

Dr. Hans Meseberg
LSC Lichttechnik und Straßenausstattung Consult
Fährstr. 10
D-13503 Berlin
Tel.: 030/82707832
Mobil: 0177/3733744
Email: hmeseberg@t-online.de

Berlin, den 7. 9. 2023

G u t a c h t e n
G55/2023
zur Frage der eventuellen Blend- und Störf Wirkung von Nutzern der L 1016
und Anwohnern durch eine bei Schröterode
zu installierende Photovoltaikanlage

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

1 Auftraggeber

Den Auftrag zur Erarbeitung des Gutachtens erteilte die solargrün GmbH, Marie-Curie-Ring 15 in 55291 Saulheim.

Auftragsdatum: 1. 8. 2023

2 Auftragsache

Die Solargrün GmbH plant die Errichtung einer Freiflächen-Photovoltaikanlage in Schröterode, einem Ortsteil von Mühlhausen. Es stellt sich die Frage, ob Nutzer der an der PV-Anlage vorbeiführenden Landesstraße 1016 sowie Bewohner eines nahegelegenen Wohngebäudes (Immissionsort) durch die PV-Anlage in unzumutbarer Weise geblendet oder belästigt werden könnten. Dieses Gutachten dient der Untersuchung 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 | α |
| Orientierung der Modultischreihen gegen Ost oder West | ν |
| vertikaler Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts | δ |
| Neigung der PV-Module gegen Süd | ε |
| vertikaler Blickwinkel Kraftfahrer - vor ihm liegende Fahrbahn | σ |

| | |
|--|-----------|
| im Raum liegender Blickwinkel (gebildet durch die Blickrichtung eines Kraftfahrers - Richtung reflektiertes Sonnenlicht) | θ |
| horizontaler Blickwinkel Kraftfahrer/ Mitte Fensterfläche - PV-Anlage | τ |
| Differenz $\alpha - \tau$ (horizontale Blickrichtung Kraftfahrer/Anwohner - PV-Anlage) | ψ |
| vertikaler Blickwinkel Kraftfahrer/Anwohner - PV-Anlage | λ |

4 Informationen zur Photovoltaik-Anlage

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

- Lageplan/Modullayout
- Modultischquerschnitt
- Höhenplan
- Fotos
- Mündliche und Emailinformationen durch Herrn Sven Bauer und Herrn Ferdinand Lagemann, Solargrün GmbH

Die Entfernungen und horizontalen Winkel wurden mit google earth ermittelt. Der monatliche Sonnenstand für Schröterode (Sonnenhöhe und -azimut) wurde mit der Website www.stadtklima-stuttgart.de bestimmt. Die Berechnung der Winkel des reflektierten Sonnenlichts erfolgte mit eigenen Excel-Programmen.

5 Beschreibung der PV-Anlage Schröterode und topografische Daten

5.1 Die PV-Anlage

Die mehrteilige PV-Anlage wird auf einem bisher landwirtschaftlich genutzten Gelände errichtet, s. Bild 1a im Anhang. Das PV-Anlagengelände ist hügelig und hat folgende Geländeoberkanten (GOK):

Teilfläche 1 (TF 1) liegt auf einer Höhe von ca. 322 m über Normalhöhennull (NHN),

TF 2 steigt von ca. 322 m im Westen auf 329 m im Nordosten,

TF 3 steigt von 294 m im Südwesten auf 324 m im Nordwesten und auf 316 m im Osten,

TF 4 steigt von 301 m im Südwesten auf 306 m im Nordosten, fällt aber im Südosten auf 298 m

und TF 5 steigt von 289 m im Südwesten auf 293 m im Nordosten.

Nach aktuellem Planungsstand werden Module des Herstellers Astronergy CHCM78 mit einer Modulleistung von $625W_{\text{peak}}$ eingesetzt. Die geplante Leistung beträgt $42,255 MW_{\text{peak}}$. Die Module werden auf sogenannten Modultischreihen montiert, deren maximale Länge der jeweils verfügbaren Breite der einzelnen Teilflächen entspricht. Die Ausrichtung der Modultischreihen erfolgt in Ost-West-Richtung mit einer Modulneigung gegen Süd von 20° . Die Modulober- und unterkante befinden in einer Höhe von 3,342 m bzw. 0,80 m über GOK. Die Höhe des um die PV-Anlage zu installierenden Zaunes beträgt höchstens 2,50 m.

5.2 Die Landesstraße 1016

Die L 1016 führt westlich an der PV-Anlage ungefähr in Nord-Süd-Richtung an der Anlage vorbei, besitzt aber im interessierenden Bereich einige Serpentinien. Blendkritisch ist der Streckenabschnitt zwischen den Markierungen 2 und 4 in Bild 1a (Näheres hierzu siehe in Abschnitt 8.3 dieses Gutachtens). Die Fahrtrichtung α der Straße beträgt in diesem Streckenabschnitt ca. $87,2^\circ$. Die Fahrbahnoberkante steigt von Markierung 4 bis Markierung 2 von 301 m bis auf 307 m. Zwischen der L 1016 und der PV-Anlage befindet sich teilweise Wald und teilweise ein Laubgehölzstreifen. Der Wald schirmt die PV-Anlage ganzjährig, der Gehölzstreifen zumindest in der Vegetationsphase vollständig gegen die L 1016 ab.

5.3 Untersuchte Gebäude (Immissionsorte)

Als einzige potentieller Immissionsort wurde das dreigeschossige Wohngebäude, Adresse Mühlhausen-Schröterode 1 (s. Markierung A in Bild 1a), identifiziert. Die GOK des Wohnhauses beträgt 286 m, die Mitte der Fensterhöhe des 2. Obergeschosses ca. 7 m. Von diesem Wohnhaus ist der Blick zur PV-Anlage wegen der davorliegenden, höheren Gebäude der Putenzucht nur eingeschränkt möglich. In Bild 1b ist der Winkelbereich, in dem der Blick vom Immissionsort zur PV-Anlage zwischen den Putenzuchtgebäuden hindurch möglich ist, durch zwei gelbe Linien gekennzeichnet.

Die langgestreckten Gebäude, in denen Putenzucht betrieben wird, haben Fenster unmittelbar unterhalb des Daches, dort halten sich keine Personen auf; deshalb sind diese Gebäude nicht als Immissionsort zu betrachten.

6 Beschreibung der eventuell von PV-Anlagen ausgehenden Blend- und Störfwirkungen für Kraftfahrer

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 eines Beobachters, tritt Absolutblendung auf, bei der man nicht mehr in der Lage wäre, z.B. 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. Das Aufsetzen einer Sonnenbrille hilft hier kaum, da dadurch nicht nur die Intensität des Sonnenlichtes, sondern auch die Helligkeiten aller anderen Objekte im Gesichtsfeld herabgesetzt werden.

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:

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

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 liefert 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 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 **Blickwinkel $5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$** , und besonders kritisch Winkel $\theta \leq 5^\circ$, wenn also die störende Lichtquelle direkt im Gesichtsfeld des Beobachters liegt. Ein Kraftfahrer hat nicht mehr die Möglichkeit, diese Lichtquelle „auszublenden“: Er muss die vor ihm liegende Straße und deren Umgebung beobachten und alle Licht- und sonstigen Signale sowie die Anzeigeinstrumente im Pkw eindeutig erkennen können. Deshalb kann man in sol-

chen Situationen seinen Blick nicht beliebig zur Seite richten, um einem evtl. vorhandenen Blendreflex auszuweichen.

Bei allen Situationen, in denen evtl. eine Blendgefahr besteht, ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Sonne ebenfalls im Blickfeld des Beobachters befindet und das direkte Sonnenlicht **gleichzeitig** mit dem Blendreflex auf den Beobachter einwirkt.

Um eine Aussage über die Blendwirkung einer PV-Freiflächenanlage machen zu können, muss im Zweifelsfall unter Beachtung des Blickwinkels die Beleuchtungsstärke (Lichtintensität) der Blendlichtquelle ins Verhältnis zur Beleuchtungsstärke der Sonne gesetzt werden.

7 Blend- und Störwirkung (Lichtimmission) für sich in Gebäuden aufhaltende Personen

Lichtimmissionen gehören nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) formal zu den schädlichen Umwelteinwirkungen, wenn sie nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Anwohner herbeizuführen. Weitere Ausführungen hierzu macht das BImSchG jedoch nicht. Die von PV-Freiflächenanlagen verursachte Blend- und Störwirkung von Personen, die sich in Wohn- oder Gewerbegebäuden aufhalten, wird im Allgemeinen nach den „Hinweisen zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) vom 13. 9. 2012, Anhang 2, vorgenommen (im Folgenden „LAI-Hinweise“ genannt). Die Blend- und Störwirkung = Lichtimmission ist durch die Zeit definiert, in der Sonnenlicht von der PV-Anlage auf die Fensterflächen der betroffenen Gebäude (Immissionsorte) auftrifft. Diese Zeit, damit ist die astronomisch maximal mögliche Zeit von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang gemeint, darf täglich 30 min und im Kalenderjahr 30 Stunden nicht überschreiten („30 Minuten-/30 Stunden-Regel“).

Die LAI-Hinweise gelten für „schutzwürde Räume“. Dazu gehören

- Wohnräume
- Schlafräume, einschließlich Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten und Bettenräume in Krankenhäusern und Sanatorien
- Unterrichtsräume in Schulen, Hochschulen und ähnlichen Einrichtungen
- Büroräume, Praxisräume, Arbeitsräume, Schulungsräume und ähnliche Arbeitsräume.

Lt. Abschnitt 7e. der LAI-Hinweise-Lichtimmissionen sind die Sonne als punktförmig und die Solarmodule als ideal verspiegelt zu betrachten, so dass die Berechnungen gemäß dem Reflexionsgesetz $\text{Ausfallswinkel} = \text{Einfallswinkel}$ durchgeführt werden können. Tatsächlich wird das Sonnenlicht von den üblicherweise verwendeten Solarmodulen aber auch teilweise gestreut reflektiert. Das führt dazu, dass das Sonnenlicht z.T. spiegelnd (Kernreflex) und z.T. gestreut (Streureflex) reflektiert wird. Der Streureflex kann je nach Entfernung Beobachter - PV-Anlage und Grad der Streuwirkung bis zu 40 min vor dem Kernreflex auftreten und erst bis zu 40 min nach dem Kernreflex verschwinden. Die Intensität des Streureflexes ist aber immer deutlich ge-

ringer ist als die Intensität des Kernreflexes und erzeugt daher keine nennenswerte Störwirkung. Alle durchzuführenden Berechnungen beziehen sich daher lt. Abschnitt 7e. der LAI-Hinweise nur auf den Kernreflex, die zusätzliche Reflexionszeit durch den Streureflex wird nach den LAI-Hinweisen nicht berücksichtigt.

In den LAI-Hinweisen-Lichtimmissionen wird ausgeführt: *„Wirkungsuntersuchungen oder Beurteilungsvorschriften zu diesen Immissionen sind bisher nicht vorhanden.“* Mangels solcher Untersuchungen wurde der Inhalt der Regelungen der LAI-Hinweise-Lichtimmissionen daher weitgehend den „Hinweisen zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen“ (WEA-Schattenwurf-Hinweise) des LAI entlehnt. Diese Übertragung ist sehr angreifbar, da die durch den Schattenwurf von Windkraftanlagen erzeugte Störwirkung viel gravierender ist als die Störwirkung, die von PV-Anlagen erzeugt wird. Offensichtlich im Bewusstsein dieses Mangels wird in den LAI-Hinweisen-Lichtimmissionen weiter ausgeführt: *„Der genannte Wertungsmaßstab kann allenfalls ein erster Anhaltspunkt für die Beurteilung von Blendungen sein. Im Einzelfall muss dann aber begründet werden, warum eine Übertragbarkeit gegeben, bzw. aufgrund welcher Überlegungen eine ggf. abweichende Bewertung erfolgt ist.“*

Diese Einschränkung der Bewertungsmöglichkeit der Lichtimmissionen durch die LAI-Hinweise-Lichtimmissionen führt dazu, dass diese LAI-Hinweise nur eine Empfehlung darstellen und deshalb nur in wenigen Bundesländern verbindlich zur Bewertung von Lichtimmissionen vorgeschrieben sind. Sie stellen aber den Stand der Technik dar und können, wenn einige Änderungen an der Bewertungsmethodik vorgenommen werden, durchaus sinnvoll angewendet werden. Folgende Aspekte der LAI-Hinweise werden im Folgenden modifiziert bzw. neu aufgenommen:

- a. Es heißt in den LAI-Hinweisen-Lichtimmissionen, dass Immissionsorte, die sich weiter als ca. 100 m von einer Photovoltaikanlage entfernt befinden, erfahrungsgemäß nur kurzzeitige Blendwirkungen erfahren. Nur Immissionsorte, die vorwiegend westlich oder östlich einer Photovoltaikanlage liegen und nicht weiter als ca. 100 m von dieser entfernt sind, seien hinsichtlich einer möglichen Blendung als kritisch zu betrachten. Dieser Aussage ist nicht zuzustimmen, denn nach den Erfahrungen des Unterzeichners bei der Begutachtung anderer PV-Anlagen können PV-Anlagen auch dann eine unzumutbare Störwirkung entfalten, wenn ihre Entfernung von Immissionsort beträchtlich größer als 100 m ist, z.B. wenn sich die betroffenen Fenster sehr weit oberhalb des PV-Anlagengeländes befinden, das Anlagengelände ein Gefälle oder eine Steigung in Richtung Immissionsort aufweist oder die PV-Fläche sehr ausgedehnt ist. Deshalb wird die evtl. Blendwirkung für Anwohner unabhängig von der Entfernung der betroffenen Gebäude berechnet.
- b. In den WEA-Schattenwurfhinweisen wird Schattenwurf für Sonnenstände $\gamma \leq 3^\circ$ Erhöhung über Horizont wegen Bewuchs, Bebauung und der zu durchdringenden Atmosphärenschichten in ebenem Gelände vernachlässigt. Gerade diese wichtige, sehr sinnvolle Einschränkung bzw. eine vergleichbare Regelung fehlt in den LAI-Hinweisen-Lichtimmissionen. Deshalb wird in diesem Gutachten folgende, den Schattenwurfhinweisen analoge Regelung verwendet: Sonnenlicht, das unter Winkeln $\gamma \leq 7,5^\circ$ von einer PV-Anlage in Richtung Immissionsort reflektiert wird, wird wegen dessen geringer Intensität (vergleichbar der Intensität des direkten Sonnenlichts, das unter $\gamma = 3^\circ$ reflektiert wird, d.h. unmittelbar nach Sonnenaufgang

oder vor Sonnenuntergang) und wegen Bewuchs, Bebauung und der zu durchdringenden Atmosphärenschichten in ebenem Gelände nicht berücksichtigt.

8 Blend- und Störpotential der geplanten PV-Anlage für Kraftfahrer

8.1 Sehbedingungen eines Kraftfahrers

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

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Blendrisikos kann mithilfe eines so genannten Sonnenstandsdiagramms ermittelt werden. Die Bilder 2 und 3 zeigen das Sonnenstandsdiagramm für Schröterode 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.

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

$$\cos \theta = \cos \sigma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \psi \quad (1)$$

Die in dieser Formel genannten Winkel müssen gemäß den Sehbedingungen für bestimmte Situationen der Vorbeifahrt von Kraftfahrern an der PV-Anlage ermittelt werden.

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 maximale Augenhöhe eines Lkw-Fahrers beträgt ca. 2,40 m, die mittlere Augenhöhe eines Pkw-Fahrers ca. 1,12 m; deshalb kann eine PV-Anlage vom höher sitzenden Lkw-Fahrer u.U. zeitlich eher und auf größere Entfernungen gesehen werden, wodurch theoretisch die Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer erhöht werden kann. Es kann angenommen werden, dass der Fahrer bei einer Fahrt auf einer Straße normalerweise auf einen Punkt auf der Fahrbahn blickt, der etwa 50 m vor ihm liegt. Daraus ergibt sich mit der mittleren Augenhöhe eines Lkw-Fahrers h_F von 2,40 m ein vertikaler Winkel σ von ca. $-2,9^\circ$ (Blick leicht nach unten). Dieser Winkel σ wurde bei den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt.

8.2 Auswertung mittels des Sonnenstandsdiagramms

ψ ist der horizontale Winkel zwischen der momentanen Fahrtrichtung α und der horizontalen Blickrichtung τ Kraftfahrerauge - bestimmter Punkt der PV-Anlage. Fährt ein Kfz an der PV-Anlage vorbei, ändert sich ständig die Blickrichtung τ des Kraftfahrerauges zur Anlage und damit auch der Winkel ψ .

Damit Sonnenlicht in Richtung Kraftfahrerauge reflektiert werden kann, muss der vertikale Blickwinkel des Kraftfahrerauges 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 bestimmte Punkte der Annäherung eines Kfz an die bzw. Vorbeifahrt an der PV-Anlage werden nun mittels google earth die Winkel τ , α , ψ bestimmt, dann wird nach obiger Formel (1) der Winkel θ berechnet. Mit den weiteren Parametern Neigung der Module $\varepsilon = 20^\circ$ nach Süd 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 für α und γ werden in das Sonnenstandsdiagramm für Schröterode eingetragen. Da die Berechnungen für die gesamte Fläche der PV-Anlage von einem festen Beobachterstandort aus durchgeführt werden, stellen die ermittelten α/γ -Werte Flächen in Form von geschlossenen Polygonzügen dar, die im Folgenden als γ -Flächen bezeichnet werden. Haben diese γ -Flächen Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, fällt Sonnenlicht ins Auge eines Kraftfahrers; die dazugehörigen Jahres- und Tageszeiten können aus dem Polardiagramm abgelesen werden. Bei fehlenden Schnittpunkten ist keine Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer möglich.

8.3 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion ins Auge eines Kraftfahrers auf der L 1016

Als einziger blendkritischer Streckenabschnitt auf der L 1016 wurde der Abschnitt zwischen den Markierungen 4 bis 2, Fahrtrichtung Ost, identifiziert. Dort hat der Kraftfahrer die PV-Anlage in seinem direkten Blickfeld.

Im Streckenabschnitt von Markierung 1 bis Markierung 2 kann in beiden Fahrtrichtungen keine Blendung auftreten: In Fahrtrichtung Nord müsste die Sonne im Norden stehen, um zu einem Kraftfahrer reflektiert werden zu können, der in Richtung Norden fährt und blickt; auf der nördlichen Erdhalbkugel steht die Sonne aber nie im Norden. In Fahrtrichtung Süd sieht der Kraftfahrer nur die Modulrückseiten und das von den Modulen reflektierte Licht von der im Süden stehenden Sonne wird immer über den Kraftfahrer hinweg reflektiert.

Im Abschnitt zwischen den Markierungen 2 bis 4, Fahrtrichtung West, hat der Kraftfahrer die PV-Anlage im Rücken. Im Abschnitt zwischen den Markierungen 4 und 5, beide Fahrtrichtungen, ist der Blickwinkel θ des Kraftfahrers zur PV-Anlage größer als 20° , so dass gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 6 keine Blendwirkung entstehen kann.

Die Berechnungen wurden für den Blickpunkt eines Kraftfahrers bei Markierung 3 Fahrtrichtung Ost, durchgeführt. Dieser Blickpunkt ist repräsentativ für die Vorbeifahrt an der PV-Anlage in dieser Richtung, da sich während der Vorbeifahrt an der Anlage zwischen den Markierungen 4 und 2 die Fahrtrichtung praktisch nicht ändert. Innerhalb des Blickwinkelbereiches $\theta \pm 20^\circ$ liegen die TF 2 und TF 3, so dass die Berech-

nungen für diese beiden Teilflächen durchgeführt werden müssen. Die berechnete γ -Fläche ist in Bild 2 wiedergegeben. Sie hat Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, Sonnenlicht kann von der PV-Anlage theoretisch ca. vom 10. März bis 5. Oktober etwa zwischen 6.05 Uhr und 6.40 Uhr MEZ zum Kraftfahrer reflektiert werden. Diese Tatsache ist aber nicht gleichbedeutend damit, dass der Kraftfahrer auch geblendet wird. Aus einem dem Unterzeichner zur Verfügung gestellten Foto geht hervor, dass der Gehölzstreifen in der Vegetationsphase die PV-Anlage vollständig gegen die L 1016 abschirmt. Die Vegetationsphase reicht etwa vom 15. April bis zum 31. Oktober. Der Vegetationsbeginn 15. April ist in Bild 2 durch die schwarze Linie markiert; der Teil der γ -Fläche oberhalb dieser Linie fällt für die Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer aus.

Um festzustellen, ob die Sonnenlichtreflexion gemäß des unteren Teils der γ -Fläche zu einer Kraftfahrerblendung führt, muss in einem weiteren Schritt das Verhältnis $V = E_R/E_D = \text{Beleuchtungsstärke (Intensität) des von der PV-Anlage reflektierten Sonnenlichts } E_R \text{ zur Beleuchtungsstärke des direkten Sonnenlichts } E_D$ berechnet werden. V errechnet sich aus folgender Formel

$$V = E_R/E_D = \rho \cdot f_G \cdot f_T \cdot f_F$$

mit

- ρ : Reflexionsgrad der PV-Module beim jeweiligen Einfallswinkel des Sonnenlichts auf einem Modul. ρ wurde im vorliegenden Fall zu 0,708 berechnet.
- f_G : Die dicht stehenden Zweige und Äste der Gehölze zwischen Straße und PV-Anlage führen auch im Winterhalbjahr dazu, dass das reflektierte Sonnenlicht teilweise absorbiert wird. Diesem Umstand wird durch den Faktor f_G Rechnung getragen, der erfahrungsgemäß bei 0,5 liegt.
- f_T : Die Oberflächen von PV-Modulen sind nicht ideal spiegelnd, sondern mit einer leichten Struktur versehen, die für eine höhere Lichtabsorption 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. Nicht sämtliche Module sind exakt unter $\varepsilon = 20^\circ$ geneigt und unter $\nu = 90^\circ/270^\circ$ ausgerichtet, sondern beide Winkel sind mit einer durch die Montage bedingten Toleranz versehen. Diese Einflussgrößen führen dazu, dass bei dem jeweiligen Einfallswinkel ein geringerer Anteil reflektiert wird als der dem zugehörigen Reflexionsgrad entsprechende Anteil von Licht in die durch das Reflexionsgesetz vorbestimmte Richtung. Befindet sich die PV-Anlage in größerer Entfernung vom Beobachter, 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. Die Verringerung der Intensität des reflektierten Sonnenlichts infolge dieser Streu- und Trübungseffekte wird durch den Faktor f_T beschrieben. Der Faktor ist bei Entfernungen Kraftfahrer-

PV-Anlage bis 800 m, um die es sich in Schröterode handelt, erfahrungsgemäß mit 0,8 anzusetzen.

f_F : Sonnenlicht kann natürlich nur von den PV-Modulen selbst, aber nicht von den freien Gängen zwischen den Modulreihen reflektiert werden. Die Beleuchtungsstärke des reflektierten Sonnenlichts wird daher weiter mit dem Flächenfaktor f_F reduziert:

$$f_F = (A - B)/A$$

es ist

A: Abstand der MOK zweier benachbarter Modulreihen

B: Breite freier Gang

f_F wurde für Schröterode zu 0,701 berechnet.

Für V ergibt sich in vorliegendem Fall

$$V = E_R/E_D = 0,708 \cdot 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,701 = 0,198$$

Die Sonnenlichtreflexion erfolgt von Sonnenaufgang bis ca. 40 min nach Sonnenaufgang. Unmittelbar bei Sonnenaufgang ist keine Beleuchtungsstärke des direkten Sonnenlichts E_D vorhanden, $E_D = 0$ lx (Lux), 40 min später ist $E_D = 10\,000$ lx. Die Beleuchtungsstärke des reflektierten Sonnenlichts E_R beträgt 40 min nach Sonnenaufgang $0,198 \cdot 10\,000$ lx = 1980 lx. Das direkte Sonnenlicht hat etwa 5 min bis 7 min nach Sonnenaufgang eine Beleuchtungsstärke von 1980 lx. So kurz nach Sonnenaufgang kann man in die direkte Sonne blicken ohne geblendet zu werden. Demnach kann auch der Kraftfahrer problemlos zur PV-Anlage schauen, die das Sonnenlicht mit einer Beleuchtungsstärke von 1980 lx zu ihm reflektiert. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass das Sonnenlicht von der PV-Anlage unter fast dem gleichen Winkel reflektiert wird wie das direkte Sonnenlicht, das ja gleichzeitig auf den Kraftfahrer einwirkt. Die Differenz dieser beiden Blickwinkel beträgt ca. $6,9^\circ$. Bei dieser kleinen Winkeldifferenz überstrahlt das intensivere Sonnenlicht das schwächere, von der PV-Anlage reflektierte Sonnenlicht, so dass letzteres vom Kraftfahrer wahrscheinlich gar nicht wahrgenommen wird.

Fazit: Eine Blendung des Kraftfahrers findet bei einer Vorbeifahrt an der PV-Anlage Schröterode nicht statt.

9 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion in Richtung Immissionsort

9.1 Geometrische Bedingungen

Um die evtl. von der PV-Anlage ausgehende Störwirkung für Anwohner zu bewerten, ist es zunächst notwendig, die zeitliche Wahrscheinlichkeit dafür zu ermitteln, dass von der PV-Anlage reflektiertes Licht in die Fensterflächen bzw. die dahinterliegenden Räume der blendgefährdeten Gebäude gelangt. Diese Wahrscheinlichkeit kann ebenfalls mit dem Sonnenstandsdiagramm für Schröterode ermittelt werden.

Die Berechnungen erfolgen analog zu denen wie bei Kraftfahrern. Anstelle des Kraftfahrerauges tritt die Fensterhöhe des Immissionsortes. Für den zu untersuchenden Immissionsort wurden die horizontalen und vertikalen Blickwinkel Anwohner - PV-

Anlage ψ und λ ermittelt und daraus die horizontalen Sonnenwinkel α und die vertikalen Sonnenhöhenwinkel γ berechnet, unter denen das Sonnenlicht auf die PV-Module treffen müsste, damit es in die Fensterflächen der Wohnhäuser am Immissionsort Schröterode 1 gelangen kann.

9.2 Ergebnisse

Da die Reflexionszeiten mit der Fensterhöhe zunehmen, wurden die Berechnungen für das 2. Obergeschoss des Wohnhauses Schröterode 1 durchgeführt (worst case-Betrachtung). Die berechnete γ -Fläche ist in Bild 3 dargestellt. Wie in Abschnitt 7 ausgeführt, wird Sonnenlicht nicht betrachtet, das unter Winkeln $\gamma \leq 7,5^\circ$ von der PV-Anlage in Richtung Fensterflächen reflektiert wird. Der Winkelbereich $0^\circ \leq \gamma \leq 7,5^\circ$ ist im Polardiagramm von Bild 3 rot schraffiert eingezeichnet.

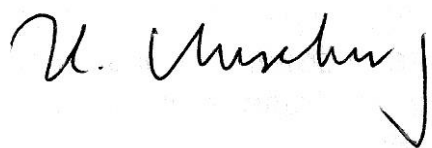
Die gelben Linien veranschaulichen, dass vom Immissionsort nur eine Sichtverbindung zur PV-Anlage nur zu einem sehr kleinen Bereich von TF 3 besteht. Die γ -Fläche hat demzufolge auch nur in einem kleinen Teilbereich Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, die nur bis zu einem Sonnenhöhenwinkel $\gamma = 0,9^\circ$ reichen, Winkel $\gamma > 7,5^\circ$ treten nicht auf. Damit ist keine Sonnenlichtreflexion im Sinne der LAI-Hinweise vorhanden, die Anforderungen der LAI-Hinweise werden erfüllt.

10 Zusammenfassung

E wurde untersucht, ob von der geplanten PV-Anlage Schröterode Blendwirkungen für Kraftfahrer auf der L 1016 erzeugt werden können und ob unzulässig hohe Lichtimmissionen an Immissionsorten zu erwarten sind.

Bei Fahrten auf der L 1016 können Kraftfahrer nicht geblendet werden. Auch Lichtimmissionen an dem einzigen vorhandenen Immissionsort Schröterode treten nicht auf, die Anforderungen der LAI-Hinweise werden eingehalten.

Gegen die Errichtung der PV-Freiflächenanlage Schröterode ist aus Sicht des Unterzeichners nichts einzuwenden.



Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.

Anhang



Bild 1a: Übersicht der geplanten PV-Anlage Schröterode mit den Teilflächen TF 1 bis TF 5, den Markierungen 1 bis 5 auf der L 1016 sowie Markierung A für den Immissionsort Schröterode 1



Bild 1b: Der Bereich zwischen den beiden gelben Linien stellt die einzige Sichtverbindung vom Immissionsort Schröterode zur PV-Anlage dar.

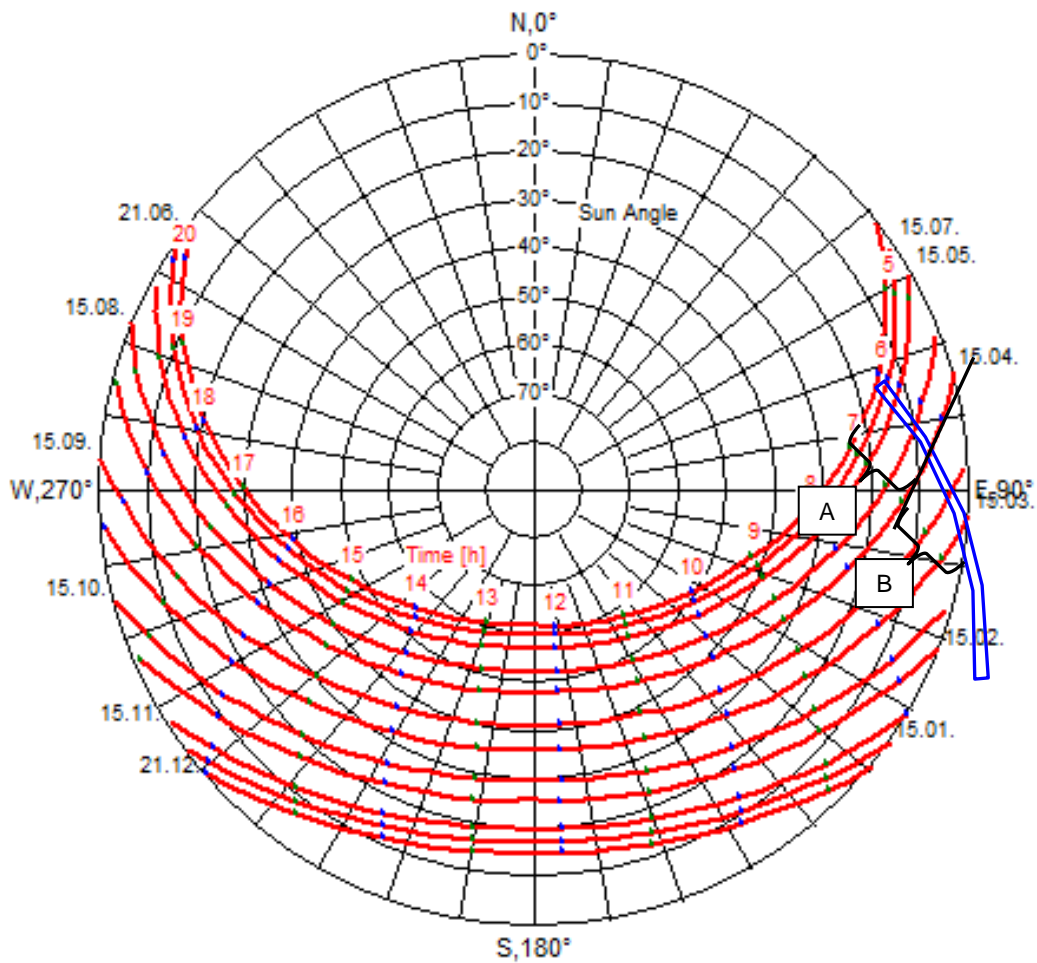


Bild 2: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Schröterode mit der zur Bewertung der Vorbeifahrt eines Kfz auf der L 1016 an der PV-Anlage

Quelle des Sonnenstandsdiagramms: www.stadtklima-stuttgart.de;
Copyright: © Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe 2007

- : γ -Fläche für den Blickpunkt eines Kraftfahrers bei Markierung 3, Fahr-
richtung Ost
- A : Vegetationsphase, keine Sonnenlichtreflexion zur L 1016 möglich
- B : außerhalb der Vegetationsphase

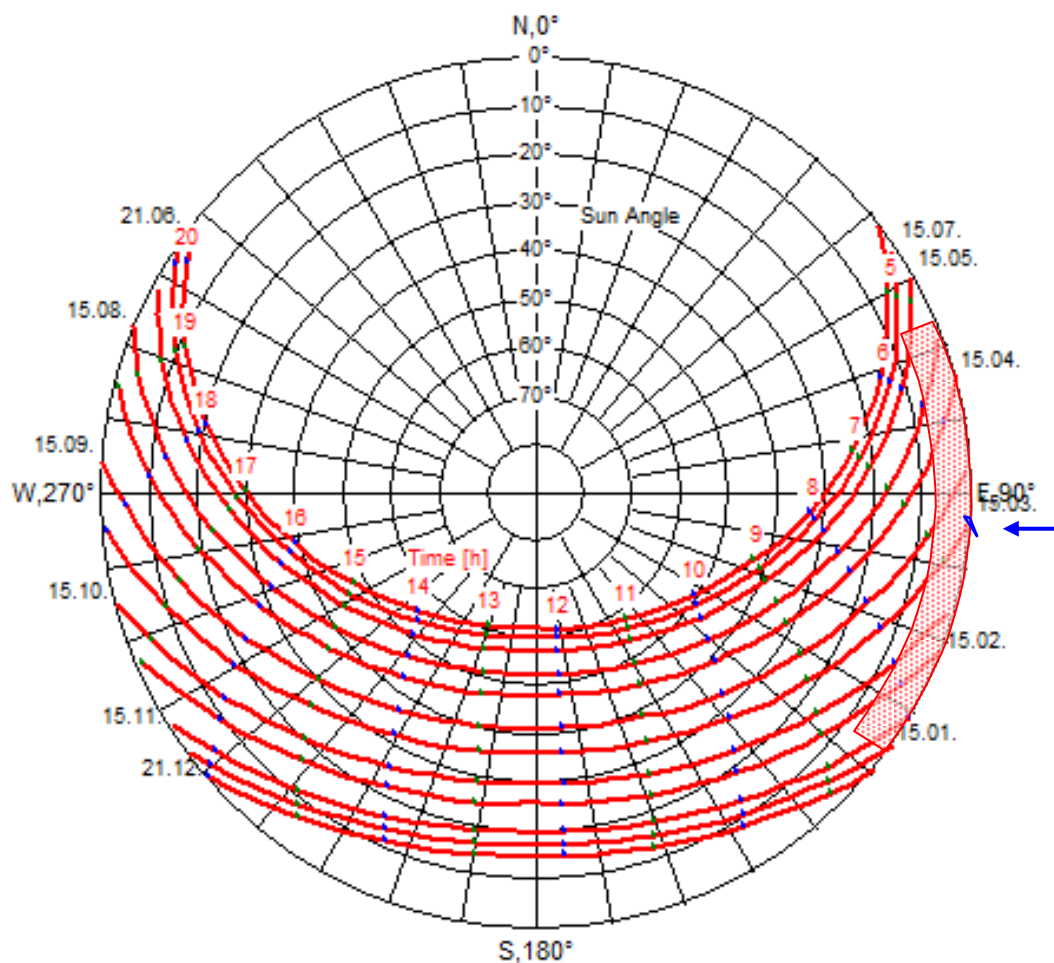


Bild 3: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Schröterode mit γ -Fläche zur Bewertung der Reflexionszeiten zu Immissionsort A, Schröterode 1

Rot schraffierte Flächen: Bereich des Sonnenhöhenwinkels $\gamma \leq 7,5^\circ$, der bei der Bewertung der Reflexionszeiten nicht berücksichtigt wird