

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 31. 10. 2024

G u t a c h t e n
G65/2024
zur Frage der eventuellen Blend- und Störfwirkung von Straßennutzern
und Anwohnern durch eine bei Schwalmstadt-Trutzhain
zu installierende Photovoltaikanlage

(Dieses Gutachten besteht aus 12 Seiten
und einem Anhang mit weiteren 6 Seiten)

1 Auftraggeber

Den Auftrag zur Erarbeitung des Gutachtens erteilte die ebene 4 architektur und städtebau, Am Alten Sudhaus 6 in 34119 Kassel.

Auftragsdatum: 21. 10. 2024

2 Auftragsache

Die ebene 4 architektur und städtebau plant die Errichtung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage in der Nähe von Schwalmstadt-Trutzhain. Es stellt sich die Frage, ob Nutzer der an der PV-Anlage vorbeiführenden Straßen sowie Bewohner nahegelegener Wohngebäude (Immissionsorte) 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
Azimet (horizontaler Sonnenwinkel) bzw. momentane Fahrtrichtung eines Kfz	α
Orientierung der Modultischreihen	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 Ebene 4 Architektur und Städtebau zur Verfügung gestellt wurden:

- Lageplan
- Bebauungsplan Nr. 39 „Feuerwehr und Nahwärme Trutzhain“, Textliche Festsetzungen - Vorentwurf
- Fotos

Die Entfernungen, horizontalen Winkel und Geländehöhen wurden mit Google Earth ermittelt. Der monatliche Sonnenstand für Schwalmstadt (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 Trutzhain und topografische Daten

5.1 Die PV-Anlage

Es ist geplant, in Trutzhain auf einer bisherigen Grünfläche ein Feuerwehrgerätehaus zu errichten, s. FGH in Bild 1 im Anhang. Beiderseits des Feuerwehrgerätehauses sollen zwei PV-Anlagen errichtet werden, s. die Teilflächen TF1 und TF2. Das PV-Anlagengelände ist eben; die Geländeoberkante (GOK) von TF1 liegt bei 228 m bis 229 m über Normalhöhennull (NHN), die GOK von TF2 bei 230 m.

Das Modullayout der PV-Anlage steht noch nicht fest. Der Auftraggeber hat den Unterzeichner beauftragt zu untersuchen, bei welchem Layout weder Blendung für Straßennutzer noch für Anwohner auftritt. Als Basis der Berechnungen wird folgendes Standardlayout verwendet: Modulneigung gegen Süd $\varepsilon = 15^\circ$, Höhe der Modulober- und -unterkante über GOK 3 m bzw. 0,80 m.

5.2 Die untersuchten Straßen

5.2.1 B 454

Westlich der PV-Anlage befindet sich ein Kreisverkehr, der der B 252/B 454 zugeordnet ist. Vom Kreisverkehr aus verläuft die B 454 in östlicher Richtung südlich an der PV-Anlage vorbei. Die Fahrtrichtung α der Straße beträgt bei Markierung E (s. Bild 1) ca. $98,5^\circ$ und dreht in einer langgezogenen Rechtskurve bei Markierung H auf $111,3^\circ$. Die Fahrbahnoberkante (FOK) der Straße steigt von Markierung E bis Markierung H von 227 m auf 229 m. Die FOK liegt etwa ein Meter tiefer als die jeweils gegenüberliegende GOK. Von der B 454 aus ist ein ungehinderter Blick zur PV-Anlage gegeben, der auch durch einige Bäume nicht beeinträchtigt wird.

5.2.2 K 109

Die K 109, von Südwesten kommend, mündet bei Markierung I in die B 454 ein. Bei der Zufahrt zur Einmündung beträgt die Fahrtrichtung ca. 50° und dreht unmittelbar von der Einmündung auf 65°; der Kraftfahrer hat die PV-Anlage genau im Blickfeld. Die GOK liegt bei 224 m. Bei der Zufahrt zur Einmündung ist ein freier Blick zur PV-Anlage gegeben.

5.2.3 Straßenzug Abbé-Pierre-Dentin-Straße/Struthfeld

Diese Straße verläuft nördlich der PV-Anlage. Bei Markierung A beträgt die Fahrtrichtung in östlicher Richtung bei Markierung A ca. 91° und dreht ca. 25 m hinter Markierung B bis Markierung D auf 132°. Die FOK der Straße beträgt von Markierung A bis Markierung D konstant 232 m und liegt damit zwei bis drei Meter höher als die jeweils gegenüberliegende GOK. Von diesem Straßenzug aus ist überwiegend ein freier Blick zur PV-Anlage gegeben; nur von Markierung D aus ist in Fahrtrichtung West über eine Länge von ca. 20 m der Blick zur PV-Anlage in der Vegetationsphase durch dichtes Gebüsch eingeschränkt.

6 Immissionsorte

Potentielle Immissionsorte befinden sich nur nördlich der PV-Anlage. Blendkritisch sind die Wohngebäude mit den Adressen Posener Str. 10 und 11, s. die Markierungen 1 und 2. Beide Wohngebäude haben Obergeschosse mit einer Höhe der Fenstermitte über Grund von ca. 5,50 m. Immissionsort 1 liegt auf einer Höhe von 230 m, Immissionsort 2 auf 231 m. Der kleinste Abstand von Immissionsort 1 zur PV-Anlage beträgt ca. 21 m.

7 Beschreibung der eventuell von PV-Anlagen ausgehenden Blend- und Störwirkungen für Kraftfahrer

7.1 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 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, so dass verkehrsgefährdende Situationen entstehen können.
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 „auszublenken“: Er muss die vor ihm liegende Straße und deren Umgebung beobachten und alle Licht- und sonstigen Signale sowie die

Anzeigeeinstrumente im Pkw eindeutig erkennen können. Deshalb kann man in solchen 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.

8 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 Ausfallswinkel = 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 geringer ist als die Intensität des Kernreflexes und erzeugt daher keine nennenswerte Störf Wirkung. 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 Störf Wirkung viel gravierender ist als die Störf Wirkung, 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 Störf Wirkung 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 in Richtung Immissionsort aufweist oder die PV-Fläche sehr ausgedehnt ist. Deshalb wird die evtl. Blendwirkung für Anwohner vom Unterzeichner 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 Son-

nenlichts, 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.

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

9.1 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 bis 4 zeigen das Sonnenstandsdiagramm für Trutzhain 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 2,50 m ein vertikaler Winkel σ von ca. $-2,9^\circ$ (Blick leicht nach unten). Dieser Winkel σ wurde bei den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt.

9.2 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 $\varepsilon = 15^\circ$ nach Süd, der Modulreihenausrichtung ν 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 Schwalmstadt eingetragen. Da die Berechnungen für die gesamte Fläche oder eine Teilfläche 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.

9.3 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion ins Auge eines Kraftfahrers

9.3.1 B 454

Fahrtrichtung West: Die γ -Flächen wurden für die Blickpunkte F und H berechnet und in Bild 2 in grüner bzw. brauner Farbe eingezeichnet. Sie liegen oberhalb der Sonnenstandslinien und haben keine Schnittpunkte mit diesen. Sonnenlicht kann gemäß der Erläuterungen in Abschnitt 9.2 in dieser Fahrtrichtung zu keinem Zeitpunkt von der PV-Anlage zum Kraftfahrer auf der B 454 reflektiert werden, Kraftfahrerblendung tritt nicht auf.

Fahrtrichtung Ost: Die γ -Flächen wurden für die Blickpunkte E und G berechnet und in Bild 2 in blauer bzw. schwarzer Farbe eingezeichnet. Beide γ -Flächen haben Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, Sonnenlicht kann vom 20. bis 25. März und vom 20. bis 25. September zwischen 6.30 Uhr und 6.40 Uhr MEZ zum Kraftfahrer reflektiert werden.

Mit dieser Sonnenlichtreflexion ist aber nicht unbedingt auch Kraftfahrerblendung verbunden. Die Sonnenlichtreflexion erfolgt von Markierung E zu TF2 ab Sonnenaufgang bis 10 Minuten nach Sonnenaufgang, von Markierung G zu TF2 ab Sonnenaufgang bis 17 Minuten nach Sonnenaufgang. Um festzustellen, ob die Sonnenlichtreflexion zu einer Kraftfahrerblendung führt, muss in einem weiteren Schritt das Verhältnis $V = E_R/E_D = \text{Beleuchtungsstärke (Intensität) des von der PV-Anlage reflektier-$

ten Sonnenlichts E_R zur Beleuchtungsstärke des direkten Sonnenlichts E_D berechnet werden. V errechnet sich aus folgender Formel

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

mit

ρ : Reflexionsgrad der PV-Module beim jeweiligen Einfallswinkel des Sonnenlichts auf einem Modul.

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

Der Reflexionsgrad ρ beträgt bei den in Trutzhain vorhandenen geometrischen Bedingungen ca. 0,8, der Flächenfaktor f_F beträgt im Allgemeinen ca. 0,7. V ergibt sich damit in vorliegendem Fall zu $V = E_R/E_D = 0,8 \cdot 0,7 = 0,56$. Die Beleuchtungsstärke des direkten Sonnenlichts beträgt 10 Minuten bzw. 17 Minuten nach Sonnenaufgang ca. 500 lx (Lux) bzw. 2200 lx. Die Beleuchtungsstärke des reflektierten Sonnenlichts beträgt $0,56 \cdot 500 \text{ lx} = 280 \text{ lx}$ bzw. $0,56 \cdot 2200 \text{ lx} = 1232 \text{ lx}$. Das direkte Sonnenlicht hat 5 Minuten nach Sonnenaufgang eine Beleuchtungsstärke von ca. 280 lx und 10 Minuten nach Sonnenaufgang eine Beleuchtungsstärke von ca. 1232 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 500 lx bis 1232 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. $8,5^\circ$. Bei dieser kleinen Winkeldifferenz überstrahlt das intensivere Sonnenlicht das schwächere, von der PV-Anlage reflektierte Sonnenlicht, so dass letzteres vom Kraftfahrer u.U. gar nicht wahrgenommen wird. Damit führt die schwache Sonnenlichtreflexion zu keiner Kraftfahrerblendung.

Fazit: Kraftfahrer auf der B 454 werden durch die PV-Anlage nicht geblendet.

9.3.2 K 109

Fahrtrichtung Nordost: Die für den Kraftfahrerblickpunkt I berechneten γ -Flächen wurden in violetter Farbe ebenfalls in Bild 2 eingezeichnet. Sie liegen oberhalb der Sonnenstandslinien, Kraftfahrerblendung ist ausgeschlossen.

Fahrtrichtung Südwest: Der Kraftfahrer hat die PV-Anlage im Rücken, er kann von der PV-Anlage nicht geblendet werden.

9.3.3 Straßenzug Abbé-Pierre-Dentin-Straße/Struthfeld

Fahrtrichtung Ost: Die γ -Flächen wurden für die Blickpunkte A und C berechnet und in Bild 3 in grüner bzw. blauer Farbe eingezeichnet. Sie liegen unterhalb der Sonnenstandslinien und haben keine Schnittpunkte mit diesen. Kraftfahrerblendung ist in dieser Fahrtrichtung nicht möglich.

Fahrtrichtung West: Die γ -Flächen wurden für die Blickpunkte B und D berechnet und ebenfalls in Bild 3 eingezeichnet. Die schwarz gezeichnete γ -Fläche für den Blick von Markierung B zu TF1 liegt unterhalb der Sonnenstandslinien, Kraftfahrerblendung tritt bei Blick zu TF1 nicht auf. Die braun gezeichnete γ -Fläche für den Blick von Markierung D zu TF2 hat jedoch solche Schnittpunkte, Sonnenlicht kann im Juni etwa zwischen 18.30 Uhr und 18.55 Uhr MEZ zum Kraftfahrer reflektiert werden. Die Berechnung des o.g. Wertes V und der Intensität des reflektierten Sonnenlichts E_D führt zu dem Ergebnis, dass E_D so hoch ist, dass in dieser Situation tatsächlich mit einer verkehrsgefährdenden, inakzeptablen Kraftfahrerblendung gerechnet werden muss.

Abhilfemaßnahmen: Eine Änderung der Modulneigung verschiebt die Sonnenlichtreflexion nur in andere Tages- oder Jahreszeiten und ist daher wirkungslos. Es würde sich anbieten, die Modulreihen aus der Ost-West-Richtung so zu drehen, dass sie parallel entweder zur B 454 oder zum Straßenzug Abbé-Pierre-Dentin-Straße/Struthfeld verlaufen. Die Berechnungen zeigen aber, dass in beiden Fällen das Blendrisiko sogar ansteigt. Die Ausrichtung der Modultischreihen in Nord-Süd-Richtung und die abwechselnde Modulneigung nach Ost und West („Satteldach“-Anordnung) kann die Kraftfahrerblendung zwar verhindern, führt aber zur Sonnenlichtreflexion zu den Immissionsorten 1 und 2 und zu weiteren, an der Kohlenstraße liegenden Wohnhäusern, die wegen der kleinen Entfernungen so lange andauern kann, dass die Vorgaben der LAI-Hinweise überschritten werden. Alle Änderungen am Modullayout haben insgesamt keine Beseitigung des Blendrisikos zur Folge.

Als sinnvolle Maßnahme kommt die Anbringung eines dunklen Kunststoffgewebes infrage, das nicht mehr als 30 % Transmission besitzt. Das Kunststoffgewebe wird auf dem Zaun an der Nordost-Grenze von TF2 entlang der durchgehenden und gepunkteten gelben Linien in Bild 1 in einer Höhe von 0,8 m (Höhe Modulunterkante) bis zur Höhe von 3 m (Höhe Moduloberkante) über eine Länge von ca. 70 m installiert. Sollte die Höhe der Moduloberkante nur bei 2,50 m liegen, muss die Zaunhöhe auch nur 2,50 m betragen und bis zu dieser Höhe abgeschirmt werden. Zwischen TF2 und der Straße befindet sich teilweise dichtes Gebüsch. Je nachdem, wie hoch dieses Gebüsch ist, kann im entsprechenden Streckenabschnitt (s. unterbrochene gelbe Linie) auf die Zaunabschirmung verzichtet werden.

Der Unterzeichner hat ein solches Kunststoffgewebe (s. Bild 5) lichttechnisch geprüft und zum Einsatz an mehreren anderen PV-Anlagen empfohlen; in einem Fall wird es seit ca. 6 Jahren problemlos an einer Autobahn eingesetzt. Sollte dieses Kunststoffnetz nicht verfügbar sein, kommt als Alternative z.B. das in Bild 6 gezeigte Kunststoffnetz infrage, das etwa die gleichen Eigenschaften hat wie das geprüfte Kunststoffnetz.

10 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion in Richtung der Immissionsorte

10.1 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 Schwalmstadt ermittelt werden.

10.2 Ergebnisse

Da sich beide Immissionsorte nördlich der PV-Anlage befinden und Immissionsort 1 näher an der PV-Anlage liegt, genügt es die Berechnungen für Immissionsort 1 durchzuführen (worst case). Für diesen 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 des Wohngebäudes am Immissionsort 1 gelangen könnte. Weil die Reflexionszeit mit der Fensterhöhe zunimmt, werden die Berechnungen für das Obergeschoss des Wohngebäudes beim Immissionsort 1 mit der Fenstermitte über Grund von 5,50 m durchgeführt. Die berechneten γ -Flächen sind in Bild 4 eingezeichnet. Sie haben keine Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, Sonnenlicht kann von der PV-Anlage zu keiner Zeit zum Wohngebäude bei Immissionsort 1 und damit auch nicht zu Immissionsort 2 reflektiert werden.

11 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, ob von der geplanten PV-Anlage Trutzhain Blendwirkungen für Kraftfahrer auf einigen Straßen ausgehen und ob Lichtimmissionen an Immissionsorten auftreten.

Bei Fahrten auf der B 454 und der K 109 tritt keine Kraftfahrerblendung auf. Bei Fahrten auf dem Straßenzug Abbé-Pierre-Dentin-Straße/Struthfeld ist in Fahrtrichtung Ost ebenfalls keine Kraftfahrerblendung möglich; bei Fahrten in Richtung West tritt jedoch Kraftfahrerblendung auf, die auch durch Änderungen am Modullayout nicht verhindert werden kann. Als Abhilfemaßnahme wird empfohlen, den Zaun an der Nordostgrenze von TF2 mit einem Kunststoffgewebe zu verkleiden, das nicht mehr als 30 % Transmission besitzt.

Sonnenlicht kann von der PV-Anlage zu keiner Zeit zu den Wohngebäuden bei zwei Immissionsorten reflektiert werden, eine Lichtimmission ist nicht möglich, die LAI-Hinweise werden eingehalten.

Bei Berücksichtigung der empfohlenen Abhilfemaßnahme ist aus Sicht des Unterzeichners gegen die Errichtung der PV-Freiflächenanlage in Schwalmstadt-Trutzhain mit dem in diesem Gutachten betrachteten Modullayout nichts einzuwenden.



Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.

Anhang



Bild 1: Übersicht der geplanten PV-Anlage Trutzhain mit den Teilflächen TF1 und TF2, dem neuen Feuerwehrgerätehaus FGH, den untersuchten Kraftfahrerblickpunkten A bis H sowie mit den Immissionsorten 1 und 2

*gelbe, durchgezogene Linien: Zaunabschirmung notwendig
gelbe, gepunktete Linie: Zaunabschirmung evtl. notwendig*

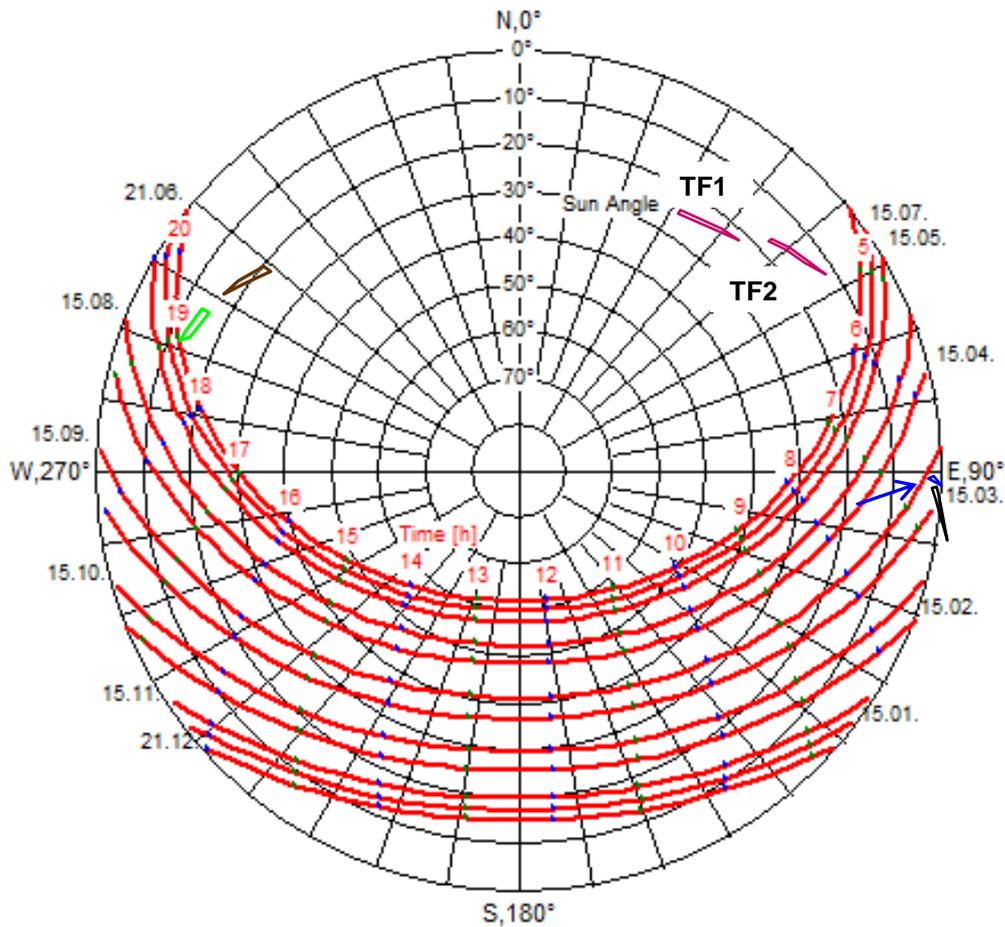


Bild 2: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Trutzhain mit γ -Fläche zur Bewertung der Vorbeifahrt eines Kfz auf der B 454 und der K 109 an der PV-Anlage

B 454

- : Blickpunkt bei Markierung F zu TF1, Fahrtrichtung West
- : Blickpunkt bei Markierung H zu TF2, Fahrtrichtung West
- : Blickpunkt bei Markierung E zu TF2, Fahrtrichtung Ost
- : Blickpunkt bei Markierung G zu TF2, Fahrtrichtung Ost

K 109

- : Blickpunkt bei Markierung I zu TF1 und TF2, Fahrtrichtung Nordost

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

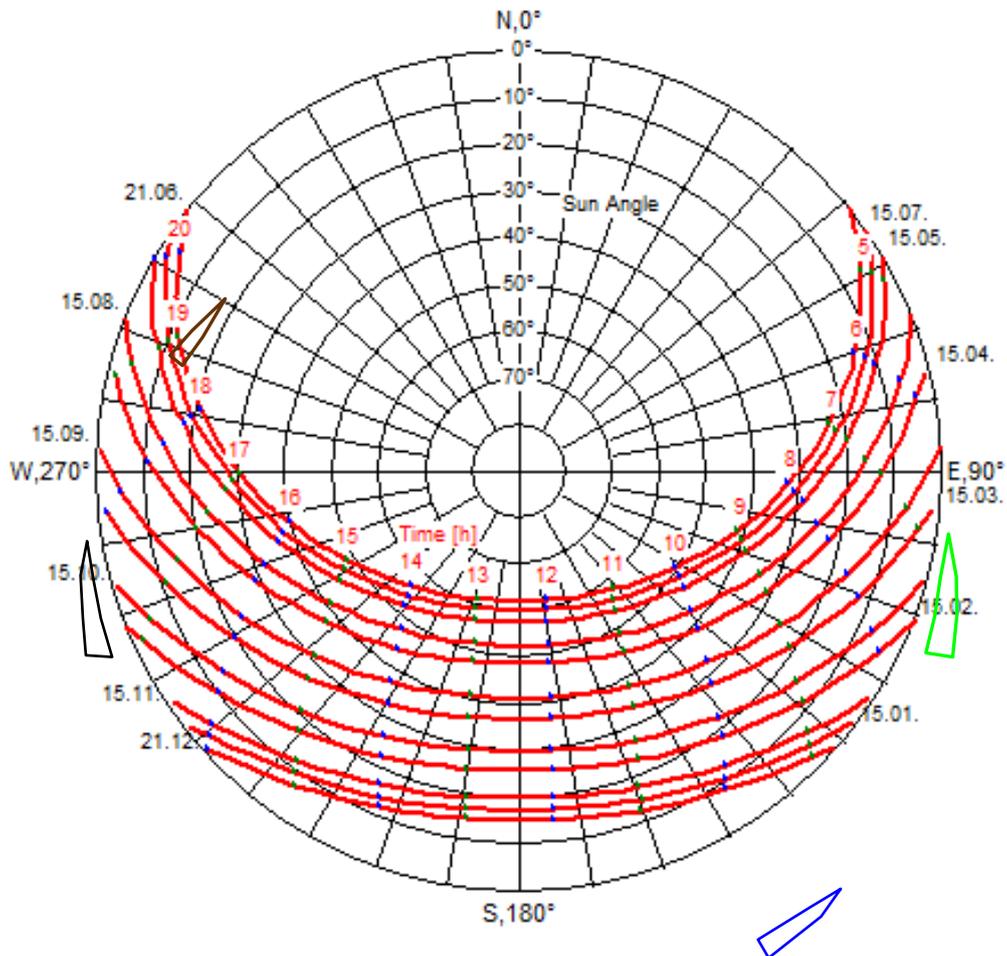


Bild 3: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Trutzhain mit γ -Fläche zur Bewertung der Vorbeifahrt eines Kfz auf dem Straßenzug Abbé-Pierre-Dentin-Straße/Struthfeld an der PV-Anlage

- : Blickpunkt bei Markierung A zu TF1, Fahrtrichtung Ost
- : Blickpunkt bei Markierung C zu TF2, Fahrtrichtung Ost
- : Blickpunkt bei Markierung B zu TF1, Fahrtrichtung West
- : Blickpunkt bei Markierung D zu TF2, Fahrtrichtung West

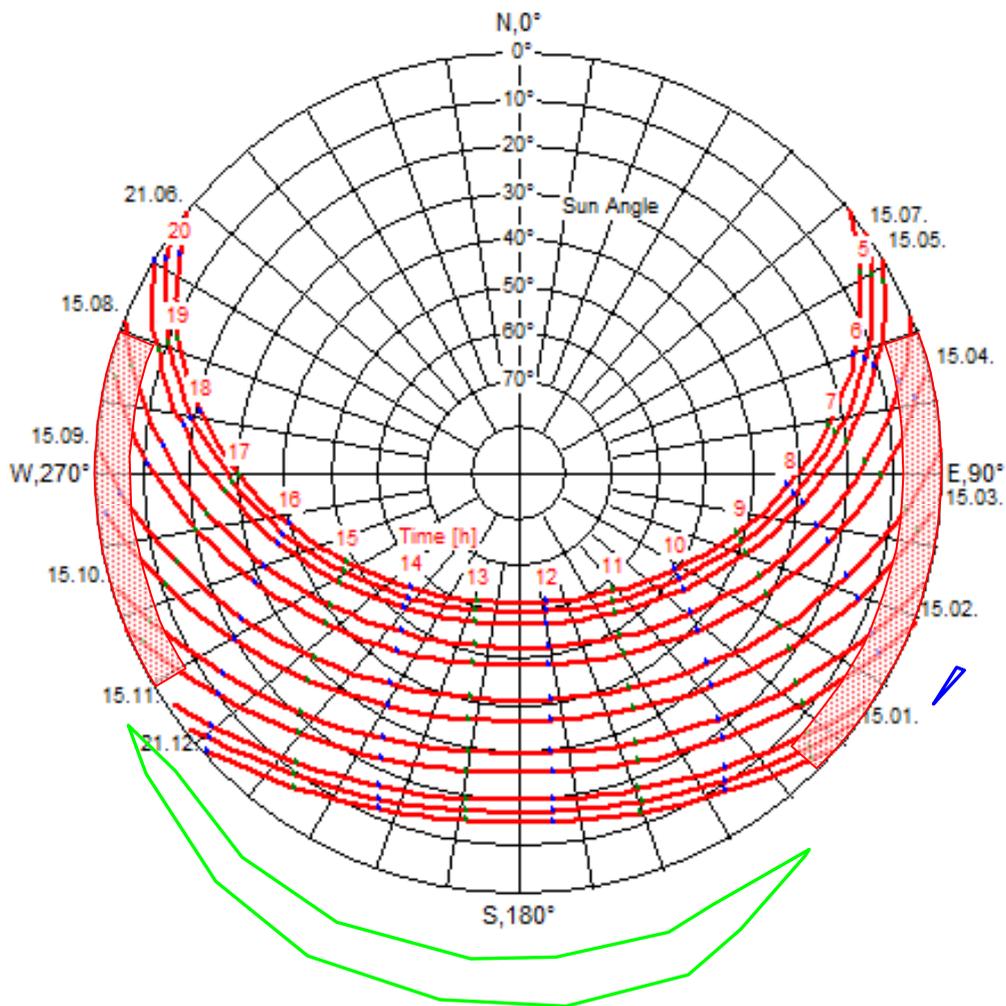
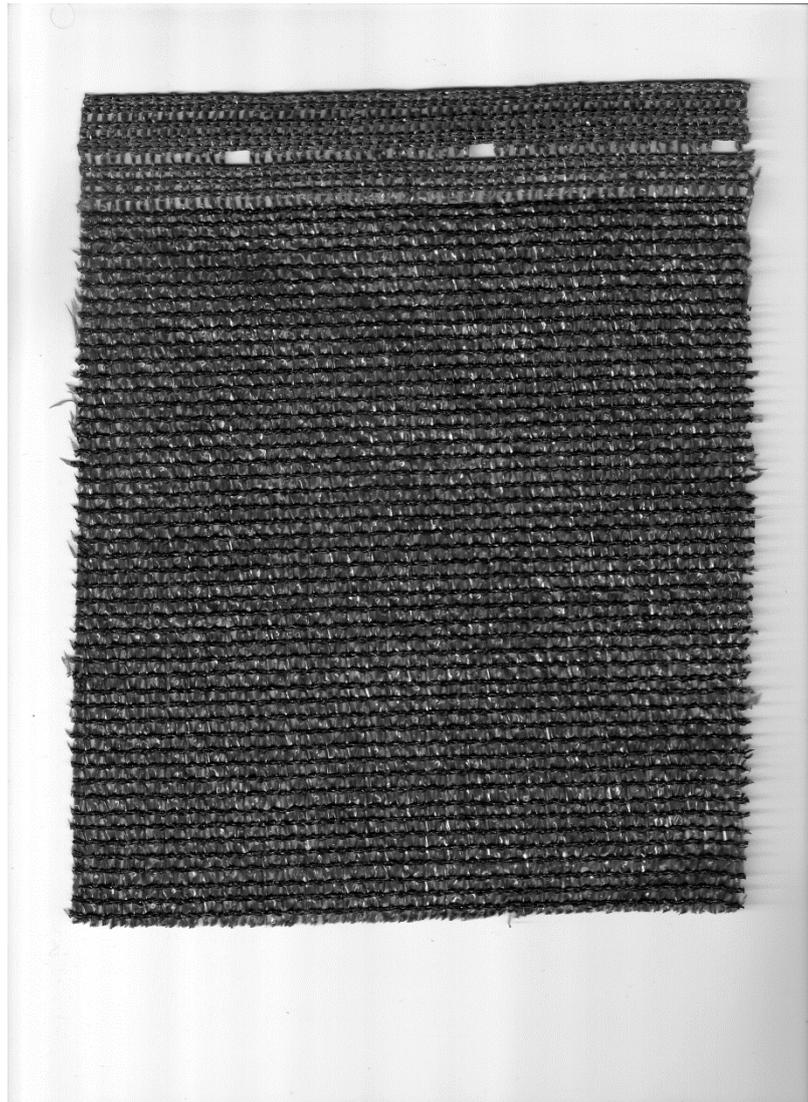


Bild 4: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Trutzhain mit γ -Fläche zur Bewertung der Reflexionszeiten zu Immissionsort 1

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

- : Blick zu TF1
- : Blick zu TF2



*Bild 5: Untersuchtes Kunststoffgewebe der Fa. Evios Energy Systems GmbH
Maßstab: ca. 1:2*



*Bild 6: Untersuchtes Kunststoffgewebe, Lieferant Fa. evia Verkehrstechnik GmbH/ACCURA NTV KG
Maßstab: ca. 1:2*