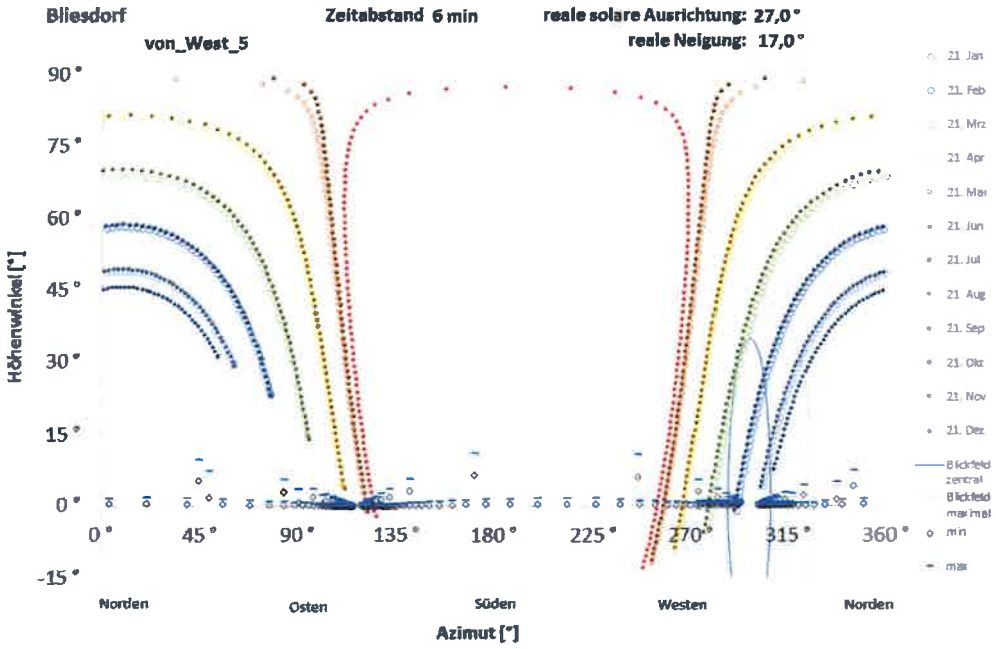

Abbildung 25: Reflexionsdiagramm für Punkt 5 aus westlicher Richtung

5.3.6 Punkt 6 aus Westen

Für Punkt 6 ergibt sich das Reflexionsdiagramm in Abbildung 26.

Hierin zeichnet sich das Ende des Solarparks schon deutlich ab. Innerhalb des zentralen Blickfeldes können schon keine Reflexionen mehr auftreten und die Flächengröße der verbleibenden Reflexionen nimmt ab.

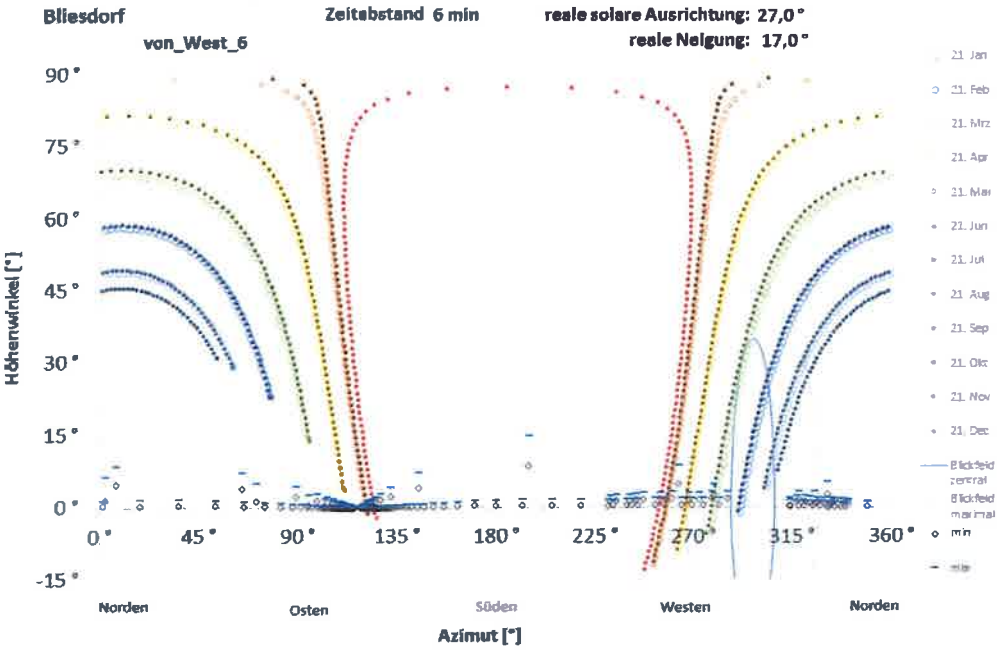

Abbildung 26: Reflexionsdiagramm für Punkt 6 aus westlicher Richtung

5.3.7 Bedeutung für die Erkennbarkeit der Hinweisschilder und des Signals

Da sich die Hinweisschilder und das Signal rechts der Blickachse befinden und vom südlichen Teilfeld keine Reflexionen auf Zugführer gerichtet sein können, ist die Erkennbarkeit jederzeit gewährleistet.

6 Bewertung der Ergebnisse

Es wird festgestellt, dass Reflexionen des südlichen Teilfeldes zu keinem Zeitpunkt auf die Bahnlinie gerichtet sein können, weder in westlicher noch in östlicher Richtung.

Reflexionen des nördlichen Teilfeldes können dagegen sowohl auf Züge gerichtet sein, die aus Osten kommen, wie auch auf Züge aus Westen. Für beide Fahrtrichtungen gilt dabei, dass Reflexionen nahe der Blickachse nur bei so niedrigen Sonnenständen dicht über den reflektierenden Modulen auftreten können, dass die Sonne selbst mit ihrer absolut dominierenden Blendwirkung noch nicht durch Sonnenschutzeinrichtungen abgeschirmt werden kann. Für aus Osten kommende Züge gilt dies bis 7° rechts der Blickachse und für aus Westen kommende Züge bis 8° links der Blickachse.

Der besonders kritische Bereich bis 5° Abstand zur Blickachse ist demnach in beiden Fahrtrichtungen frei von eigenständig blendenden Reflexionen.

Reflexionen von der höher stehenden Sonne, die eine eigenständige Blendwirkung haben können, weil die Sonne selbst von Blendschutzeinrichtungen abgeschirmt werden kann, treten für aus Osten kommende Züge nur um den 21. Juni herum innerhalb eines Zeitraums von maximal 12 Minuten an einem Tag auf. Die im Blickfeld eingenommene Flächengröße ist dabei durch einen maximalen Durchmesserhöhenwinkel von 2,5° gekennzeichnet und die an Zugführeraugen auftretende Beleuchtungsstärke kann maximal 500 lx betragen, während die Sonne zu diesen Zeitpunkten senkrecht bestrahlte Objekte bereits mit etwa 12.000 lx beleuchtet. Bei dieser Relation der Beleuchtungsstärken außerhalb des besonders kritischen Bereichs im zentralen Blickfeld besteht keine Gefahr einer die Sicht beeinträchtigenden Blendung.

Dass diese Reflexionsverhältnisse über eine Strecke von 900 m etwa anhalten können, was bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h einer Zeitdauer von 40 Sekunden entspricht, kann für einen Zuführer, der gerade in diesem Zeitraum von 12 Minuten und bei voller Sonneneinstrahlung zwischen den Anlagenteilen hindurchfährt, sicherlich eine Belästigung darstellen, kann aber seine Sehfähigkeit nicht beeinträchtigen.

Für aus Westen kommende Züge beginnen Reflexionen mit eigenständigem Blendpotenzial aufgrund der höher stehenden und damit abschirmbaren Sonne ab 8° links der Blickachse. Am Rand des zentralen Blickfeldes 10° links der Blickachse können sie zu Beleuchtungsstärken von maximal 430 lx führen, während die Sonne zu diesen Zeiten senkrecht bestrahlte Objekte bereits mit 12.000 lx beleuchtet. Außerhalb des zentralen Blickfeldes auftretende Reflexionen nehmen mit wachsendem Abstand zur Blickachse an Größe und Intensität zu, bis sie am Rand des maximalen Blickfeldes 30° links der Blickachse eine Höhe im Blickfeld von 6° einnehmen und Beleuchtungsstärken bis 2.000 lx bewirken können.

Ähnlich wie für die Gegenrichtung ergibt sich auch für Zugführer aus westlicher Richtung, dass wahrnehmbare Reflexionen über eine Strecke von 900 m eine Belästigung darstellen können, aber zu keinem Zeitpunkt im Jahr die Sehleistung beeinträchtigen können.

Die Erkennbarkeit der Hinweisschilder und Signale wird ebenfalls nicht durch Reflexionen beeinträchtigt.

Zusätzliche Blendschutzmaßnahmen sind damit nicht erforderlich.

7 Verwendete Materialien

7.1 Dokumente vom Auftraggeber

- Belegungsplan als Dateien 2019-02-13 Bliesdorf - für Blendgutachter.dwg und 2019-02-13 Bliesdorf - Modulbelegung mit Höhenangaben und Gleisbettkante.pdf
- Höhenvermessungen der öffentlich bestellten Vermessungsingenieure Holger Peschmann & Steffen Martin, Karl-Marx-Straße 9, 16321 Bernau, als Dateien 50318.pdf und 50318.dxf

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 (rot) und der Bahnlinie zwischen den Teilfeldern 4

Abbildung 2: Gegenstände auf der Sichtachse zur Blendquelle sind nicht mehr wahrnehmbar 6

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 8

Abbildung 4: Auswirkung des Einfallwinkels auf den Transmissionsgrad für Modulgläser 10

Abbildung 5: Lage der Modultischreihen (blau) 11

Abbildung 6: Seitlicher Schnitt durch die Tischreihen 12

Abbildung 7: Hinweiszeichen auf Brücken entlang der Strecke nach Wrietzen; links zu Beginn des Solarparks, rechts in Kombination mit Gebotszeichen zum Pfeifen etwa 100 m hinter dem Solarpark 12

Abbildung 8: Hinweiszeichen auf Brücken entlang der Strecke nach Neutrebbin; links etwa 120 m vor dem Beginn des Solarparks, rechts am Ende des Solarparks 13

Abbildung 9: Merkpfahl für Einschaltkontakt des kommenden gesicherten Bahnübergangs links, folgendes Kontrollsignal für Bahnübergangssicherung rechts 13

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 14

Abbildung 11: Reflexionsdiagramm aus Sicht eines beliebigen potenziellen Blendpunktes der mit 27° ausgerichteten Module mit einer Modulneigung von 17° am Standort der Anlage; waagerecht aufgetragen sind die Azimutwinkel von Norden (0°) über Osten (90°), Süden (180°) nach Westen (270°), senkrecht die Höhenwinkel 15

Abbildung 12: Beispiel für Bandbreite möglicher Höhenwinkel anhand vom Straßenverkehr 16

Abbildung 13: Exemplarisch untersuchte Punkte aus östlicher Richtung, lila Kreise in Fahrtrichtung grün durchnummeriert 17

Abbildung 14: Reflexionsdiagramm für Punkt 1 aus östlicher Richtung 18

Abbildung 15: Detailvergrößerung von Abbildung 14 18

Abbildung 16: Reflexionsdiagramme für Punkt 2 (links) und Punkt 3 (rechts) aus östlicher Richtung 19

Abbildung 17: Reflexionsdiagramm für Punkt 4 aus östlicher Richtung 20

Abbildung 18: Reflexionsdiagramme für die Punkte 5 bis 7 aus östlicher Richtung 20

Abbildung 19: Exemplarisch untersuchte Punkte aus westlicher Richtung, lila Kreise in Fahrtrichtung grün durchnummeriert 21

Abbildung 20: Reflexionsdiagramm für Punkt 1 aus westlicher Richtung 22

Abbildung 21: Detailvergrößerung von Abbildung 20 22

Abbildung 22: Reflexionsdiagramm für Punkt 2 aus westlicher Richtung 23

Abbildung 23: Reflexionsdiagramm für Punkt 3 aus westlicher Richtung 24

Abbildung 24: Reflexionsdiagramm für Punkt 4 aus westlicher Richtung 25

Abbildung 25: Reflexionsdiagramm für Punkt 5 aus westlicher Richtung 26

Abbildung 26: Reflexionsdiagramm für Punkt 6 aus westlicher Richtung 27

9 Tabellenverzeichnis

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