

Dr. Hans Meseberg
LSC Lichttechnik und Straßenausstattung Consult
Fährstr. 10
13503 Berlin
Tel. und Fax 030/82707832
Email: hmeseberg@t-online.de

Berlin, den 17. August 2016

**Gutachten
G13/2016
zur Frage der eventuellen Blend- und Störwirkung von Nutzern
der BAB A 1 durch eine im Bereich der Ortslage Hetzerath
installierte PV-Freiflächenanlage**

(Dieses Gutachten besteht aus 11 Seiten
und einem Anhang mit 3 weiteren Seiten)

1 Auftraggeber

Den Auftrag zur Erarbeitung des Gutachtens erteilte die WES Green GmbH, Postfach 4124 in 54231 Trier.

Auftragsdatum: 3. August 2016

2 Auftragsache

Die WES Green GmbH plant die Errichtung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage bei Hetzerath in unmittelbarer Nähe der BAB A 1. Es stellt sich die Frage, ob Autobahnbenutzer bei der Vorbeifahrt an der PV-Anlage durch Sonnenlicht, das von der Oberfläche der PV-Module reflektiert wird, geblendet oder in sonst unzumutbarer Weise gestört werden. Dieses Gutachten dient der Klärung der Frage, ob und mit welcher Häufigkeit solche Situationen entstehen können und falls ja, welche Abhilfemöglichkeiten bestehen.

3 Definitionen

Im Folgenden wird der Richtung Nord der horizontale Winkel $\alpha = 0^\circ$ zugeordnet; der Winkel steigt mit dem Uhrzeigersinn (Ost: $\alpha = 90^\circ$; Süd: $\alpha = 180^\circ$ usw.)

Es werden folgende Winkel verwendet:

Sonnenhöhenwinkel (vertikaler Sonnenwinkel)	γ
Azimut (horizontaler Sonnenwinkel) bzw. momentane Fahrtrichtung eines Kfz auf der Autobahn	α
Orientierung der Modultischreihen gegen Ost oder West	ν
vertikaler Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts	δ

im Raum liegender Blendwinkel (gebildet durch die Blickrichtung eines Kraftfahrers - Richtung reflektiertes Sonnenlicht)	θ
Neigung der PV-Module gegen Süd	ε
horizontaler Blickwinkel Kraftfahrer - PV-Anlage	τ
Differenz $\alpha - \tau$ (horizontale Blickrichtung Kraftfahrer - PV-Anlage)	ψ
vertikaler Blickwinkel Kraftfahrer - PV-Anlage	λ
vertikaler Blickwinkel Kraftfahrer - vor ihm liegende Fahrbahn	σ

4 Topografische Daten und Angaben zur Photovoltaik-Anlage

Die topografischen Daten und die Beschreibung der Anlage beruhen auf folgenden Informationen, die von der WES Green GmbH zur Verfügung gestellt wurden:

- Lageplan der PV-Anlage
- Höhenplan der PV-Anlage
- Modullayout
- Vorhabenbeschreibung
- Fotos
- Mündliche und Emailinformationen von Frau Julia Pape, WES Green GmbH

Verwendete Programme: Die Geländehöhen der PV-Anlage wurden dem Höhenplan entnommen. Die Geländehöhen der Autobahn, alle Entfernungen und horizontalen Winkel wurden mit google earth berechnet. Der monatliche Sonnenstand für Hetzerath (Sonnenhöhe und -azimut) wurde mit der Website www.stadtklima-stuttgart.de ermittelt. Die Berechnung der Winkel des reflektierten Sonnenlichts erfolgte mit eigenen Excel-Programmen.

4.1 Topografische Daten

Die PV-Anlage wird auf dem Gelände einer ehemaligen Kiesgrube errichtet. Die PV-Fläche hat eine unregelmäßige Form (s. Bild 1 im Anhang). Die Fläche befindet sich nördlich der Autobahn; der kleinste Abstand zwischen PV-Anlagengelände und befestigtem Rand der Autobahn beträgt ca. 25 m. Das PV-Anlagengelände ist hügelig; die Geländeoberkante (GOK) steigt von West nach Ost von ca. 189,5 m auf ca. 197, 5 m an. Das Gelände wird vor der Installation der PV-Anlage noch planiert; die Geländehöhen ändern sich dadurch praktisch nicht. Innerhalb des PV-Anlagengeländes bleiben am linken Rand zwei Teilflächen wegen dort stehender Hochspannungsmasten frei (in Bild 1 nicht eingezeichnet).

Die Fahrbahnoberkante (FOK) der Autobahn steigt im interessierenden Bereich in Fahrtrichtung Südwest von ca. 197 m (Ausfahrt Parkplatz, ca. 650 m vor dem südlichsten Punkt der PV-Anlage) bis auf ca. 205 m (ca. 700 m hinter dem südlichsten Punkt der PV-Anlage) an. Dieser Bereich ist in Bild 1 durch die beiden roten Doppelpfeile gekennzeichnet. Ein diesen Streckenabschnitt befahrender Autofahrer blickt also ständig leicht nach unten in Richtung PV-Anlage. Zwischen Autobahn und PV-Anlage befindet sich dicht belaubtes, mehrere Meter hohes Buschwerk, der Blick zur PV-Anlage ist deshalb im Sommerhalbjahr nicht möglich.

Von Nordosten kommend, liegt die Fahrtrichtung α der Autobahn vom Parkplatz bis zur Vorbeifahrt durchgehend bei ca. $234,5^\circ$. Von Südwesten kommend, liegt die Fahrtrichtung 750 m vor dem südlichsten Punkt der PV-Anlage zunächst bei ca. 228° und dreht wegen der dortigen leichten Rechtskurve bis zur Vorbeifahrt an der Anlage auf ca. $54,5^\circ$.

4.2 Beschreibung der PV-Anlage

Die Gesamtfläche der PV-Anlage beträgt ca. 7,2 ha, die installierte Leistung 4,39 MWpeak. Die Neigung ε der Module gegen Süd beträgt 20° . Es werden polykristalline Solarmodule des Modultyps Canadian Solar CS6P-P-WS 265 mit einer Leistung von je 265 Wpeak eingebaut. Die Module werden auf sogenannten Modultischreihen montiert, deren Länge der jeweils verfügbaren Breite des PV-Anlagengeländes entspricht. Die Modultischreihen sind in Ost-West-Richtung ausgerichtet.

Modulober- und -unterkante befinden in einer Höhe von 3,50 m bzw. 0,80 über GOK, die mittlere Modulhöhe über GOK ergibt sich daraus zu 2,15 m. Die Module werden auf einem sogenannten Tisch montiert; Im Querschnitt eines Tisches werden 3 Module hochkant angeordnet. Die Tiefe eines Tisches (in Draufsicht gesehen) beträgt 4,635 m, der lichte Abstand zwischen den Modultischreihen (Gang zwischen den Modultischreihen) ca. 3 m. Daraus errechnet sich ein mittlerer Reihenabstand a (Abstand Moduloberkante einer Tischreihe zu Moduloberkante der nächsten Tischreihe) von $4,635 \text{ m} + 3 \text{ m} = \text{ca. } 7,64 \text{ m}$.

5 Kurzbeschreibung der eventuell von PV-Anlagen ausgehenden Blend- und Störwirkungen für Kraftfahrer

5.1 Blendwirkung

Unter Blendung versteht man eine vorübergehende Funktionsstörung des Auges, die, ganz allgemein ausgedrückt, durch ein Übermaß an Licht hervorgerufen wird. Liegt eine messbare Beeinträchtigung der Sehleistung vor, spricht man von **physiologischer Blendung**. Die bei Tageslicht am häufigsten auftretende Blendung wird von der Sonne verursacht. Befindet sich die Sonne im zentralen Gesichtsfeld des Kraftfahrers, tritt Absolutblendung auf, bei der man nicht mehr in der Lage wäre, ein Kfz sicher zu führen, da im Gesichtsfeld des Autofahrers keine Kontraste mehr erkennbar sind. Dieser sehr gefährlichen Situation entzieht man sich, indem die Sonne gegenüber dem Auge durch eine Sonnenblende bzw. Jalousie oder durch eine Hand abgeschattet wird.

Häufig wird das Licht der Sonne auch durch glänzende Objekte ins Auge eines Betrachters gespiegelt: Wasseroberflächen, Fensterfronten von Gebäuden, verglaste Treibhäuser. Gegenüber der direkten Sonnenblendung ist bei dieser indirekten Blendung die tatsächliche Blendgefahr geringer:

Ob Blendung auftritt, ist sehr stark vom Winkel θ , gebildet von der Blickrichtung eines Beobachters und der Verbindungslinie Auge des Beobachters - blendende Lichtquelle (z.B. Auge des Kraftfahrers zur PV-Anlage) abhängig. **Bei Nacht** nimmt die Blendempfindlichkeit B proportional mit dem reziproken Wert des Winkelquadrats ab: $B \sim 1/\theta^2$. Bei Nacht wird physiologische Blendung deshalb nur in einem Winkelbereich $\theta \pm 30^\circ$, bezogen auf die Blickrichtung, berücksichtigt; Licht aus größeren Winkeln lie-

fert keinen nennenswerten Betrag zur Blendung. **Bei Tageslicht** hat man andere Verhältnisse: Die Gesamthelligkeit ist um mehrere Zehnerpotenzen höher als bei Nacht. Die evtl. blendenden Objekte werden nicht wie bei Nacht gegen eine meist lichtlose Umgebung gesehen, sondern die Umgebung hat ebenfalls eine gewisse Helligkeit. Diese beiden Unterschiede führen dazu, dass tagsüber Blendungseffekte eher selten auftreten. Die reziprok quadratische Abhängigkeit der Blendung vom Winkel θ gilt auch nicht mehr unbedingt; allerdings nimmt auch bei Tageslicht die Blendung deutlich zu, wenn der Blickwinkel θ kleiner wird.

Für die Bewertung von Blend- oder anderen visuellen Störeffekten, die von Bauwerken oder anderen technischen Anlagen bei Tageslicht erzeugt werden, gibt es keine Regelwerke oder Vorschriften. Deshalb ist man hier auf Einzelfallbetrachtungen und -entscheidungen angewiesen.

Der Blickwinkel θ ist bei Tageslicht weniger kritisch zu sehen als bei Nacht. Bei Tageslicht liefert störendes Licht aus **Winkeln $\theta > 20^\circ$** keinen merklichen Beitrag zur Blendung und kann außer Betracht bleiben. Störendes Licht aus einem **Winkelbereich $10^\circ < \theta \leq 20^\circ$** kann u.U. eine moderate Blendung erzeugen. I.a. kann man Blendung wie oben beschrieben durch leichtes Zur-Seite-Schauen oder „Ausblenden“ der störenden Lichtquelle vermeiden. Dieser Winkelbereich sollte aber bei einer Blendungsbewertung mit in Betracht gezogen werden. Kritisch sind **Blendwinkel $\theta \leq 10^\circ$** , wenn also die störende Lichtquelle direkt im Gesichtsfeld des Beobachters liegt. Ein Kraftfahrer hat nicht mehr unbedingt die Möglichkeit, diese Lichtquelle „auszublenen“, da er die vor ihm liegende Fahrbahn und deren Umgebung beobachten muss und seinen Blick daher nicht beliebig zur Seite richten kann, um einem evtl. vorhandenen Blendreflex auszuweichen. Ob bei solch kleinen Winkeln tatsächlich Blendung vorliegt, hängt nicht nur von den geometrischen Gegebenheiten, sondern im entscheidenden Maße davon ab, wie hoch die Intensität des Störlichts im Verhältnis zur Umgebungshelligkeit und v.a. zur Intensität des direkten Sonnenlichts ist. Um eine Aussage über die Blendwirkung einer PV-Freiflächenanlage machen zu können, muss deshalb in jedem einzelnen Fall unter Beachtung des Blickwinkels die Beleuchtungsstärke der Blendlichtquelle ins Verhältnis zur Beleuchtungsstärke der Sonne gesetzt werden.

5.2 Störwirkung durch den Flimmereffekt

Periodisch oder unregelmäßig an- und abschwellendes Licht, das ins Auge gelangt, wird als Flimmern bezeichnet. Flimmereffekte werden z. B. von Leuchtstoff- und Energiesparlampen und von Bildschirmen erzeugt. Das menschliche Auge kann die einzelnen Hell-/Dunkelphasen in Abhängigkeit von der Helligkeit und dem Betrachtungswinkel zur Lichtquelle bis zu einer Frequenz von 50 Hz bis 80 Hz unterscheiden. Im Verkehrswesen wird Flimmern durch die periodisch angeordneten Leuchten der Straßen- oder Tunnelbeleuchtung erzeugt. Aber auch der unregelmäßige Hell-/Dunkel-Wechsel, der z.B. beim Durchfahren einer lichten Baumallee entsteht, wird als Flimmern bezeichnet. Flimmern wird allgemein als unangenehme, störende Lichterscheinung empfunden. Das gilt sowohl für das Flimmern von Lampen und Bildschirmen als auch das von Straßenleuchten oder Baumalleen erzeugte Flimmern. Es ist bekannt, dass **periodisches** Flimmern bei manchen Epileptikern sogar Anfälle auslösen kann (photosensitive Epilepsie).

Der Flimmereffekt bei der Vorbeifahrt an einer PV-Anlage entsteht dadurch, dass die PV-Module in Reihen mit einem festen, regelmäßigen Abstand voneinander angebracht sind, wodurch es zu einer periodischen Unterbrechung des reflektierten Sonnenlichts kommt. Wenn das unterbrochene Licht ins Auge eines vorbeifahrenden Kraftfahrers fällt, wird es als Flimmern wahrgenommen. Bei der Bewertung eines Flimmereffektes ist zu berücksichtigen, dass - im Gegensatz zur Blendung - Flimmern als besonders unangenehm empfunden wird, wenn die Störlichtquelle sich nicht im zentralen Blickfeld, sondern seitlich vom Auge des Beobachters befindet. Der Flimmereffekt ist am kritischsten einzuschätzen, wenn ein Kraftfahrer in Nord-Süd-Richtung oder umgekehrt an der PV-Anlage vorbeifährt. Eine verkehrsgefährdende Störung durch den Flimmereffekt kann dann auftreten, wenn die Flimmerfrequenz im Bereich 2,5 Hz bis 4 Hz beträgt und gleichzeitig die Länge des Flimmerns 20 sec überschreitet. Deshalb muss ein evtl. durch die PV-Anlage erzeugter Flimmereffekt außerhalb des genannten Frequenzbereiches liegen und/oder die Einwirkzeit muss unter 20 sec liegen. Die Flimmerfrequenz hängt ab von der Geschwindigkeit des vorbeifahrenden Kfz, dem Reihenabstand a der Module und dem Winkel Ausrichtung der Modulreihen und der Fahrtrichtung. Ein Flimmereffekt kann jedoch nur entstehen, wenn die Modultischreihen etwa senkrecht zur Fahrtrichtung ausgerichtet sind.

5.3 Störwirkung durch Ablenkung

Nicht der Information des Kraftfahrers dienende Sehobjekte im Sichtfeld des Kraftfahrers können diesen ablenken und so von seiner Fahraufgabe ablenken. Man wird umso eher auf solche Objekte aufmerksam, je auffälliger sie sind. Die Auffälligkeit eines Objektes steigt mit zunehmender

- Größe
- Helligkeit/Helligkeitskontrast zur Umgebung
- Farbigkeit/Farbkontrast zur Umgebung
- Bewegung (andere Verkehrsteilnehmer)
- Intensität der Änderung des Erscheinungsbildes des Objektes (periodisches oder unregelmäßiges Blinken/Blitzen, Farb- oder Größenänderung, Pendeln)
- Andersartigkeit, bezogen auf die Umgebung
- Neuigkeitscharakter

Erreicht die Auffälligkeit dieser Parameter ein bestimmtes Maß, kommt es zu einer meist unbewussten Blickzuwendung des Kraftfahrers zu dem Sehobjekt = Ablenkung. Bei sehr hoher Auffälligkeit kann die Blickzuwendung und Ablenkung so lange andauern, dass für den Kraftfahrer wichtige Informationen nicht mehr rechtzeitig wahrgenommen werden können - es kann zu verkehrsgefährdenden Situationen kommen. Theoretisch können auch PV-Freiflächenanlagen eine solche Ablenkungsgefahr darstellen.

6 Blend- und Störpotential der geplanten PV-Anlage

6.1 Zeitliches Auftreten der Sonnenlichtreflexion ins Fahrerauge

Um die evtl. von der PV-Anlage ausgehende Blendung zu bewerten, ist es zunächst notwendig, die Wahrscheinlichkeit dafür zu ermitteln, dass von der Anlage reflektiertes Licht in die Blickrichtung eines Kraftfahrers gelangt. Ist eine gewisse Wahrscheinlich-

keit gegeben, muss die Intensität des ins Auge des Kraftfahrers reflektierten Lichts ermittelt werden. Das Blendrisiko insgesamt ergibt sich aus der Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens und der Intensität des ins Auge eines Kraftfahrers reflektierten Sonnenlichts.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Blendrisikos kann mithilfe eines so genannten Sonnenstandsdiagramms ermittelt werden. Bild 2 zeigt das Sonnenstandsdiagramm für Hetzerath in Form eines Polardiagramms. Die roten Linien zeigen den Sonnenstand (Sonnenhöhe γ und Azimut α) für den 15. Tag jedes Monats in Abhängigkeit von der Uhrzeit an. Die Darstellung erfolgt für die Mitteleuropäische Zeit (MEZ) ohne Berücksichtigung der Mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ). Die Uhrzeit ist durch blaue und grüne Punkte gekennzeichnet.

Geometrische Bedingungen: Die Berechnungen wurden für die Sehbedingungen eines Lkw-Fahrers durchgeführt, die hinsichtlich einer Sonnenlichtreflexion ins Fahrerauge kritischer anzusehen sind als die Bedingungen für einen Pkw-Fahrer: Die Augenhöhe eines Lkw-Fahrers beträgt ca. 2,50 m, die des Pkw-Fahrers ca. 1,12 m. Dadurch ergeben sich i.a. kleinere (kritischere) Blickwinkel θ für einen Lkw-Fahrer. Zudem kann eine PV-Anlage vom höher sitzenden Lkw-Fahrer u.U. auf größere Entfernungen gesehen werden, wodurch theoretisch die Einwirkzeit des von der PV-Anlage reflektierten Sonnenlichts erhöht werden kann. Es kann angenommen werden, dass der Fahrer bei einer Fahrt auf einer Autobahn normalerweise auf einen Punkt auf der Fahrbahn blickt, der etwa 100 m vor ihm liegt. Daraus ergibt sich mit der mittleren Augenhöhe von 2,50 m ein vertikaler Winkel σ von ca. $-1,4^\circ$ (Blick leicht nach unten). Dieser Winkel σ wurde bei den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt.

Die Berechnungen erfolgen in beiden Fahrtrichtungen für die Mitte des Fahrstreifens, der dem jeweils untersuchten Feld am nächsten liegt, weil dadurch wieder die kleinsten (kritischsten) Blickwinkel θ berücksichtigt werden.

ψ ist der horizontale Winkel zwischen der momentanen Fahrtrichtung α und der horizontalen Blickrichtung τ Fahrerauge - bestimmter Punkt der PV-Anlage. Nähert sich ein Kfz der PV-Anlage, ändert sich die Blickrichtung τ des Kraftfahrers zur Anlage. Mit der Änderung von τ ändert sich auch der Winkel ψ mit zunehmender Annäherung an die PV-Anlage.

Damit Sonnenlicht in Richtung Kraftfahrerauge reflektiert werden kann, muss der vertikale Blickwinkel des Kraftfahrers λ zur PV-Anlage dem vertikalen Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts δ entsprechen: $\lambda = -\delta$ (wenn λ abwärts gerichtet ist, muss δ aufwärts gerichtet sein und umgekehrt).

Für bestimmte Punkte der Annäherung eines Kfz an die bzw. Vorbeifahrt an der PV-Anlage werden nun mittels google earth die Winkel τ , α , ψ und θ bestimmt. Mit den weiteren Parametern Neigung der Module $\varepsilon = 20^\circ$ nach Süd, der Modultischausrichtung in Ost-West-Richtung, der Fahrtrichtung τ und dem vertikalen Winkel λ werden dann die trigonometrischen Berechnungen zur Ermittlung des Sonnenazimuts α und der vertikalen Sonnenhöhenwinkel γ durchgeführt, unter denen das Sonnenlicht auf

die PV-Module fallen müsste, damit das reflektierte Licht ins Auge eines Kraftfahrers fallen kann.

Die Ergebnisse der Berechnungen werden in das Sonnenstandsdiagramm für Hetzerath eingetragen. Werden die α/γ -Werte für eine Teilfläche berechnet, bildet die Gesamtheit der α/γ -Werte ebenfalls eine Fläche. Werden die α/γ -Werte jedoch für einen Punkt einer Teilfläche berechnet, bildet die Gesamtheit der α/γ -Werte eine Kurve. Haben diese sogenannten γ -Flächen oder γ -Kurven Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, fällt Sonnenlicht ins Kraftfahrerauge; die dazugehörigen Jahres- und Tageszeiten können aus dem Polardiagramm abgelesen werden.

Die Berechnungen erfolgen nur für den „Kernreflex“, der sich aus dem Reflexionsgesetz „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ herleitet, das aber nur für spiegelnde Reflexion gilt. Die Oberflächen von PV-Modulen sind aber nicht ideal spiegelnd, sondern mit einer leichten Struktur versehen, die für eine höhere Lichtabsorption (und damit erhöhten Energieertrag) sorgen als dies bei einer spiegelnden Oberfläche der Fall wäre. Auf der Moduloberfläche lagert sich mit der Zeit eine dünne Staubschicht ab, die auch durch Regen nicht wieder vollständig entfernt wird. Die strukturierte Oberfläche und die leichte Verschmutzung führen zu einer diffuseren Reflexion des Sonnenlichts als bei einer ideal spiegelnden Oberfläche. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass nicht sämtliche Module exakt unter $\varepsilon = 20^\circ$ geneigt und nicht genau in Ost-West-Richtung ($\nu = 90^\circ/270^\circ$) ausgerichtet sind, sondern beide Winkel sind mit einer gewissen, durch die Montage bedingten Toleranz versehen. Diese Faktoren führen dazu, dass das Sonnenlicht z.T. spiegelnd und z.T. gestreut reflektiert wird. Neben dem Kernreflex ist immer auch ein Streureflex vorhanden, der je nach Entfernung Beobachter - PV-Anlage und Grad der Streuwirkung vor dem Kernreflex auftreten kann und erst nach dem Kernreflex wieder verschwindet. Wegen der deutlich geringeren Intensität des Streureflexes muss dieser bei den Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

Berücksichtigt wurden alle Blendwinkel Kraftfahrer - PV-Anlage $\theta \leq 20^\circ$, weil nach Abschnitt 5.1 nur in diesem Winkelbereich reflektiertes Sonnenlicht störende Blendung erzeugen kann.

6.2 Zeitliches Auftreten der Sonnenlichtreflexion ins Fahrerauge

Die Untersuchungen wurden ohne Berücksichtigung des Buschwerks zwischen PV-Anlage und Autobahn durchgeführt.

6.2.1 Fahrtrichtung Nordost

Die Berechnungen werden für die Strecke 700 m vor dem südlichsten Punkt der PV-Anlage bis zur Vorbeifahrt an der Anlage (s. roter Doppelpfeil NO in Bild 1) durchgeführt. Als Berechnungspunkte der PV-Anlage werden zunächst die geometrische Mitte und der südlichste Punkt der PV-Anlage gewählt (Markierungen M und S in Bild 1). Die Blickwinkel θ liegen für den Blick des Kraftfahrers zum südlichsten Punkt der Anlage im Intervall $1,7^\circ$ bis 23° , für den Blick zur PV-Mitte im Intervall 12° bis 45° . Insbesondere beim Blick zum südlichsten Punkt der Anlage liegen die Blickwinkel theoretisch durchaus im blendkritischen Bereich.

Die für diese Situationen berechneten γ -Kurven sind in Bild 2 als braune bzw. blaue Kurve eingezeichnet. Beide γ -Kurven liegen oberhalb der roten Sonnenstandslinien und haben keine Schnittpunkte mit diesen, Sonnenlicht kann nicht zum Kraftfahrer reflektiert werden. Die Lage der γ -Kurven oberhalb der Sonnenstandslinien gibt die Tatsache wieder, dass auf der nördlichen Erdhalbkugel die Sonne nicht aus nördlichen Richtungen scheint und das Sonnenlicht daher nicht in Richtung Süden bis Südwesten, d.h. ins Auge eines in Richtung Norden bis Nordosten blickenden Kraftfahrers, reflektiert werden kann. Wie ausgeführt, wurden die Berechnungen für die geometrische PV-Mitte und den südlichen Punkt der PV-Anlage durchgeführt. Von allen nördlich der PV-Mitte gelegenen Flächenanteilen der PV-Anlage kann demgemäß erst recht kein Sonnenlicht in Richtung Süden zum Kraftfahrer reflektiert werden. Daher kann die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion für die gesamte PV-Anlagenfläche (Ermittlung der γ -Flächen, s. Abschnitt 6.1) entfallen.

Fazit: Bei der Vorbeifahrt in Richtung Nordost wird kein Sonnenlicht zum Kraftfahrer reflektiert, Blendung kann nicht auftreten.

6.2.2 Fahrtrichtung Südwest

Die Berechnungen werden für die Strecke Ausfahrt des Parkplatzes bis zur Vorbeifahrt an der PV-Anlage (s. roter Doppelpfeil SW in Bild 1) durchgeführt. Als Berechnungspunkte der PV-Anlage wird zunächst einmal der südlichste Punkt der PV-Anlage gewählt. Die Blickwinkel θ liegen hier zwischen $2,4^\circ$ und $11,8^\circ$, also theoretisch wieder im blendkritischen Bereich. Als zweiter Berechnungspunkt kommt in dieser Fahrtrichtung nicht die PV-Mitte infrage, weil die Blickwinkel θ bei jeder Entfernung deutlich größer als 20° sind, bei denen keine Blendung mehr entstehen kann. Stattdessen wurde jeweils der Punkt auf der PV-Anlage ausgewählt, bei der der Blickwinkel gerade $\theta = 20^\circ$ beträgt.

Die für diese Situationen berechneten γ -Kurven sind in Bild 2 als schwarze bzw. braune Kurve eingezeichnet. Die γ -Kurven liegen unterhalb des Sonnenstandsdiagramms, sie haben keine Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, von der PV-Anlage kann kein Licht in Richtung Kraftfahrer reflektiert werden.

Wenn γ -Kurven unterhalb des Polardiagramms liegen, kann rechnerisch nur bei negativen Sonnenständen (die Sonne steht unterhalb des Horizonts) Sonnenlicht ins Fahrerauge reflektiert werden. In der Realität bedeutet diese Aussage, dass der Kraftfahrer nur die Modulrückseiten sieht und das Sonnenlicht immer über das Kfz hinweg reflektiert wird. Dieser Sachverhalt ist in Bild 3 zur besseren Erläuterung auch schematisch dargestellt. Da alle anderen Teile der PV-Anlage von einem in Richtung Südwest fahrenden Kraftfahrer unter größeren Blickwinkeln als 20° gesehen werden, kann von diesem Teil der PV-Anlage theoretisch zwar evtl. reflektiertes Sonnenlicht ins Fahrerauge gelangen, das aber nicht berücksichtigt zu werden braucht, da dieses reflektierte Sonnenlicht wegen des großen Blickwinkels aber keine Blendung mehr erzeugen kann. Außerdem wird dieses Sonnenlicht nur im Zeitraum August/September zum Kraftfahrer reflektiert, dann verhindert aber das belaubte Buschwerk die Reflexion zum Kraftfahrer. Auch in dieser Fahrtrichtung kann daher die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion für die gesamte PV-Anlagenfläche entfallen.

Fazit: Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer ist auch in Fahrtrichtung Südwest ausgeschlossen, Blendung kann auch in dieser Fahrtrichtung nicht entstehen.

6.3 Flimmereffekt

Wie bereits in Abschnitt 5.2 ausgeführt, entsteht der Flimmereffekt bei der Vorbeifahrt an einer PV-Anlage dadurch, dass die PV-Module in Reihen mit einem konstanten Abstand voneinander angebracht sind, wodurch es zu einer periodischen Unterbrechung des reflektierten Sonnenlichts kommt, wenn dieses Licht ins Auge des Kraftfahrers gelangt. Ein Flimmereffekt kann jedoch nur entstehen, wenn die Modultischreihen etwa senkrecht zur Fahrtrichtung ausgerichtet sind. In Hetzerath beträgt der Winkel zwischen Modultischausrichtung und Fahrtrichtung jedoch nur ca. 35°, bei der Vorbeifahrt würden, wenn überhaupt von der PV-Anlage reflektiertes Sonnenlicht den Kraftfahrer erreichen würde, sich die Sonnenreflexe gegenseitig überlappen, es käme zu keinem Flimmereffekt.

Fazit: Ein Flimmereffekt kann bei der Vorbeifahrt an der PV-Anlage Hetzerath nicht auftreten.

6.4 Ablenkung

Eine PV-Anlage, bestehend im Wesentlichen aus regelmäßig angeordneten, eher dunklen Solarmodulen, die zudem eine maximale Bauhöhe von maximal 3,50 m über Geländeoberkante hat, ist ein visuell unauffälliges Bauwerk, insbesondere auch angesichts der Tatsache, dass die PV-Anlage tiefer liegt als die Autobahn und Sonnenlicht praktisch nie zum Kraftfahrer gelenkt werden kann. Ein Flimmereffekt kann ebenfalls nicht auftreten. Als einziges, die Auffälligkeit erhöhendes Merkmal, bleibt theoretisch der Neuigkeitscharakter der Anlage. In diesem Aspekt unterscheidet sich die PV-Anlage aber nicht von jedem beliebigen anderen neu errichteten Bauwerk, das von einer Straße aus sichtbar ist. Mittlerweile befinden sich PV-Freiflächenanlagen an vielen Autobahnen sowie an einer Reihe von nachgeordneten Straßen, so dass es die Autofahrer gewohnt sind, an solchen Anlagen vorbeizufahren.

Fazit: Eine erhöhte Aufmerksamkeit und Ablenkungsgefahr durch die PV-Anlage kann daher insgesamt ausgeschlossen werden.

7 Zusammenfassung

Bei der Vorbeifahrt auf der BAB A 1 an der PV-Anlage Hetzerath kann kein Sonnenlicht zum Kraftfahrer reflektiert werden, eine Blendung ist ausgeschlossen. Ein Flimmereffekt oder eine erhöhte Auffälligkeit treten ebenfalls nicht auf. Insgesamt kann eine Gefährdung des Straßenverkehrs auf der BAB A 1 durch die von der Fa. WES Green GmbH geplante Photovoltaik-Freiflächenanlage Hetzerath mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Von daher ist gegen die Errichtung der PV-Anlage nichts einzuwenden.



Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.

Anhang

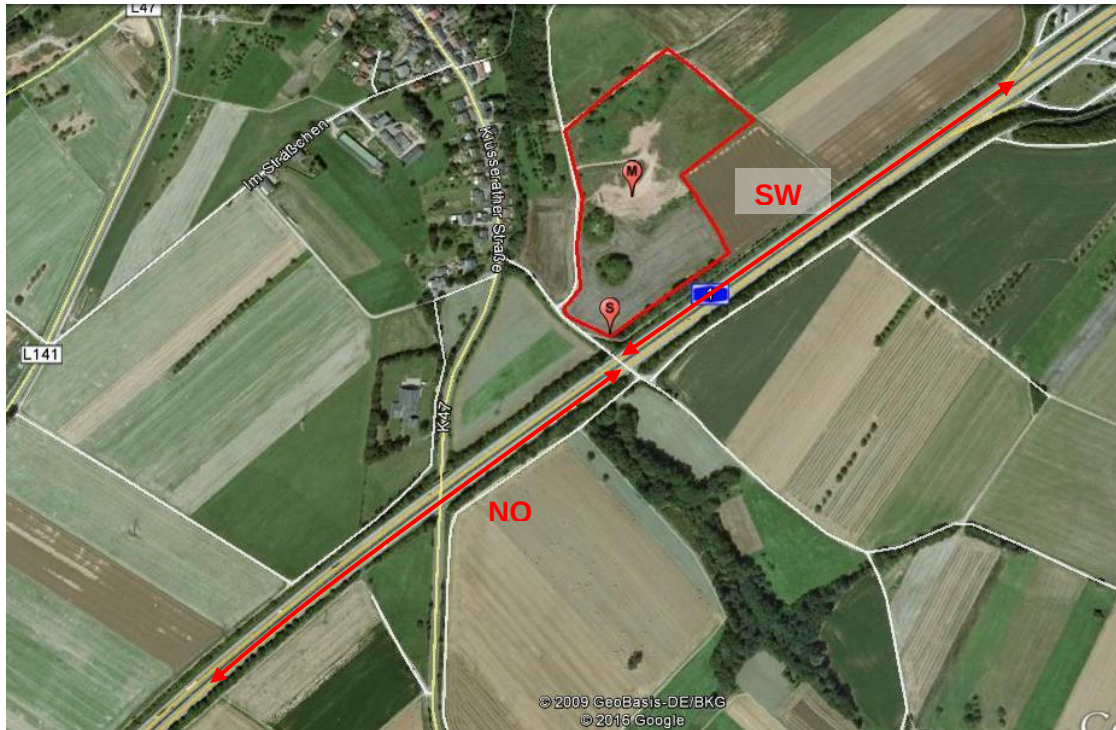


Bild 1: Schematische Darstellung der geplanten PV-Anlage Hetzerath

Markierung M: Geometrische Mitte der PV-Anlage

Markierung S: Südlichster Punkt der PV-Anlage

Doppelpfeil NO: untersuchter Streckenabschnitt in Fahrtrichtung Nordost

Doppelpfeil SW: Untersuchter Streckenabschnitt in Fahrtrichtung Südwest

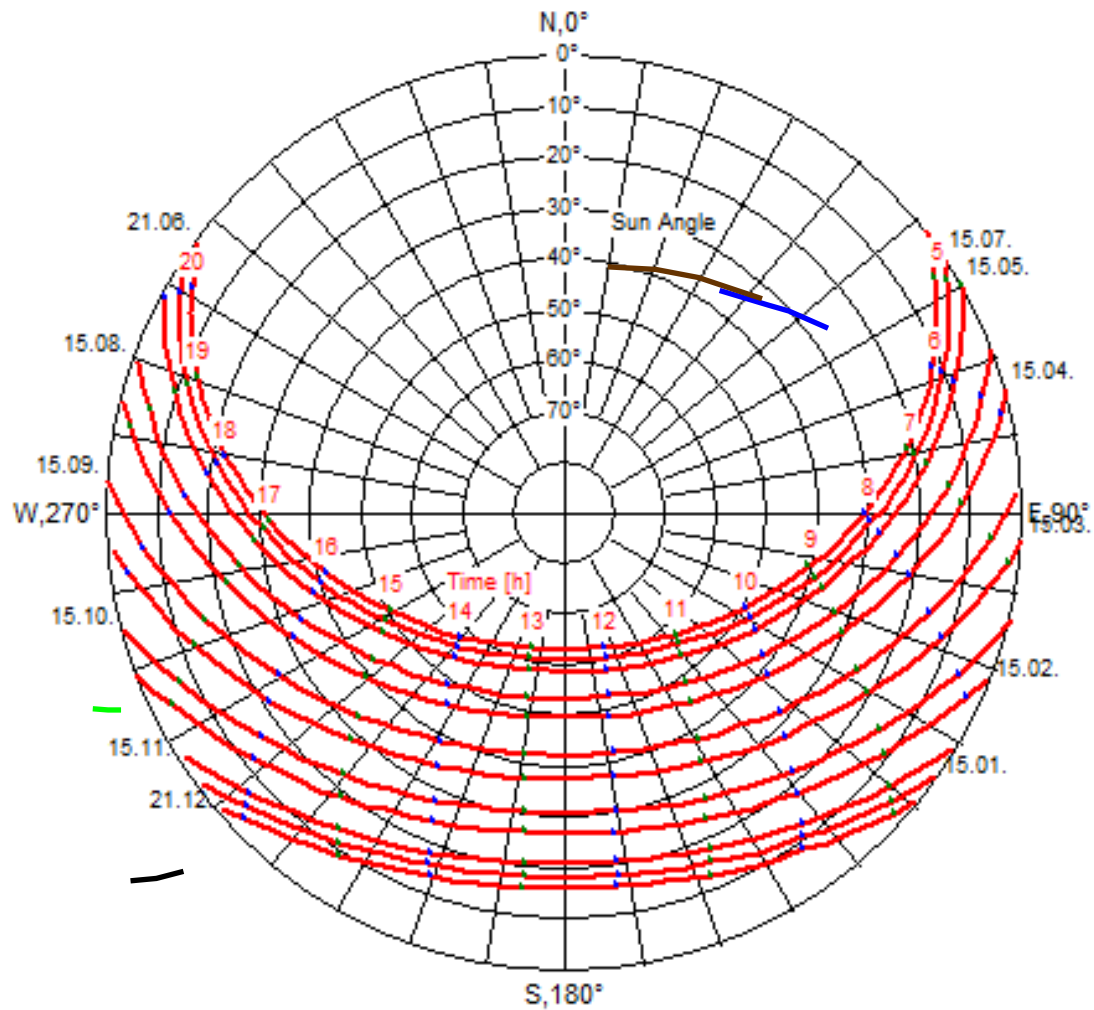


Bild 2: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung; rote Linien) für Hetzerath mit γ -Kurven für die Vorbeifahrt auf der BAB A 1 an der PV-Anlage

γ -Kurven im oberen Teil des Sonnenstandsdiagramms: Fahrtrichtung Nordost

braune Kurve: Mitte PV-Anlage

blaue Kurve: Südlichster Punkt der PV-Anlage

γ -Kurven unterhalb des Sonnenstandsdiagramms: Fahrtrichtung Südwest

schwarze Kurve: Südlichster Punkt der PV-Anlage

grüne Kurve: Blickwinkel $\theta = \max. 20^\circ$

Quelle des Sonnenstandsdiagramms: www.stadtklima-stuttgart.de

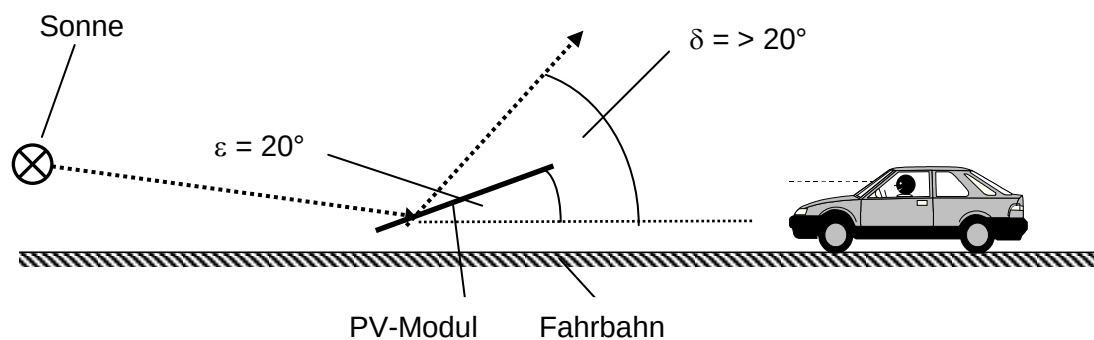


Bild 3: Bei Fahrt in südliche Richtungen wird das Sonnenlicht immer über ein Fahrzeug hinweg reflektiert.

Dr. Hans Meseberg
LSC Lichttechnik und Straßenausstattung Consult
Fährstr. 10
13503 Berlin
Tel. und Fax 030/82707832
Email: hmeseberg@t-online.de

Berlin, den 9. Oktober 2016

**Gutachten
G16/2016
zur Frage der eventuellen Blend- und Störwirkung
von auf dem Flugplatz Trier-Föhren startenden und landenden Piloten
durch eine im Bereich der Ortslage Hetzerath installierte PV-Freiflächenanlage**

(Dieses Gutachten besteht aus 12 Seiten
und einem Anhang mit 2 weiteren Seiten)

1 Auftraggeber

1.1.1

Den Auftrag zur Erarbeitung des Gutachtens erteilte die WES Green GmbH, Postfach 4124 in 54231 Trier.

Auftragsdatum: 29. September 2016

2 Auftragsache

Die WES Green GmbH plant die Errichtung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage bei Hetzerath in der Nähe des Flugplatzes Trier-Föhren. Es stellt sich die Frage, ob Piloten, die auf diesem Flugplatz starten oder landen, durch Sonnenlicht, das von der Oberfläche der PV-Module reflektiert wird, geblendet oder in sonst unzumutbarer Weise gestört werden. Dieses Gutachten dient der Klärung der Frage, ob und mit welcher Häufigkeit solche Situationen entstehen können und falls ja, welche Abhilfemöglichkeiten bestehen.

3 Definitionen

Im Folgenden wird der Richtung Nord der horizontale Winkel $\alpha = 0^\circ$ zugeordnet; der Winkel steigt mit dem Uhrzeigersinn (Ost: $\alpha = 90^\circ$; Süd: $\alpha = 180^\circ$ usw.)

Es werden folgende Winkel verwendet:

Sonnenhöhenwinkel (vertikaler Sonnenwinkel)	γ
Azimut (horizontaler Sonnenwinkel) bzw. momentane Flugrichtung/Ausrichtung Start- und Landebahn	α
Orientierung der Modulreihen (Tische)	α_M

Orientierung der Modulreihen gegen Ost oder West $\alpha_M - 90^\circ$ bzw. $\alpha_M - 270^\circ$	ν
Vertikaler Winkel des von den Solarzellen reflektierten Lichts	δ
Steig- oder Sinkwinkel eines Flugzeuges	σ
Blendwinkel (gebildet durch die Blickrichtung des Piloten - Richtung reflektiertes Sonnenlicht)	θ
Neigung der PV-Module gegen Süd	ε
horizontaler Blickwinkel Pilot- PV-Anlage	τ
Vertikaler Blickwinkel Pilot - PV-Anlage	λ
Differenz $\alpha - \tau$ (Differenz Blickrichtung Pilot - PV-Anlage)	ψ

4 Topografische Daten und Angaben zur Photovoltaik-Anlage

Die topografischen Daten und die Beschreibung der Anlage beruhen auf folgenden Informationen, die von der WES Green GmbH zur Verfügung gestellt wurden:

- Lageplan der PV-Anlage
- Höhenplan der PV-Anlage
- Modullayout
- Vorhabenbeschreibung
- Fotos
- Mündliche und Emailinformationen von Frau Julia Pape, WES Green GmbH

Die Flugplatzinformationen wurden der Homepage des Flugplatzes entnommen.

Verwendete Programme: Die Geländehöhen der PV-Anlage wurden dem Höhenplan entnommen. Der monatliche Sonnenstand für Hetzerath (Sonnenhöhe und -azimut) wurde mit der Website www.stadtklima-stuttgart.de ermittelt. Alle Entfernungen und horizontalen Winkel wurden mit google earth berechnet. Die Berechnung der Winkel des reflektierten Sonnenlichts erfolgte mit eigenen Excel-Programmen.

4.1 Topografische Daten

Die PV-Anlage wird auf dem Gelände einer ehemaligen Kiesgrube errichtet. Die PV-Fläche hat eine unregelmäßige Form (s. Bild 1 im Anhang). Das PV-Anlagengelände ist hügelig; die Geländeoberkante (GOK) steigt von West nach Ost von ca. 189,5 m auf ca. 197, 5 m über NN an. Das Gelände wird vor der Installation der PV-Anlage noch planiert; die Geländehöhen ändern sich dadurch praktisch nicht. Innerhalb des PV-Anlagengeländes bleiben am linken Rand zwei Teilflächen wegen dort stehender Hochspannungsmasten frei (in Bild 1 nicht eingezeichnet).

Der Flugplatz besitzt eine Start- und Landebahn (SLB) von 1200 m Länge und 30 m Breite. Die Ausrichtung der SLB beträgt $\alpha = 42^\circ/222^\circ$. Die SLB liegt auf einer Höhe über NN von 203 m.

Die PV-Anlage befindet sich etwa nordöstlich der SLB; der kleinste Abstand Mitte PV-Anlage - SLB beträgt ca. 2040 m.

4.2 Beschreibung der PV-Anlage

Die Gesamtfläche der PV-Anlage beträgt ca. 7,2 ha, die installierte Leistung 4,39 MW_{peak}. Die Neigung ε der Module gegen Süd beträgt 20°. Es werden polykristalline Solarmodule des Modultyps Canadian Solar CS6P-P-WS 265 mit einer Leistung von je 265 W_{peak} eingebaut. Die Module werden auf sogenannten Modultischreihen montiert, deren Länge der jeweils verfügbaren Breite des PV-Anlagengeländes entspricht. Die Modultischreihen sind in Ost-West-Richtung ausgerichtet.

Modulober- und -unterkante befinden in einer Höhe von 3,50 m bzw. 0,80 über GOK, die mittlere Modulhöhe über GOK ergibt sich daraus zu 2,15 m. Die Module werden auf einem sogenannten Tisch montiert; Im Querschnitt eines Tisches werden 3 Module hochkant angeordnet. Die Tiefe eines Tisches (in Draufsicht gesehen) beträgt 4,635 m, der lichte Abstand zwischen den Modultischreihen (Gang zwischen den Modultischreihen) ca. 3 m. Daraus errechnet sich ein mittlerer Reihenabstand a (Abstand Moduloberkante einer Tischreihe zu Moduloberkante der nächsten Tischreihe) von 4,635 m + 3 m = ca. 7,64 m.

5 Beschreibung der eventuell von PV-Anlagen ausgehenden Blend- und Störfwirkungen

5.1 Blendwirkung

Unter Blendung versteht man eine vorübergehende Funktionsstörung des Auges, die, ganz allgemein ausgedrückt, durch ein Übermaß an Licht hervorgerufen wird. Liegt eine messbare Beeinträchtigung der Sehleistung vor, spricht man von **physiologischer Blendung**, wird die Blendwirkung dagegen subjektiv als unangenehm, störend oder ablenkend empfunden, ohne dass eine messbare Beeinträchtigung der Sehleistung vorhanden ist, liegt **psychologische Blendung** vor. Sind die Leuchtdichten des Umfeldes so groß, dass das visuelle System nicht mehr in der Lage ist, auf diese zu adaptieren, handelt es sich um **Absolutblendung**, sonst um **Adaptationsblendung**. Weiterhin differenziert man zwischen **direkter Blendung**, die durch eine Lichtquelle selbst ausgelöst wird, und **indirekter Blendung**, die durch das Reflexbild einer Lichtquelle erzeugt wird.

Die bei Tageslicht am häufigsten auftretende Blendung wird von der Sonne verursacht. Befindet sich die Sonne im zentralen Gesichtsfeld des Piloten, tritt Absolutblendung auf, bei der man nicht mehr in der Lage wäre, ein Flugzeug sicher zu führen, da im Gesichtsfeld keine Kontraste mehr erkennbar sind. Dieser sehr gefährlichen Situation kann man sich meist entziehen, indem die Sonne gegenüber dem Auge abgeschattet wird (durch eine Hand oder in einem Kfz durch Herunterklappen der Sonnenblende; Veränderung der Kopfposition derart, dass sich z.B. in einem Kfz der Innenspiegel vor die Sonne schiebt oder dass sich in einem Cockpit die Sonne außerhalb der Fenster befindet) oder indem man etwas zur Seite schaut, damit sich die Sonne nicht im zentralen Teil des Gesichtsfeldes befindet. Das Aufsetzen einer Sonnenbrille hilft hier nicht viel, da dadurch nicht nur die Intensität des Sonnenlichtes reduziert wird, sondern auch die Helligkeiten aller anderen Objekte im Gesichtsfeld herabgesetzt werden.

Häufig wird das Licht der Sonne auch durch glänzende Objekte ins Auge eines Piloten gespiegelt: Wasseroberflächen, Fensterfronten von Gebäuden, verglaste Treibhäuser, Gegenüber der direkten Sonnenblendung ist bei dieser indirekten Blendung die tatsächliche Blendgefahr geringer:

1. Das reflektierte Sonnenlicht hat immer eine geringere Intensität als das direkte Sonnenlicht, es kommt selten zu einer Absolutblendung, sondern meist „nur“ zu Adaptationsblendung. Die Helligkeitskontraste sind dann zwar verringert und die Wahrnehmung von Objekten wird erschwert, aber selten so stark, dass verkehrsgefährdende Situationen entstehen.
2. Die Blendwirkung ist zeitlich und örtlich sehr begrenzt, während die Sonnenblendung über längere Zeit auf den Menschen einwirken kann.

Ob eine Blendung auftritt, ist sehr stark vom Winkel θ , gebildet von der Blickrichtung eines Beobachters (z.B. bei einer Landung der Blick des Piloten zur SLB) und der Verbindungslinie Auge des Beobachters - blendende Lichtquelle (z.B. Auge des Piloten zur PV-Anlage) abhängig. **Bei Nacht** nimmt die Blendempfindlichkeit B proportional mit dem reziproken Wert des Winkelquadrats zu: $B \sim 1/\theta^2$. Bei Nacht wird physiologische Blendung deshalb nur in einem Winkelbereich $\theta \pm 30^\circ$, bezogen auf die Blickrichtung, berücksichtigt; Licht aus größeren Winkeln liefert keinen nennenswerten Beitrag zur Blendung. **Bei Tageslicht** hat man andere Verhältnisse: Die Gesamthelligkeit ist um mehrere Zehnerpotenzen höher als bei Nacht. Die evtl. blendenden Objekte werden nicht wie bei Nacht gegen eine meist lichtlose Umgebung gesehen, sondern die Umgebung hat ebenfalls eine gewisse Helligkeit. Diese beiden Unterschiede führen dazu, dass tagsüber Blendungseffekte eher selten auftreten. Die reziprok quadratische Abhängigkeit der Blendung vom Winkel θ gilt auch nicht mehr unbedingt; allerdings nimmt auch bei Tageslicht die Blendung deutlich zu, wenn der Blickwinkel θ kleiner wird.

Für die Nacht gibt es klare Anforderungen an die Begrenzung der Blendung, die von leuchtenden Objekten ausgeht. Für die Bewertung von Blend- oder anderen visuellen Störeffekten, die von Bauwerken oder anderen technischen Anlagen bei Tageslicht erzeugt werden, gibt es überhaupt keine Regelwerke oder Vorschriften. Deshalb ist man hier auf Einzelfallbetrachtungen und -entscheidungen angewiesen.

Der Blickwinkel θ ist bei Tageslicht weniger kritisch zu sehen als bei Nacht. Bei Tageslicht liefert störendes Licht aus **Winkeln $\theta > 20^\circ$** keinen merklichen Beitrag zur Blendung und kann außer Betracht bleiben. Störendes Licht aus einem **Winkelbereich $10^\circ < \theta \leq 20^\circ$** kann u.U. eine moderate Blendung erzeugen. I.a. kann man Blendung wie oben beschrieben durch leichtes Zur-Seite-Schauen oder „Ausblenden“ der störenden Lichtquelle vermeiden. Dieser Winkelbereich sollte aber bei einer Blendungsbewertung mit in Betracht gezogen werden. Kritischer sind **Blendwinkel $5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$** , und besonders kritisch Winkel $\theta \leq 5^\circ$, wenn also die störende Lichtquelle direkt im Gesichtsfeld des Beobachters liegt. Ein Pilot hat nicht mehr die Möglichkeit, diese Lichtquelle „auszublenken“, da er z.B. bei einer Landung die vor ihm liegende SLB und deren Umgebung beobachten muss und seinen Blick daher nicht beliebig zur Seite

richten kann, um einem evtl. vorhandenen Blendreflex auszuweichen. Ob bei solch kleinen Winkeln tatsächlich Blendung vorliegt, hängt in entscheidendem Maß davon ab, wie hoch die Intensität des Störlichts im Verhältnis zur Umgebungshelligkeit und v.a. zur Intensität des direkten Sonnenlichts ist. Hierfür ein Beispiel: An einem klaren Sonnentag kann die im Zenit stehende Sonne am Auge eines Beobachters eine Beleuchtungsstärke von 110 000 lx erzeugen. Wenn gleichzeitig eine Störlichtquelle eine zusätzliche Beleuchtungsstärke von 1000 lx beim Beobachter erzeugt, so blendet diese Störlichtquelle weniger, als am Abend eine Störlichtquelle mit einer Blendbeleuchtungsstärke von 500 lx, wenn gleichzeitig die Sonnenbeleuchtungsstärke nur 5000 lx beträgt.

Die Reflexion eines Solarmoduls hängt stark vom Einfallswinkel des Sonnenlichts auf die Moduloberfläche ab. Wenn die Sonne mittags hoch am Himmel steht, fällt das Sonnenlicht etwa senkrecht auf die Moduloberfläche (Einfallswinkel 90°), es wird weniger als 10 % reflektiert; die Intensität des von der Moduloberfläche reflektierten Lichts beträgt also nur einen Bruchteil der Intensität des Sonnenlichts selbst und kann daher keine Blendung erzeugen. Wenn die Sonne morgens oder abends tief am Himmel, d.h. nahe am Horizont steht, fällt das Sonnenlicht zwar sehr streifend auf die Moduloberfläche (Einfallswinkel nahe 0°), es wird fast das gesamte Sonnenlicht reflektiert, aber die Intensität der auf- oder untergehenden Sonne ist so gering, dass diese keine Blendung erzeugt - bekanntermaßen kann man einen Sonnenauf- oder -untergang ohne weiteres mit bloßem Auge betrachten. Demzufolge kann auch das reflektierte Sonnenlicht in dieser Situation keine Blendung erzeugen.

Die Oberflächen von PV-Modulen sind nicht ideal spiegelnd, sondern mit einer leichten Struktur versehen, die für eine höhere Lichtabsorption (und damit erhöhten Energieertrag) sorgen als dies bei einer spiegelnden Oberfläche der Fall wäre. Auf der Moduloberfläche lagert sich mit der Zeit eine dünne Staubschicht ab, die auch durch Regen nicht wieder vollständig entfernt wird. Die strukturierte Oberfläche und die leichte Verschmutzung führen zu einer diffuseren Reflexion des Sonnenlichts als bei einer ideal spiegelnden Oberfläche. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass nicht sämtliche Module exakt unter $\varepsilon = 20^\circ$ geneigt und unter $\alpha_M = 90^\circ/270^\circ$ ausgerichtet sind, sondern beide Winkel sind mit einer gewissen, durch die Montage bedingten Toleranz versehen. Diese drei Einflussgrößen führen dazu, dass bei dem jeweiligen Einfallswinkel nicht der dem zugehörigen Reflexionsgrad entsprechende Anteil von Licht in die durch das Reflexionsgesetz vorbestimmte Richtung reflektiert wird, sondern ein geringerer Anteil. Dieser Anteil kann nicht genau quantifiziert werden, da die genauen Reflexionseigenschaften des verwendeten Moduls nicht bekannt sind und die Montagetoleranzen nicht vorhergesagt werden können. Erfahrungsgemäß ist damit zu rechnen, dass der Anteil des reflektierten Lichts durch diese drei Einflussgrößen gegenüber dem theoretischen Wert um ca. 40 % verringert wird.

Befindet sich die PV-Anlage in größerer Entfernung als 1000 m vom Beobachter entfernt, wird das reflektierte Sonnenlicht zusätzlich durch die atmosphärische Trübung, die in bodennahen Schichten der Atmosphäre besonders wirksam ist, gestreut und damit geschwächt. Dieser Effekt hängt von der Art der Umgebung (z.B. Industriegebiet, wald- oder seenreiche Region), dem Wetter und der Entfernung zwischen dem Beobachter und der PV-Anlage ab und kann daher nur grob abgeschätzt werden.

Aus diesen Gründen muss zur Bewertung der Blendgefahr die Beleuchtungsstärke (Intensität) der Blendlichtquelle ins Verhältnis zur Beleuchtungsstärke der Sonne gesetzt werden, wenn Sonnenlicht innerhalb des kritischen Blickwinkelbereiches $\theta \leq 20^\circ$ das Auge eines Piloten erreicht.

5.2 Flimmereffekt

Periodisch oder unregelmäßig an- und abschwellendes Licht, das ins Auge gelangt, wird als Flimmern bezeichnet. Flimmereffekte werden z. B. von Leuchtstoff- und Energiesparlampen und von Bildschirmen erzeugt. Das menschliche Auge kann die einzelnen Hell-/Dunkelphasen in Abhängigkeit von der Helligkeit und dem Betrachtungswinkel zur Lichtquelle bis zu einer Frequenz von 50 bis 80 Hz unterscheiden. Im Verkehrswesen wird Flimmern durch die periodisch angeordneten Leuchten der Straßen- oder Tunnelbeleuchtung erzeugt. Aber auch der unregelmäßige Hell-/Dunkel-Wechsel, der z.B. beim Durchfahren einer lichten Baumallee entsteht, wird als Flimmern bezeichnet. Flimmern wird allgemein als unangenehme, störende Lichterscheinung empfunden. Das gilt sowohl für das Flimmern von Lampen und Bildschirmen - es ist bekannt, dass Flimmern bei manchen Epileptikern sogar Anfälle auslösen kann (photosensitive Epilepsie) - als auch das von Straßenleuchten oder Baumalleen erzeugte Flimmern. Störungen durch den Flimmereffekt sind erst dann zu erwarten, wenn die Länge des Flimmerns 20 sec überschreitet. Der Flimmereffekt kann jedoch nur auftreten, wenn sich ein Beobachter in unmittelbarer Nähe der PV-Anlage befindet und etwa senkrecht an den Modulreihen vorbei bewegt. Beide Bedingungen treffen aber beim Flugplatz Trier-Föhren nicht zu (s. Abschnitt 7.3), ein Flimmereffekt kann dort für Piloten nicht auftreten.

5.3 Störf Wirkung durch Ablenkung

Die visuelle Informationsaufnahme eines Piloten während des Fliegens ist ein sehr komplexer Prozess. Er besteht im Wesentlichen aus drei Schritten: Unter **Sehen** ist die Erzeugung einer physiologischen Erregung im Auge durch einen physikalischen Reiz zu verstehen, der in Form einer elektromagnetischen Strahlung vom leuchtenden Objekt ausgeht und ins Auge des Beobachters fällt. Sehen in diesem Sinne ist ein rein physikalisch-physiologischer Vorgang. **Wahrnehmen** bedeutet, dass die im Auge erzeugte und ins Gehirn weitergeleitete Erregung dort eine bewusst erlebte Empfindung hervorruft, beispielsweise einen Leuchtdichte- oder Farbunterschied zwischen dem Objekt und seiner Umgebung. **Erkennen** heißt, dass die Form des Sehobjektes und seine Bedeutung erkannt, genauer gesagt, durch Vergleich des wahrgenommenen Objektes mit im Gedächtnis gespeicherten "Vorlagen" wiedererkannt wird. Während dieser Prozess abläuft, muss der Pilot zusätzlich entscheiden, ob der Informationsgehalt der erkannten Sehobjekte innerhalb seines Blickfeldes für sein weiteres Verhalten wichtig oder überflüssig ist; davon sind seine weiteren Flug- oder Fahrmanöver abhängig. Dieser mehrstufige Prozess spielt sich in wenigen Sekunden, manchmal sogar in Sekundenbruchteilen ab und wiederholt sich ständig. Der Prozess kann jedoch nicht immer ungestört ablaufen. Externe Einflussfaktoren, die die Aufmerksamkeit des Piloten zusätzlich beanspruchen, können zu Störungen des visuellen Prozesses führen. Der Pilot kann durch überwiegend visuelle Sehobjekte von seiner Flugaufgabe abge-

lenkt werden. Dies können an sich harmlose Objekte sein wie interessante Bauwerke (Gebäude, Brücken, Industrieanlagen - z.B. Raffinerien), Gebirgsformationen, Flusslandschaften oder Seen.

Man wird umso eher auf solche Objekte aufmerksam, je auffälliger sie sind. Die Auffälligkeit eines Objektes steigt mit

1. der Größe
2. der Helligkeit/Helligkeitskontrast zur Umgebung
3. der Farbigkeit/Farbkontrast zur Umgebung
4. der Bewegung (z.B. andere Flugzeuge)
5. der Intensität der Änderung des Erscheinungsbildes des Objektes (periodisches oder unregelmäßiges Blinken/Blitzen, Farb- oder Größenänderung, Pendeln)
6. der Andersartigkeit, bezogen auf die Umgebung
7. dem Neuigkeitscharakter
8. der Nähe zur Blickrichtung.

Erreicht die Auffälligkeit dieser Parameter ein bestimmtes Maß, kommt es zu einer meist unbewussten Blickzuwendung des Beobachters zu dem Sehobjekt = Ablenkung. Bei sehr hoher Auffälligkeit kann die Blickzuwendung und Ablenkung so lange andauern, dass für den Flug- oder Straßenverkehr wichtige Informationen nicht mehr rechtzeitig wahrgenommen werden können - es kommt unter Umständen zu verkehrsfährdenden Situationen.

6 Beschreibung der Blend- und Störwirkungen für Flugzeugführer

Die in 5.1 bis 5.3 beschriebenen Blend- und Störwirkungen sind aus Erfahrungen für den Straßenverkehr abgeleitet. Sie gelten grundsätzlich auch für Piloten. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich die Sehaufgabe eines Flugzeugführers wesentlich von der eines Kraftfahrers unterscheidet: Letzterer orientiert sich - trotz Navigations- und anderer Fahrerassistenzsysteme - über die Verkehrssituation fast ausschließlich mittels des Sehapparates (Auge-Nervenleitung-Gehirn). Er muss ständig die wechselnden visuellen Eindrücke aufnehmen, verarbeiten und daraus seine Fahrmanöver ableiten. Ein Pilot hat eine Vielzahl technischer Einrichtungen zur Verfügung, die ihn bei der Flugaufgabe unterstützen. Er muss natürlich trotzdem auf andere Luftfahrzeuge achten, Wolken und andere Wettererscheinungen registrieren, die unter bzw. vor ihm liegende Landschaft zur Orientierung nutzen. Der Flugzeugführer blickt etwa horizontal aus der Kanzel; ein Blick nach unten ist schon bauartbedingt bei den meisten Flugzeugen kaum möglich. Obwohl die Sehaufgaben eines Kraftfahrers und eines Piloten unterschiedlich sind, müssen an die Blendungsbegrenzung die gleichen Anforderungen gestellt werden.

Dies gilt trotz der Tatsache, dass es Piloten gewohnt sind, Seen und Flüsse zu überfliegen, die das Sonnenlicht intensiver und länger reflektieren als ein relativ kleines künstliches, glänzendes Objekt, wie es eine PV-Anlage darstellt. Piloten berichten, dass der Effekt der Sonnenlichtreflexion durch PV-Freiflächenanlagen vergleichbar ist mit der Sonnenlichtreflexion durch Gewässer. Größere PV-Anlagen werden mittlerweile sogar auf Flughäfen selbst installiert (z.B. in Deutschland an Verkehrsflughäfen in

München und Saarbrücken und vielen kleineren Flugplätzen), ohne dass Klagen über Blendung oder auch nur Irritation von Piloten bekannt geworden sind.

7 Blend- und Störpotential der geplanten PV-Anlage

Um die evtl. von der PV-Anlage ausgehende Blendung zu bewerten, ist es zunächst notwendig, die Wahrscheinlichkeit dafür zu ermitteln, dass von der Anlage reflektiertes Licht in die Blickrichtung eines Piloten gelangt. Ist eine gewisse Wahrscheinlichkeit gegeben, muss die Intensität des ins Pilotenauge reflektierten Lichts unter Berücksichtigung des relevanten Blickwinkels Pilot - PV-Anlage ermittelt werden. Das evtl. Blendrisiko insgesamt ergibt sich aus der Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens und der Intensität des ins Pilotenauge reflektierten Sonnenlichts.

7.1 Bestimmung der kritischen Blendwinkel θ

Als erster Schritt zur Berechnung der evtl. von der PV-Anlage hervorgerufenen Blendwirkung sind die im Raum liegenden Blickwinkel θ (Blendwinkel) zu berechnen, unter denen der Pilot eines startenden oder landenden Flugzeugs die PV-Anlage sieht. Die Blickwinkel wurden für die Flugrichtung $\alpha = 42^\circ$ bzw. 222° und die Standardsteig- und -sinkwinkel $\sigma = 3^\circ$ sowie auch für andere, manchmal vorkommende Winkel $\sigma = 1^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ und 20° berechnet. Beim Standardsinkwinkel $\sigma = 3^\circ$ wurden die Berechnungen zusätzlich für „Landungen aus ungewohnter Position“ durchgeführt, bei denen das Flugzeug sich der SLB aus Landerichtungen von maximal $42^\circ/222^\circ \pm 15^\circ$ annähert und erst kurz vor dem Aufsetzen auf die normale Landerichtung $42^\circ/222^\circ$ einschwenkt. Die Berechnungen wurden für Entfernungen des Flugzeuges von bis zu 3 km von der SLB bzw. der PV-Anlage durchgeführt. Als Aufsetzpunkt wurde der Punkt 100 m nach Beginn der SLB gewählt, als Startpunkt 2/3 der Länge der SLB. Als Bezugspunkt der PV-Anlage wurde deren geometrische Mitte verwendet. In Tabelle 1 sind die für die jeweilige Flugsituation vorkommenden minimalen Blickwinkel zusammengestellt (Markierung M in Bild 1).

Flugrichtung	Winkel α	bei	Winkel θ
Nordost	42°	Start	$24,5^\circ$
	42°	Landung	$12,0^\circ$
	27° 57°		$23,9^\circ$ $5,7^\circ$
Südwest	222°	Start	R
	222°	Landung	$21,9^\circ$
	207°		$30,0^\circ$
	237°		$12,3^\circ$

Tabelle 1: Minimale Winkel ψ für Starts und Landungen auf der SLB Trier-Föhren
R: Der Pilot hat die PV-Anlage im Rücken.

7.2 Zeitliches Auftreten der Sonnenlichtreflexion ins Fahrerauge

Zu untersuchen sind alle Situationen, bei denen $\theta < 20^\circ$ ist (in Tabelle 1 fett gedruckt), weil nach Abschnitt 5.1 bei größeren Winkeln θ kein Blendrisiko für den Piloten entstehen kann.

Alle Berechnungen wurden wieder für Entfernungen des Flugzeuges von bis zu 3 km von der SLB bzw. der PV-Anlage durchgeführt. Als Aufsetzpunkt wurde der Punkt 100 m nach Beginn der SLB gewählt, als Startpunkt 2/3 der Länge der SLB. Als Bezugspunkt der PV-Anlage wurde deren geometrische Mitte verwendet.

Die zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion ins Pilotenauge kann mithilfe eines sogenannten Sonnenstandsdiagramms ermittelt werden. Bild 2 im Anhang zeigt das Sonnenstandsdiagramm in Form eines Polardiagramms für den Standort Hetzerath. Die roten Linien zeigen den Sonnenstand (Sonnenhöhe γ und Azimut α) für den 15. jedes Monats in Abhängigkeit von der Uhrzeit, dargestellt in Mitteleuropäischer Zeit MEZ. Die Uhrzeit ist durch blaue und grüne Punkte gekennzeichnet.

Zunächst muss der im Raum liegende Winkel θ zwischen Pilot und PV-Anlage ermittelt werden. θ ergibt sich aus der Formel:

$$\cos \theta = \cos (\lambda \pm \sigma) \cdot \cos \psi$$

+ σ ist der Steig- und - σ der Sinkwinkel des Flugzeugs. Es wird davon ausgegangen, dass die normale Blickrichtung des Piloten dem Sink- bzw. Steigwinkel entspricht. Bei einer Platzrunde ist $\sigma = 0^\circ$.

λ ist der vertikale Winkel, gebildet durch die Differenz der Höhe Pilotenauge - Höhe der Mitte PV-Modul bei einem bestimmten Bewertungspunkt der PV-Anlage und die Entfernung Pilotenauge zu diesem Punkt.

ψ ist der horizontale Winkel zwischen der momentanen Flugrichtung α und der horizontalen Blickrichtung τ zwischen Pilotenauge - bestimmter Punkt der PV-Anlage. Während der Winkel α bei einer Flugbewegung konstant bleibt, ändert sich ständig die Blickrichtung τ und damit auch der Winkel ψ .

Damit Sonnenlicht in Richtung Pilotenauge reflektiert werden kann, muss der vertikale Blickwinkel des Piloten λ dem vertikalen Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts δ entsprechen: $\lambda = -\delta$ (wenn λ abwärts gerichtet ist, muss δ aufwärts gerichtet sein und umgekehrt).

Für unterschiedliche Positionen während des Fluges werden nun mittels google earth die Winkel τ , λ und ψ bestimmt, dann wird nach obiger Formel θ berechnet. Mit den weiteren Parametern Neigung der Module $\varepsilon = 20^\circ$ nach Süd, der Orientierung $\nu = 90^\circ/270^\circ$ der Module, der Flugrichtung τ und dem vertikalen Winkel λ werden dann die trigonometrischen Berechnungen zur Ermittlung des Sonnenazimuts α und der vertikalen Sonnenhöhenwinkel γ durchgeführt, unter denen das Sonnenlicht auf die PV-Module fallen müsste, damit das reflektierte Licht ins Auge eines Piloten fallen kann. Da die Berechnungen für einen einzelnen Punkt der PV-Anlage, deren geomet-

rische PV-Mitte, durchgeführt wurden, stellen die Sonnenhöhenwinkel γ Kurven in Abhängigkeit der genannten unterschiedlichen Winkelparameter dar.

Die γ -Kurven oder γ -Flächen werden nun in das Sonnenstandsdiagramm eingetragen. Haben sie Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, fällt Sonnenlicht ins Auge eines Piloten; die dazugehörigen Jahres- und Tageszeiten können aus dem Polardiagramm abgelesen werden.

7.2.1 Flugrichtung Nordost

Nach Tabelle 1 treten in dieser Flugrichtung nur bei der Landung Blendwinkel $\theta < 20^\circ$ auf. In Bild 2 sind die γ -Kurven für die Sinkwinkel 1° , 3° und 20° bei der Flugrichtung $\alpha = 42^\circ$ eingetragen. Auf die Eintragung der γ -Kurven für 5° und 20° wurde verzichtet, die zwischen den Kurven für 3° und 20° liegen. In das Diagramm wurde auch die γ -Kurve für die „Landerichtung aus ungewohnter Position“ $\alpha = 57^\circ$ eingezeichnet. Alle γ -Kurven liegen oberhalb der roten Sonnenstandslinien und haben keine Schnittpunkte mit diesen, Sonnenlicht kann nicht zum Piloten reflektiert werden. Die Lage der γ -Kurven oberhalb der Sonnenstandslinien gibt die Tatsache wieder, dass auf der nördlichen Erdhalbkugel die Sonne nicht aus nördlichen Richtungen scheint und das Sonnenlicht daher nicht in Richtung Süden bis Südwesten, d.h. ins Auge eines in Richtung Norden bis Nordosten blickenden Piloten, reflektiert werden kann.

Fazit: Bei der Landung in Richtung Nordost wird kein Sonnenlicht zum Piloten reflektiert, Blendung kann nicht auftreten.

7.2.2 Flugrichtung Südwest

Gemäß Tabelle 1 ist nur die Situation Landerichtung aus ungewohnter Position $\alpha = 237^\circ$ zu untersuchen. Die für diese Situation berechnete γ -Kurve ist in Bild 2 als blaue Kurve 3 eingezeichnet. Die γ -Kurve liegt unterhalb des Sonnenstandsdiagramms, sie hat keine Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, von der PV-Anlage kann kein Licht in Richtung Pilot reflektiert werden.

Wenn γ -Kurven unterhalb des Polardiagramms liegen, kann rechnerisch nur bei negativen Sonnenständen (die Sonne steht unterhalb des Horizonts) Sonnenlicht ins Pilotenauge reflektiert werden. In der Realität bedeutet diese Aussage, dass der Pilot nur die Modulrückseiten sieht und das Sonnenlicht immer über das Flugzeug hinweg reflektiert wird.

Fazit: Sonnenlichtreflexion zum Piloten ist auch in Fahrtrichtung Südwest ausgeschlossen, Blendung kann auch in dieser Flugrichtung nicht entstehen.

7.3 Flimmereffekt

Wie bereits in Abschnitt 5.2 ausgeführt, entsteht der Flimmereffekt beim Vorbeiflug an einer PV-Anlage dadurch, dass die PV-Module in Reihen mit einem konstanten Abstand voneinander angebracht sind, wodurch es zu einer periodischen Unterbrechung des reflektierten Sonnenlichts kommt, wenn dieses Licht ins Auge des Piloten gelangt. Wie unter Abschnitt 5.2 bereits ausgeführt, kann ein Flimmereffekt jedoch nur entstehen, wenn die Modultischreihen etwa senkrecht zur Flugrichtung ausgerichtet sind und ein Flugzeug in unmittelbarer Nähe der PV-Anlage an der PV-Anlage vorbeifliegen würde. In Hetzerath liegt der Winkel zwischen Modultischausrichtung und Flugrichtung für die verschiedenen Flugsituationen jedoch zwischen 33° und 63° , wegen der relativ großen Entfernung zwischen Flugzeug und PV-Anlage würden, wenn überhaupt von der PV-Anlage reflektiertes Sonnenlicht den Piloten erreichen würde, sich die Sonnenreflexe gegenseitig überlappen, es käme zu keinem Flimmereffekt.

Fazit: Ein Flimmereffekt kann beim Vorbeiflug an der PV-Anlage Hetzerath nicht auftreten.

7.4 Ablenkung

Eine PV-Anlage, bestehend im Wesentlichen aus regelmäßig angeordneten, eher dunklen Solarmodulen, die zudem eine maximale Bauhöhe von maximal 3,50 m über Geländeoberkante hat, ist ein visuell unauffälliges Bauwerk, insbesondere auch angesichts der Tatsache, dass die PV-Anlage etwas tiefer liegt als die SLB des Flugplatzes Trier-Föhren, einen Abstand von der SLB von ca. 2000 m aufweist und Sonnenlicht unter kritischen Winkeln nicht zum Piloten gelenkt werden kann. Ein Flimmereffekt kann ebenfalls nicht auftreten. Als einziges, die Auffälligkeit erhöhendes Merkmal, bleibt theoretisch der Neuigkeitscharakter der Anlage. In diesem Aspekt unterscheidet sich die PV-Anlage aber nicht von jedem beliebigen anderen neu errichteten Bauwerk, das für einen Piloten sichtbar ist. Mittlerweile befinden sich PV-Freiflächenanlagen an vielen Flugplätzen und anderen Orten, so dass es die Piloten gewohnt sind, solche Anlagen zu überfliegen.

Es sei auch angemerkt, dass sich in Föhren in einem kleinsten Abstand von ca. 400 m zur SLB eine weitere, deutlich größere PV-Anlage als die geplante Anlage Hetzerath befindet, von der keine Probleme mit zu großer Störwirkung bekannt sind.

Fazit: Eine erhöhte Aufmerksamkeit und Ablenkungsgefahr durch die PV-Anlage Hetzerath kann insgesamt ausgeschlossen werden.

8 Zusammenfassung

Bei Start oder Landungen auf dem Flugplatz Trier-Föhren kann unter blendkritischen Blickwinkeln kein Sonnenlicht von der PV-Anlage Hetzerath zu einem Piloten reflektiert werden, eine Blendung ist ausgeschlossen. Ein Flimmereffekt oder eine erhöhte Auffälligkeit treten ebenfalls nicht auf. Insgesamt kann eine Gefährdung des Flugverkehrs durch die von der Fa. WES Green GmbH geplante Photovoltaik-Freiflächenanlage Hetzerath mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Von daher ist gegen die Errichtung der PV-Anlage nichts einzuwenden.



Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.

Anhang

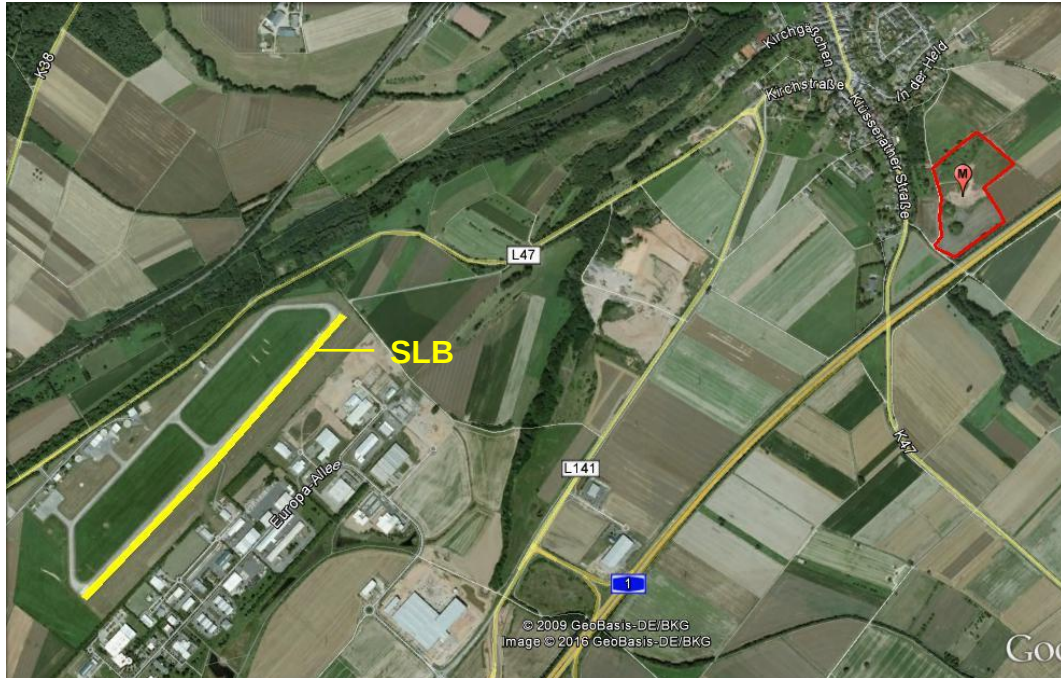


Bild 1: Schematische Darstellung der geplanten PV-Anlage Hetzerath

*Markierung M: Geometrische Mitte der PV-Anlage
SLB: Start- und Landebahn Flugplatz Trier-Föhren*

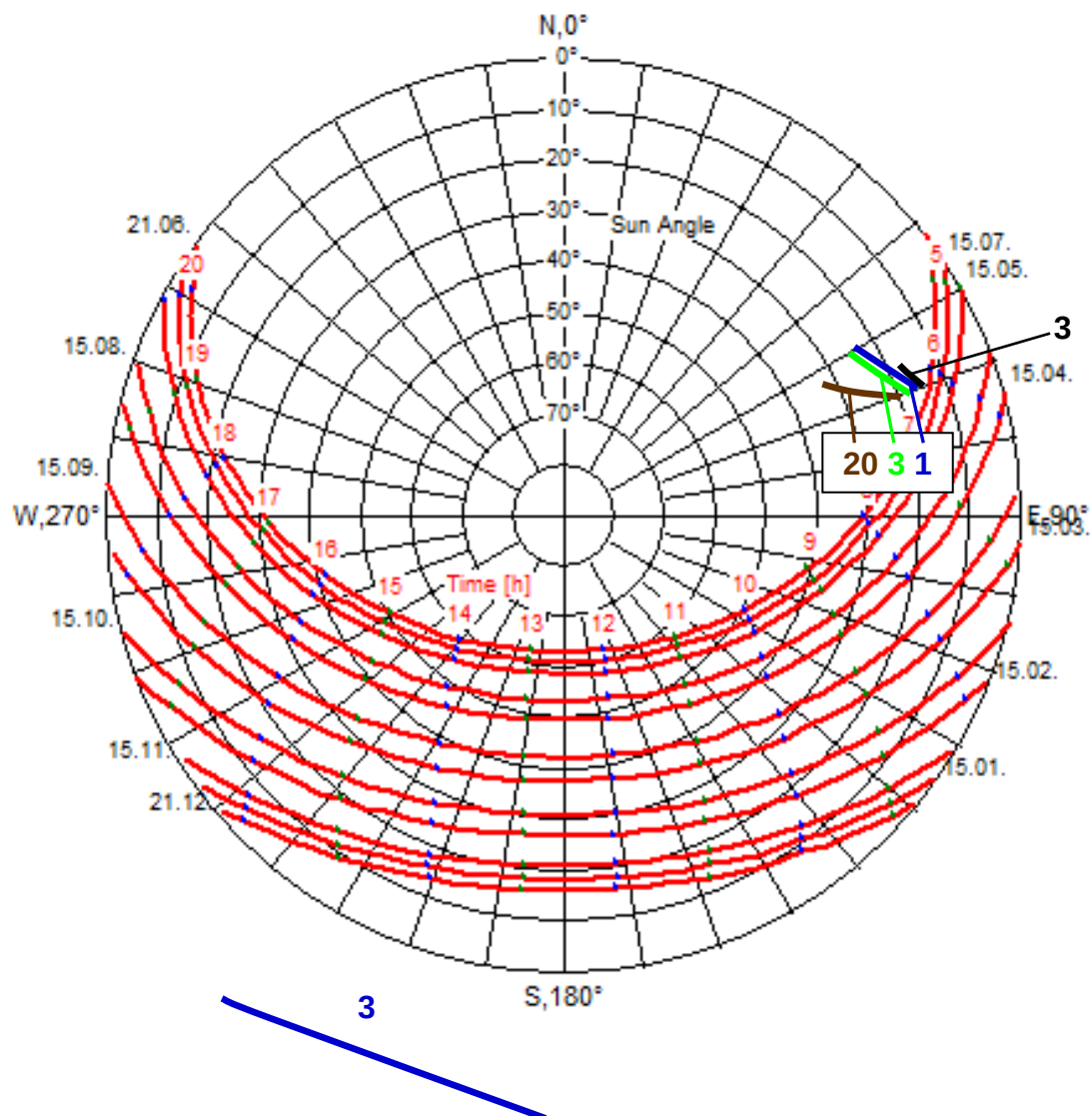


Bild 2: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung; rote Linien) für Hetzerath mit γ -Kurven für die Vorbeifahrt auf der BAB A 1 an der PV-Anlage

γ -Kurven im oberen Teil des Sonnenstandsdiagramms: Flugrichtung Nordost
Landung Richtung Nordost

γ -Kurven 1, 3, 20: Sinkwinkel 1°, 3°, 20°, α = jeweils 42°

γ -Kurve 3: Sinkwinkel 3°, α = 57°

γ -Kurve unterhalb des Sonnenstandsdiagramms: Flugrichtung Südwest

γ -Kurve 3: Sinkwinkel 3°, α = 237°

Quelle des Sonnenstandsdiagramms: www.stadtklima-stuttgart.de