

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 9. 12. 2024

G u t a c h t e n
G77/2024
zur Frage der eventuellen Blend- und Störwirkung von Straßennutzern,
Lokführern und Anwohnern durch eine bei Cham
zu installierende Photovoltaikanlage

(Dieses Gutachten besteht aus 11 Seiten
und einem Anhang mit weiteren 6 Seiten)

1 Auftraggeber

Den Auftrag zur Erarbeitung des Gutachtens erteilte die tec-generation GmbH, Hauptstraße 7 in 93494 Waffenbrunn.

Auftragsdatum: 19. 11. 2024

2 Auftragsache

Die tec-generation GmbH plant die Errichtung einer Freiflächen-Photovoltaikanlage (Agri-PV-Anlage) in der Nähe von Cham. Es stellt sich die Frage, ob Nutzer von an der PV-Anlage vorbeiführenden Straßen, Lokführer auf der an der PV-Anlage vorbeiführenden Bahnstrecke Waldmünchen-Cham 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
Azimut (horizontaler Sonnenwinkel) bzw. momentane Fahrtrichtung eines Kfz/einer Lok	α
Orientierung der Modultischreihen	ν
vertikaler Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts	δ
Neigung der PV-Module	ε

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

4 Informationen zur Photovoltaik-Anlage

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

- Lageplan
- Modulbelegungsplan
- Modultischquerschnitt
- Fotos

Die Entfernungen, Geländehöhen und horizontalen Winkel wurden mit google earth ermittelt. Der monatliche Sonnenstand für Cham (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 Cham und topografische Daten

5.1 Die PV-Anlage

Die etwa rechteckige PV-Anlage wird auf einem bisher landwirtschaftlich genutzten Gelände errichtet, s. Bild 1 im Anhang. Das PV-Anlagengelände ist fast eben; die Geländeoberkante (GOK) fällt von West nach Ost von 387 m über Normalhöhennull (NHN) auf 380 m.

Die geplante Leistung beträgt 4,798 MW_{peak}. Nach aktuellem Planungsstand werden Module mit einer Modulleistung von 570 W_{peak} eingesetzt. Das endgültige Modulayout steht noch nicht fest. Geplante Variante 1: Die Modultischreihen verlaufen von Ost nach West, die Modulneigung gegen Süd ε beträgt 15°. Geplante Variante 2: Die Modultischreihen verlaufen von Nord nach Süd, die Module der Reihen werden abwechselnd nach Ost und West geneigt („Satteldach“-Anordnung), die Modulneigung gegen Süd ε beträgt 20°. Die Modulober- und -unterkante befinden in einer Höhe von 4,51 m bzw. 2,10 m über GOK. Im Folgenden werden beide Modulayouts untersucht.

5.2 Die untersuchten Straßen

Im Bereich der PV-Anlage befinden sich zwei Straßen, bei denen evtl. Blendung für Straßennutzer auftreten kann. Westlich der PV-Anlage führt die St 2146 an der PV-Anlage vorbei. Der Fahrtrichtungswinkel α der Straße beträgt in Fahrtrichtung Südost bei Markierung A 137,4°; etwa in Höhe der Ortschaft Lohweiher dreht der Fahrtrichtungswinkel in einer Rechtskurve auf 177°. Die Fahrbahnoberkante (FOK) der Straße fällt von Markierung A bis Markierung C von 399 m auf 386 m. Von der Straße ist ein freier Blick zur PV-Anlage gegeben.

Östlich der PV-Anlage führt die Straße Prienzing an der PV-Anlage vorbei. Der Straßenverlauf ist leicht kurvig; bei Markierung C beträgt der Fahrtrichtungswinkel in Fahrtrichtung Südost 156°, dreht kurz nach Markierung 2 auf 122° und kurz vor Erreichen des Ortes Prienzing zurück auf 143°. Die FOK steigt von C nach D von 384 m auf 399 m. Auch von dieser Straße ist ein freier Blick zur PV-Anlage gegeben.

5.3 Die untersuchte Bahnstrecke

Im Bereich der PV-Anlage ist diese Bahnstrecke zwischen den Markierungen E und F sichtbar. Die eingleisige Strecke verläuft geradlinig ziemlich genau von Nord nach Süd; der Fahrtrichtungswinkel beträgt in Fahrtrichtung Süd 178°. Die Schienenoberkante fällt von E bis F von 393 m auf 385 m.

5.4 Die untersuchten Immissionsorte

Potentielle Immissionsorte befinden sich im Norden und Osten der PV-Anlage. Die Höhendaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Bei den Immissionsorten 2 und 3 befinden sich jeweils zwei Wohnhäuser nebeneinander.

Immissionsort, Adresse	Höhe über NHN	Fenster im	Höhe Fenstermitte über Grund	Höhe Fenstermitte über Grund
1, Kita St. Martin Bahnhofstr. 24 Waffenbrunn	384 m	Erdgeschoss	2 m	386 m
2, Prienzing 50/51 Willmering-Prienzing	392 m	1. Obergeschoss	6 m	398 m
3, Prienzing 38/38a Willmering-Prienzing	400 m	2. Obergeschoss	8,50 m	408,50 m

Tabelle 1: Die untersuchten Immissionsorte

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

6.1 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 Ab-

solotblendung 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/Lokführer hat nicht mehr die Möglichkeit, diese Lichtquelle „auszublenden“: Er muss die vor ihm liegende Straße bzw. den Gleiskörper und dessen Umgebung beobachten und alle Licht- und sonstigen Signale sowie die Anzeigeeinstrumente im Pkw oder der Lok 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.

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 „schutzwürdige 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 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 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 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/Lokführer

8.1 Sehbedingungen eines Kraftfahrers/Lokführers

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/Lokführers 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 4 bis 6 zeigen das Sonnenstandsdiagramm für Cham 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/Lokführer 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/Lokführern an der PV-Anlage ermittelt werden.

Sehbedingungen Kraftfahrer: 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.

Sehbedingungen Lokführer: Die Augenhöhe h_F eines Lokführers beträgt bis zu 3,30 m. Es kann angenommen werden, dass der Lokführer normalerweise auf einen Punkt auf einen Punkt des vor ihm liegenden Gleiskörpers blickt, der etwa 100 m vor ihm liegt. Daraus ergibt sich ein vertikaler Winkel σ von ca. $-1,9^\circ$ (Blick leicht nach unten), unter dem der Lokführer auf den Gleiskörper blickt.

8.2 Auswertung mittels des Sonnenstandsdiagramms

ψ ist der horizontale Winkel zwischen der momentanen Fahrtrichtung α und der horizontalen Blickrichtung τ Kraftfahrer-/Lokführerauge - bestimmter Punkt der PV-Anlage. Fährt ein Kfz/eine Lok an der PV-Anlage vorbei, ändert sich ständig die Blickrichtung τ des Kraftfahrers/Lokführers zur Anlage und damit auch der Winkel ψ .

Damit Sonnenlicht in Richtung Kraftfahrer/Lokführer reflektiert werden kann, muss der vertikale Blickwinkel des Kraftfahrer-/Lokführerauges 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/einer Lok 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 dem weiteren Parametern Neigung der Module $\varepsilon = 15^\circ$ oder 20° 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/Lokführers fallen kann.

Die Ergebnisse der Berechnungen für α und γ werden in das Sonnenstandsdiagramm für Cham 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.

8.3 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion ins Auge eines Kraftfahrers

8.3.1 St 2146

Die für diese Straße berechneten γ -Flächen sind in Bild 2 eingezeichnet.

Markierung A, Fahrtrichtung Südost: Die γ -Flächen für die Modulneigungen Süd und Ost liegen unterhalb der Sonnenstandslinien, sogar außerhalb des Polardiagramms und haben keine Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 8.2 kann Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer nicht auftreten, eine Kraftfahrerblendung ist bei diesen Modulneigungen nicht möglich. Die γ -Fläche für

die Modulneigung West hat jedoch Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, Sonnenlicht kann etwa in der zweiten Märzhälfte und der zweiten Septemberhälfte zwischen 9.15 Uhr und 9.30 Uhr MEZ zum Kraftfahrer reflektiert werden. Diese Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer ist jedoch nicht unbedingt mit einer Blendung verbunden. Die Sonnenlichtreflexion erfolgt bei Blickwinkeln θ des Kraftfahrers zur PV-Anlage von 13° bis 20° , also bei weniger blendkritischen Blickwinkeln.

Für den Blickwinkelbereich bis 20° beträgt der Abstand Kraftfahrer - PV-Anlage 300 m bis 500 m. Bei diesen Entfernungen sieht der Kraftfahrer die PV-Anlage vertikal stark komprimiert unter einem vertikalen Winkel von ca. $0,025^\circ$, d.h. er nimmt die PV-Anlage als sehr schmales Band wahr. Der Durchmesser der von der Erde aus gesehenen Sonne beträgt ca. $0,53^\circ$. Wird die PV-Anlage vom Kraftfahrer unter einem vertikalem Winkel gesehen, der kleiner als $0,53^\circ$ ist, wird nur ein Teil der Sonnenscheibe auf den PV-Modulen abgebildet (s. Bild 3), die Beleuchtungsstärke (Intensität) des am Auge des Kraftfahrers ankommenden, reflektierten Sonnenlichts verringert sich mit dem Faktor $f_s = \text{Verhältnis Fläche des abgebildeten Teils der Sonnenscheibe} : \text{Fläche der gesamten Sonnenscheibe}$. Für den vertikalen Winkel $0,025^\circ$ ist $f_s = 0,06$ oder 6 %. Auf den Kraftfahrer wirken in dieser Situation gleichzeitig das direkte und das von der PV-Anlage reflektierte Sonnenlicht ein. Wenn es zu einer Blendung des Kraftfahrers kommt, wird diese allenfalls vom direkten Sonnenlicht hervorgerufen, aber nicht vom reflektierten Sonnenlicht wegen dessen extrem schwachen Intensität. Wegen der Überstrahlung durch das direkte Sonnenlicht ist sogar zu vermuten, dass der Kraftfahrer das reflektierte Sonnenlicht gar nicht wahrnimmt.

Fahrtrichtung Nordwest: Die γ -Flächen liegen für alle drei Modulneigungen oberhalb der Sonnenstandslinien, Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer kann nicht auftreten, eine Kraftfahrerblendung ist auch in dieser Fahrtrichtung nicht möglich.

Fazit: Bei Fahrten auf der St 2146 tritt keine Kraftfahrerblendung auf.

8.3.2 Straße Prienzing

Am nördlichen Beginn der Straße bei Markierung C beträgt der Blickwinkel θ des Kraftfahrers 36° und steigt bei der Fahrt in Richtung Südost kontinuierlich weiter an. Von Süden kommend, ist die PV-Anlage ab Markierung D für den Kraftfahrer sichtbar. Der Blickwinkel liegt bei 39° . Bei der Fahrt in Richtung Nordwest sinkt der Blickwinkel ab der Linkskurve zunächst auf 22° und steigt dann wieder kontinuierlich an. Da in beiden Fahrtrichtungen der Kraftfahrerblickwinkel θ beständig $> 20^\circ$ ist, ist bei Fahrten auf dieser Straße keine Kraftfahrerblendung möglich.

8.4 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion ins Auge eines Lokführers

Bei Markierung E wird die PV-Anlage in Fahrtrichtung Süd für einen Lokführer sichtbar. Der Blickwinkel θ des Lokführers beträgt an dieser Markierung 31° und steigt bis zur Vorbeifahrt an der PV-Anlage kontinuierlich an. Bei Markierung F wird die PV-Anlage in Fahrtrichtung Nord für einen Lokführer sichtbar. Der Blickwinkel θ des Lokführers beträgt an dieser Markierung 26° und steigt bis zur Vorbeifahrt an der PV-Anlage kontinuierlich an. Da in beiden Fahrtrichtungen der Lokführerblickwinkel θ

beständig $> 20^\circ$ ist, ist bei Fahrten auf dieser Bahnstrecke keine Lokführerblendung möglich.

9 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion in Richtung der Immissionsorte

9.1 Geometrische Bedingungen

Um die evtl. von der PV-Anlage ausgehende Störfunktion 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 Cham ermittelt werden.

Für die zu untersuchenden Immissionsorte 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 Wohngebäude an den Immissionsorten gelangen könnte.

9.2 Ergebnisse

Da die Reflexionszeit mit der Fensterhöhe zunimmt, werden die Berechnungen für das jeweils höchste Geschoss der Wohngebäude durchgeführt. In den Bildern 4 bis 6 sind die Ergebnisse für die Immissionsorte 1 bis 3 wiedergegeben. Die aus denjenigen γ -Flächen, die Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien haben, berechneten Reflexionszeiten enthält Abschnitt 9.2.4, Tabelle 2.

9.2.1 Immissionsort 1

Die γ -Flächen für die Modulneigung Süd und West haben keine Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, die γ -Fläche für die Modulneigung Ost hat jedoch solche Schnittpunkte. Von den nach Ost geneigten Modulen wird Sonnenlicht zu diesem Immissionsort reflektiert. Die Sonnenlichtreflexion erfolgt etwa von Mitte November bis Mitte Januar bis August ca. zwischen 13.20 Uhr und 13.50 Uhr.

9.2.2 Immissionsort 2

Die γ -Flächen für die Modulneigung Süd und West haben wieder keine Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, aber die γ -Fläche für die Modulneigung Ost. Die Sonnenlichtreflexion von den nach Ost geneigten Modulen erfolgt etwa von Mitte März bis Mitte Mai und in den Monaten August und September ca. zwischen 14.15 Uhr und 15.30 Uhr.

9.2.3 Immissionsort 3

Die γ -Fläche für die Modulneigung West hat keine Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien. Die γ -Fläche für die Modulneigung Süd hat nur in einem kleinen Bereich Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, der aber innerhalb des $7,5^\circ$ -Bereiches liegt, der für die Berechnung der Reflexionszeiten nicht herangezogen wird. Die γ -Fläche für die Modulneigung Ost hat Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, die

Sonnenlichtreflexion von den nach Ost geneigten Modulen erfolgt im Juni ca. zwischen 15.25 Uhr und 15.40 Uhr.

9.2.4 Die Reflexionszeiten

Immissi- onsort	Reflexions- tage pro Jahr	Maximale tägliche Reflexionszeit	Mittlere tägliche Reflexionszeit	Jährliche Reflexionszeit im Kalenderjahr
1	83	10,9 min	1,63 min	$83 \cdot 1,63 \text{ min}$ = 2,6 Stunden
2	140	8,6 min	5,79 min	$140 \cdot 5,79 \text{ min}$ = 13,5 Stunden
3	66	7,7 min	4,04 min	$66 \cdot 4,04 \text{ min}$ = 4,4 Stunden

Tabelle 2: Maximale tägliche und mögliche jährliche Reflexionszeiten für die Immissionsorte 1 bis 3, jeweils Modulneigung Ost

Sowohl die maximalen täglichen als auch die jährlichen Reflexionszeiten erfüllen die 30 Minuten-/30 Stunden-Regel der LAI-Hinweise.

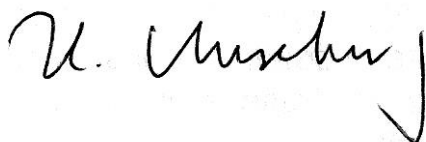
10 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, ob von der geplanten PV-Anlage Cham Blendwirkungen für Kraftfahrer auf der St 2146 und der Straße Prienzing sowie für Lokführer der Bahnstrecke Waldmünchen-Cham ausgehen und ob Lichtimmissionen bei drei Immissionsorten auftreten.

Bei Fahrten auf den beiden genannten Straßen und auf der Bahnstrecke tritt keine Kraftfahrer- bzw. Lokführerblendung auf.

Die nach LAI-Hinweisen zulässigen maximalen täglichen und jährlichen Reflexionszeiten werden an allen Immissionsorten eingehalten.

Gegen die Errichtung der PV-Freiflächenanlage in Cham mit den beiden geplanten Modullayouts - Ausrichtung der Modultischreihen Ost-West, Modulneigung Süd bzw. Ausrichtung der Modultischreihen Nord-Süd, Modulneigung Ost und West - ist aus Sicht des Unterzeichners nichts einzuwenden.



Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.

Anhang



Bild 1: Übersicht der geplanten PV-Anlage Cham (rot umrandet) mit den untersuchten Blickpunkten A bis D auf zwei Straßen, den Blickpunkten E und F auf der Bahnstrecke Waldmünchen-Cham und den Immissionsorten 1 bis 3

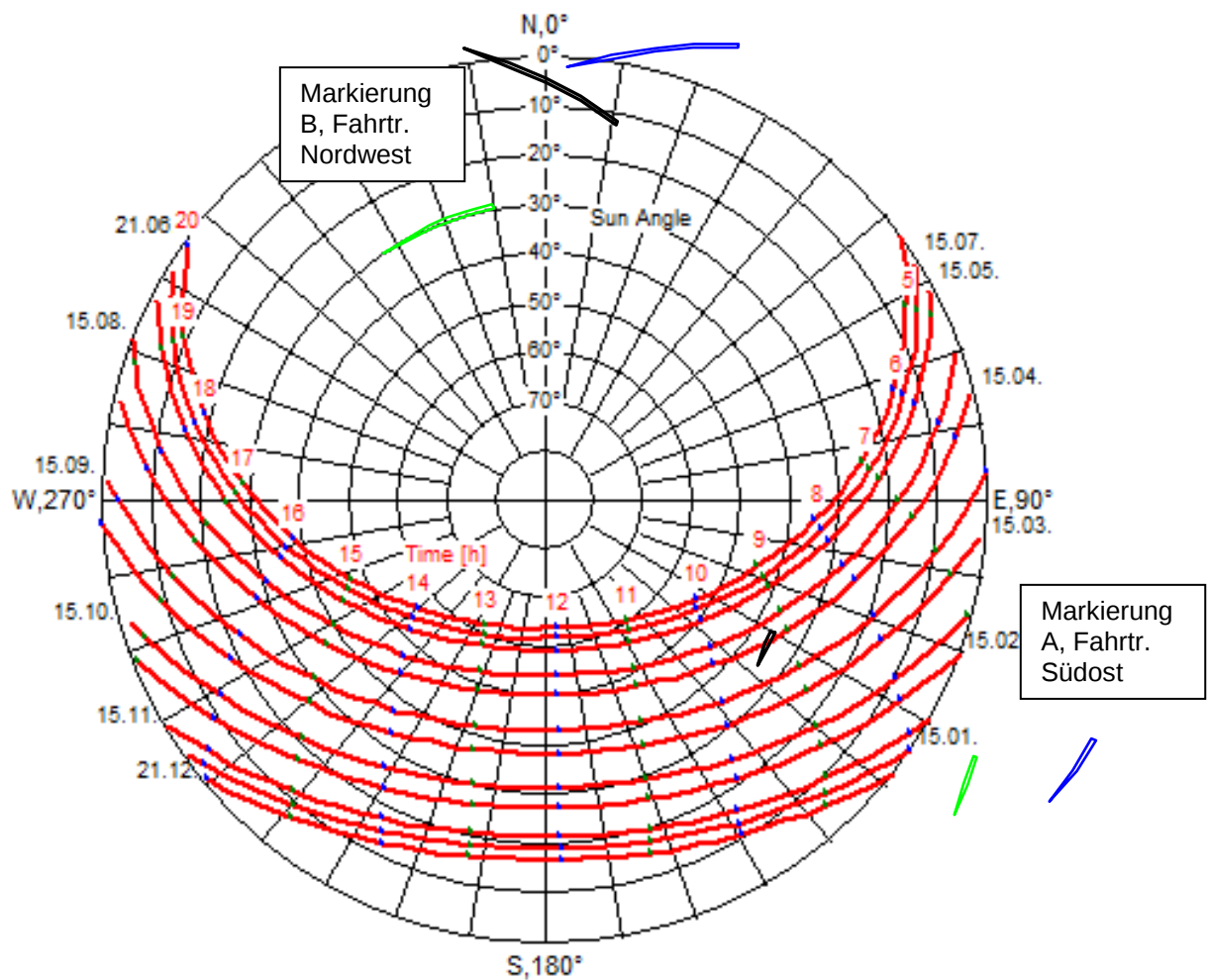


Bild 2: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Cham mit γ -Flächen zur Bewertung der Vorbeifahrt eines Kfz auf der St 2146 an der PV-Anlage

- : Modulneigung Süd
- : Modulneigung Ost
- : Modulneigung West

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

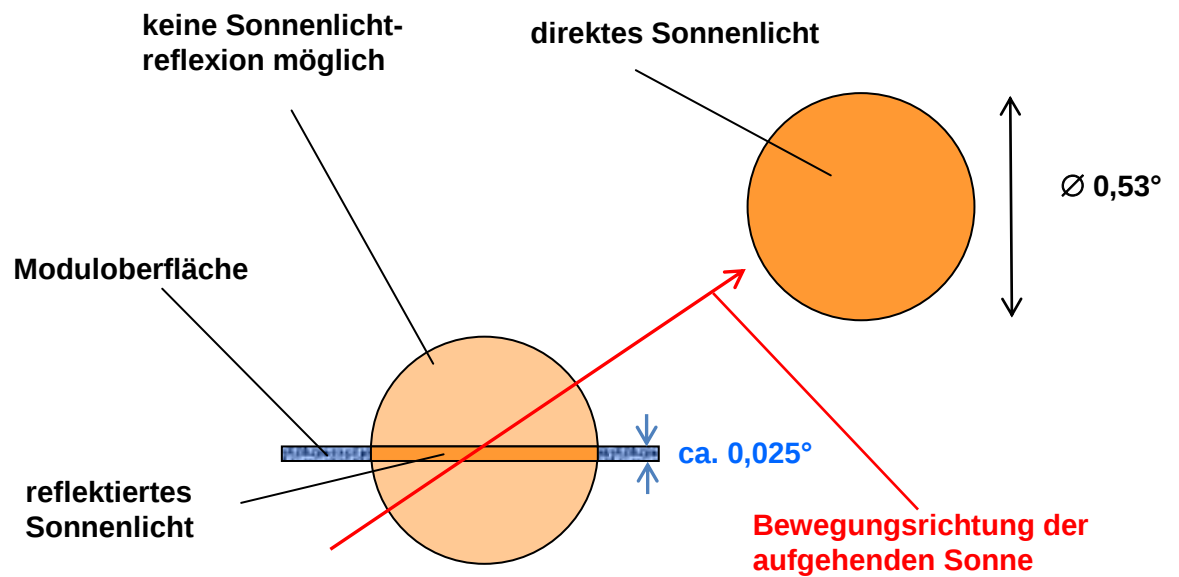


Bild 3: Schematische Darstellung der Winkelgröße einer perspektivisch verkürzt wahrgenommenen PV-Anlage und der Winkelgröße der Sonne

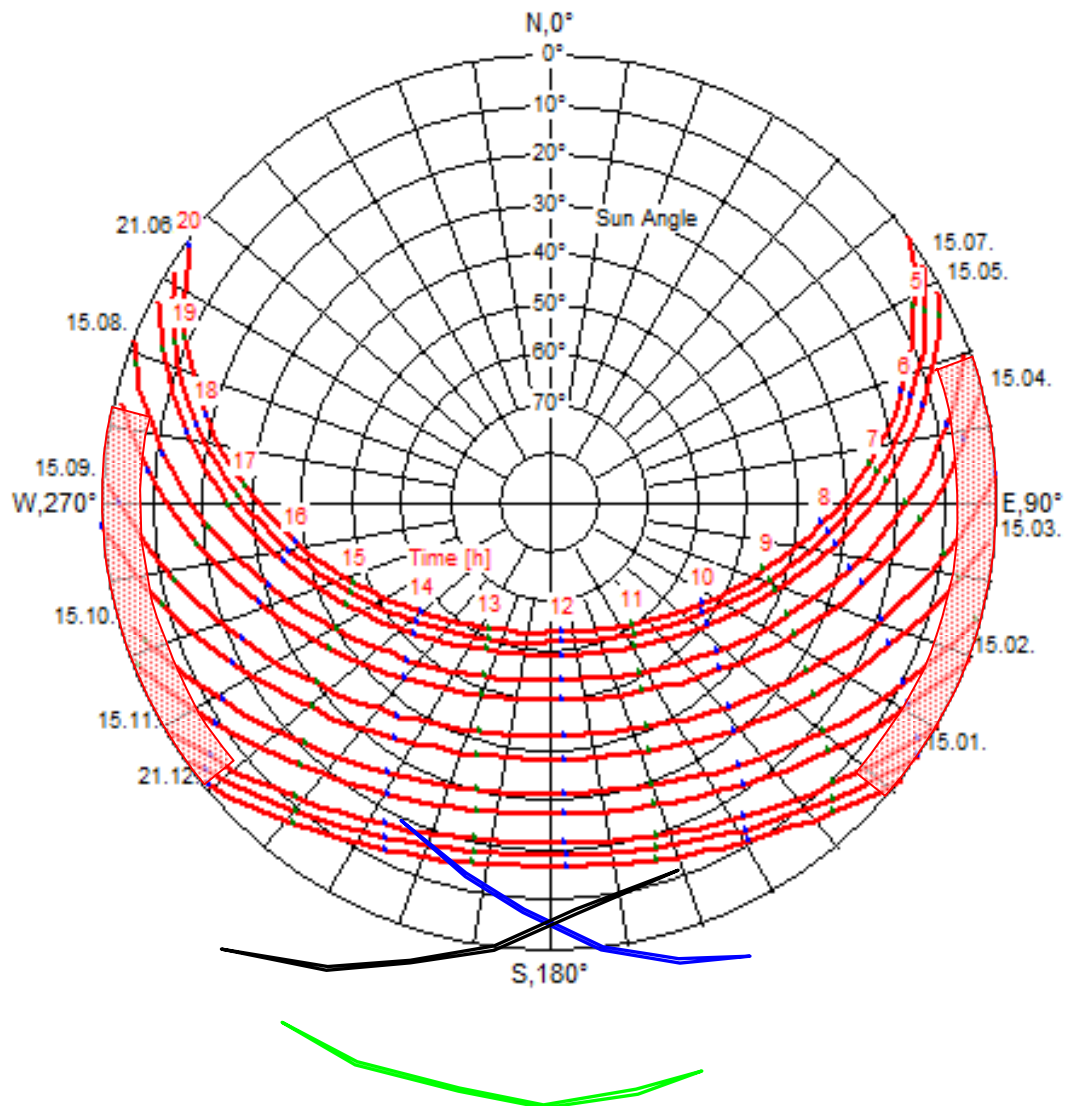


Bild 4: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Cham mit γ -Flächen zur Bewertung der Reflexionszeit zu Immissionsort 1

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

- : Modulneigung Süd
- : Modulneigung Ost
- : Modulneigung West

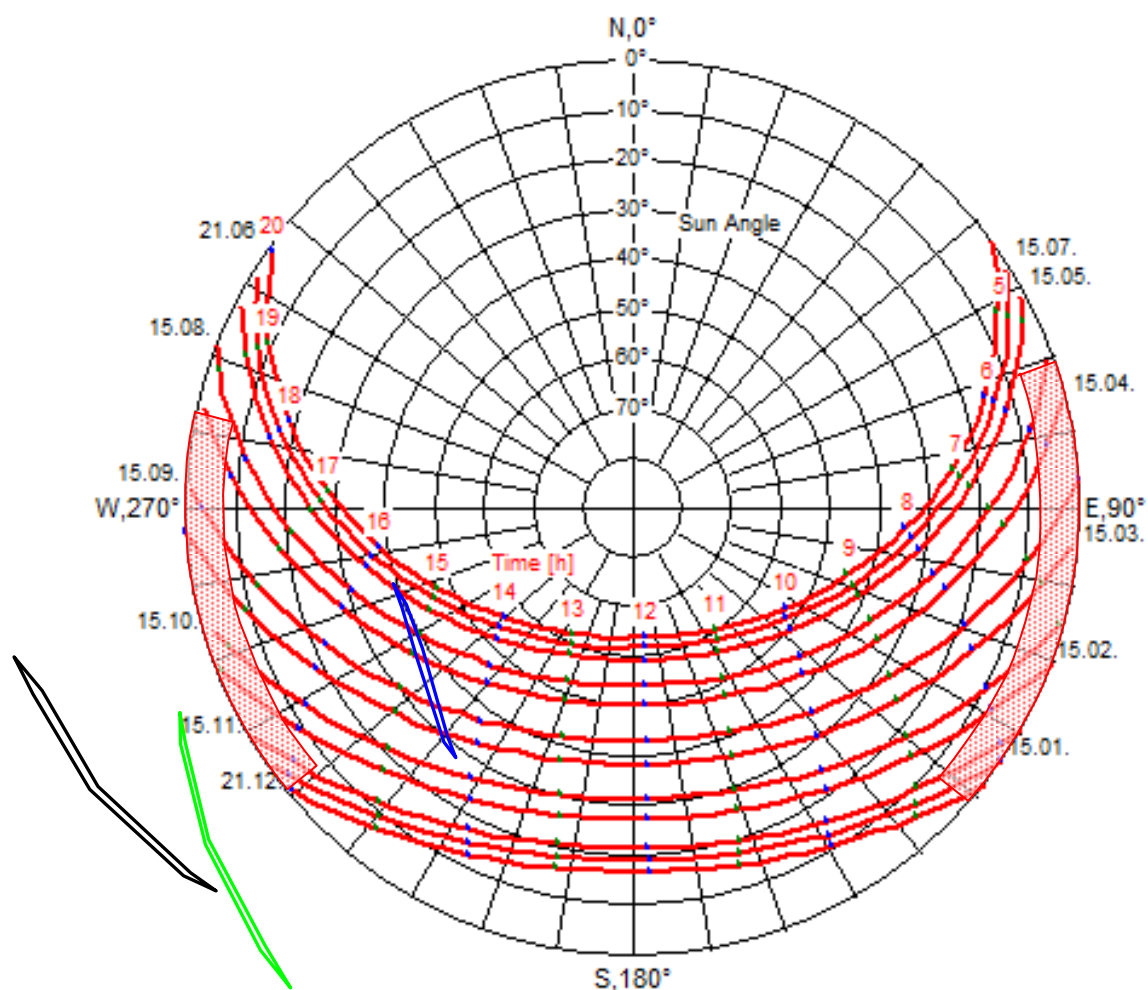


Bild 5: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Cham mit γ -Flächen zur Bewertung der Reflexionszeit zu Immissionsort 2

- : Modulneigung Süd
- : Modulneigung Ost
- : Modulneigung West

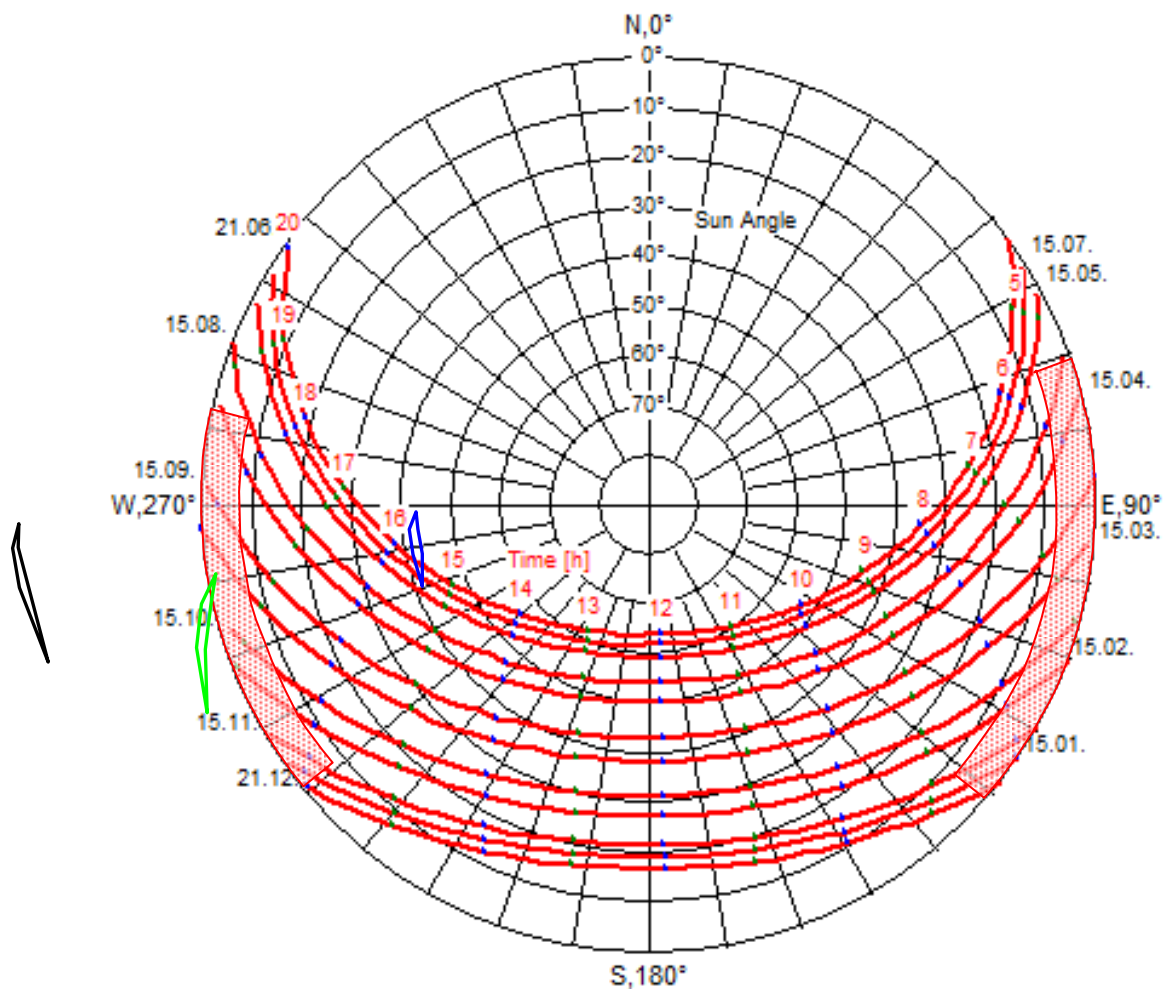


Bild 6: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Cham mit γ -Flächen zur Bewertung der Reflexionszeit zu Immissionsort 3

- : Modulneigung Süd
- : Modulneigung Ost
- : Modulneigung West