

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

Berlin, den 7. September 2012

G u t a c h t e n
G31/2012
zur Frage der eventuellen Blend- und Störwirkung von Nutzern
der BAB A 81 durch eine im Bereich der Ortslage Lauda-Königshofen
installierte Photovoltaik-Freiflächenanlage

(Dieses Gutachten besteht aus 13 Seiten
und einem Anhang mit 3 weiteren Seiten)

1 Auftraggeber

Den Auftrag zur Erarbeitung des Gutachtens erteilte die juwi Solar GmbH, Energie-Allee 1 in 55286 Wörrstadt.

Auftragsdatum: 29. August 2012

2 Auftragsache

Die juwi Solar GmbH plant die Errichtung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage unmittelbar östlich der BAB A 81 im Bereich der Ortslage Lauda-Königshofen. Es stellt sich die Frage, ob Kraftfahrer, die diese Autobahn benutzen, bei der Vorbeifahrt an der PV-Anlage durch Sonnenlicht, das von der Oberfläche der PV-Module reflektiert wird, geblendet oder in sonst unzumutbarer Weise gestört werden. Dieses Gutachten dient der Klärung der Frage, ob und mit welcher Häufigkeit solche Situationen entstehen können und falls ja, welche Abhilfemöglichkeiten bestehen.

3 Definitionen

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

Es werden folgende Winkel verwendet:

Sonnenhöhenwinkel (vertikaler Sonnenwinkel)	γ
Azimut (horizontaler Sonnenwinkel) bzw. momentane Fahrtrichtung eines Kfz auf der B 1	α
Orientierung der Modulreihen	α_M
Orientierung der Modulreihen gegen Ost oder West $\alpha_M - \alpha$	ν
vertikaler Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts	δ

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

4 Topografische Daten und Angaben zur Photovoltaik-Anlage

Die topografischen Daten und die Beschreibung der Anlage beruhen auf folgenden Informationen, die von der Fa. juwi Solar zur Verfügung gestellt wurden:

- Lageplan der PV-Anlage
- Belegungsplan der PV-Anlage
- Schemazeichnung der PV-Anlage (Querschnitt)
- Fotos
- Mündliche und Email-Informationen von Frau Dipl.-Ing. Britta Könen, juwi Solar

Verwendete Programme: Die Entfernungen, horizontale Winkel und Geländehöhen wurden mit google earth ermittelt. Der monatliche Sonnenstand für Lauda-Königshofen (Sonnenhöhe und -azimut) wurde mit der Website www.stadtklima-stuttgart.de ermittelt. Die Berechnung der Winkel des reflektierten Sonnenlichts erfolgte mit eigenen Excel-Programmen.

4.1 Topografische Daten

Die PV-Anlage wird auf einer langgestreckten Grundfläche östlich der BAB A 81 und parallel zu dieser errichtet und besteht aus zwei Teilflächen (s. Bild 1 im Anhang), die durch die Trasse einer Freileitung voneinander getrennt sind. Die Autobahn beschreibt im interessierenden Abschnitt eine langgestreckte, umgekehrte S-Kurve; die Fahrtrichtung α beträgt 400 m nördlich des Beginns der PV-Anlage (s. Markierung 5 in Bild 1) $30^\circ/214^\circ$, dreht in Höhe der Anlage Nord auf $13^\circ/193^\circ$, um dann 400 m südlich des Endes der Anlage (s. Markierung 1 in Bild 1) auf bis zu $50^\circ/230^\circ$ anzusteigen. Im Mittel liegt die Fahrtrichtung bei $20^\circ/200^\circ$.

Im genannten Streckenabschnitt fällt die Autobahn von zunächst 335 m über Normalnull (NN) auf 326 m am Nordrand der Anlage Nord ab, steigt bis auf 346 m etwa 60 m südlich der Anlage Süd an und fällt von dort bis zum Punkt 400 m südlich der Anlage Süd auf 339 m ab. Die PV-Anlage wird auf einem leicht welligen Hang installiert, der von Nordosten nach Südwesten hin ansteigt: Von 315 m bei Eckpunkt B auf 327 m bei Eckpunkt D der Anlage Nord und von 325 m bei Eckpunkt F auf 343 m bei Eckpunkt I der Anlage Süd. Ein Kraftfahrer blickt also während der Vorbeifahrt an der PV-Anlage einige Meter nach unten zur Anlage. Da sich jedoch in einigen Abschnitten zwischen Autobahn und PV-Anlage Bäume und Buschwerk befinden, ist die Anlage für den Kraftfahrer teilweise verdeckt.

4.2 Beschreibung der PV-Anlage

Der Mindestabstand der Anlage vom Rand der Autobahn beträgt 40 m. Die Länge der Anlage Nord bzw. Süd beträgt ca. 245 m bzw. 510 m, die Breite liegt jeweils zwischen 40 m und 60 m. Daraus ergeben sich Grundflächen von 1,7 bzw. 3.3 ha. Es ist eine installierte Leistung von insgesamt 2,26 MW_{peak} vorgesehen. Es sollen polykristalline Module der Fa. BYD (China), Typ BYD245P6-30, mit einer Leistung von je 245Wp installiert werden. Je 4 x maximal 11 Module werden auf einem sogenannten Tisch montiert; die Breite eines Tisches beträgt 18,06 m und die Tiefe eines Tisches (in Draufsicht gesehen) 3,88 m. Der lichte Abstand zwischen zwei Tischreihen beträgt 6,09 m. Daraus errechnet sich ein mittlerer Reihenabstand a von $3,88 \text{ m} + 6,09 \text{ m} = 9,97 \text{ m}$. Die Neigung ε der Module gegen Süden beträgt 25° . Die Tische werden in Reihen angeordnet, die in Ost-West-Richtung ausgerichtet sind (Winkel $\nu = 0^\circ$). Je nach zur Verfügung stehender Breite der PV-Anlage in Ost-West-Richtung werden 2 oder 3 Tische nebeneinander installiert. Der obere bzw. untere Rand der PV-Module auf den Tischen befindet sich in einer Höhe von 1,74 m bzw. 0,83 m über Geländeoberkante. Die mittlere Höhe der PV-Module über Geländeoberkante h_M beträgt damit 1,285 m.

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

5.1 Blendwirkung

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

Die bei Tageslicht am häufigsten auftretende Blendung wird von der Sonne verursacht. Befindet sich die Sonne im zentralen Gesichtsfeld des Kraftfahrers, tritt Absolutblendung auf, bei der man nicht mehr in der Lage wäre, ein Kfz sicher zu führen, da im Gesichtsfeld des Autofahrers keine Kontraste mehr erkennbar sind. Dieser sehr gefährlichen Situation entzieht man sich, indem die Sonne gegenüber dem Auge durch eine Sonnenblende bzw. Jalousie oder durch eine Hand abgeschattet wird. 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 verkehrsgefährdende 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 eine 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. Kritisch sind **Blendwinkel** $\theta \leq 10^\circ$, wenn also die störende Lichtquelle direkt im Gesichtsfeld des Beobachters liegt. Ein Kraftfahrer hat nicht mehr unbedingt die Möglichkeit, diese Lichtquelle „auszublenzen“, da er die vor ihm liegende Fahrbahn und deren Umgebung beobachten muss und seinen Blick daher nicht beliebig zur Seite richten kann, um einem evtl. vorhandenen Blendreflex auszuweichen. Ob bei solch kleinen Winkeln tatsächlich Blendung vorliegt, hängt nicht nur von den geometrischen Gegebenheiten, sondern im entscheidenden Maße davon ab, wie hoch die Intensität des Störlichts im Verhältnis zur Umgebungshelligkeit und v.a. zur Intensität des direkten Sonnenlichts ist. Hierfür ein Beispiel: An einem klaren Sonnentag kann die im Zenit stehende Sonne am Auge eines Beobachters eine Beleuchtungsstärke von 110 000 lx erzeugen. Wenn gleichzeitig eine Störlichtquelle eine zusätzliche Beleuchtungsstärke von 2000 lx beim Beobachter erzeugt, so blendet diese Störlichtquelle weniger, als am

Abend eine Störlichtquelle mit einer Blendbeleuchtungsstärke von 500 lx, wenn gleichzeitig die Sonnenbeleuchtungsstärke nur 5000 lx beträgt. Dieser hier dargestellte Sachverhalt wird auch in einer im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz erarbeiteten Broschüre festgestellt, die sich ausführlich mit den Wirkungen von PV-Anlagen auf Natur und Mensch beschäftigt ¹⁾. Dort heißt es: „Bei festinstallierten Anlagen sind aufgrund der Reflexionscharakteristik des Sonnenlichtes vor allem südlich der PV-FFA ²⁾ liegende Flächen (insbesondere, wenn diese auf einem im Vergleich zur PV-FFA erhöhten Standort liegen) betroffen, die bei hohem Sonnenstand durch Reflexe beeinträchtigt werden können. Aufgrund der dann günstigen Ausrichtung der Module zur Sonne (nahezu senkrechter Einfallswinkel) ist die Reflexion jedoch reduziert. **Zudem können abends bzw. morgens bei tiefstehender Sonne in den Bereichen westlich und östlich der PV-FFA Reflexionen auftreten, die allerdings durch (die dann ebenfalls in Sichtrichtung tiefstehende) Sonne relativiert werden**“. (Hervorhebung in Fettschrift durch den Unterzeichner).

Um eine Aussage über die Blendwirkung einer PV-Freiflächenanlage machen zu können, muss in jedem einzelnen Fall unter Beachtung des Blickwinkels die Beleuchtungsstärke der Blendlichtquelle ins Verhältnis zur Beleuchtungsstärke der Sonne gesetzt werden.

5.2 Störwirkung durch den Flimmereffekt

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

Es sind zwar keine Unfälle aus dem Verkehrswesen bekannt, die durch Flimmereffekte hervorgerufen worden sind. Um jedoch z.B. im Straßenverkehr jedes Unfallrisiko durch Flimmereffekte auszuschließen, enthalten alle Regelwerke zur Tunnelbeleuchtung Anforderungen an die Begrenzung des Flimmereffektes. So sollen nach einer Empfehlung der „Commission Internationale d’Eclairage“ (Internationale Beleuchtungskommission) die Leuchten in Straßentunneln in solchen Abständen angebracht werden, dass bei der Durchfahrt durch Tunnel mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit Flimmerfrequenzen zwischen 2,5 Hz und 15 Hz vermieden werden.

¹⁾ Herden, Chr.; Rasmus, J. und Gharadjedaghi, B.: Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen. Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skripten 247, Leipzig 2009

²⁾ PV-FFA: PV-Freiflächenanlage

Andere Regelwerke empfehlen die Vermeidung der Flimmerfrequenz im Intervall von 4 Hz bis 11 Hz oder 13 Hz. Als maximal zulässige Einwirkdauer werden 20 sec, 25 sec oder 30 sec empfohlen. Die offensichtliche Unsicherheit bei der Bewertung des Flimmereffektes rührt daher, dass es keine systematischen Studien über den Einfluss des Flimmerns auf die Verkehrssicherheit gibt. Eine Internet-Recherche ergibt, dass lt. dort verfügbarer Erfahrungsberichte photosensitive Epilepsie eher bei höheren Frequenzen als 10 Hz und bei Einwirkzeiten oberhalb von 30 sec auftritt.

Deshalb sind PV-Anlagen so auszulegen, dass bei der Vorbeifahrt sowohl von Lkw (vorausgesetzte Geschwindigkeit 60 km/h bis 80 km/h) als auch von Pkw (vorausgesetzte Geschwindigkeit 80 km/h bis 160 km/h) bei einer Einwirkzeit größer als 20 sec keine Flimmerfrequenzen im Intervall 4 Hz bis 15 Hz auftreten können. Durch diese Festlegung ist gewährleistet, dass Störungen der Verkehrssicherheit durch einen Flimmereffekt mit Sicherheit ausgeschlossen werden können.

Der Flimmereffekt bei der Vorbeifahrt an einer PV-Anlage entsteht dadurch, dass die PV-Module in Reihen mit einem festen, regelmäßigen Abstand voneinander angebracht sind, wodurch es zu einer periodischen Unterbrechung des reflektierten Sonnenlichts kommt. Wenn das unterbrochene (intermittierende) Licht ins Auge eines vorbeifahrenden Kraftfahrers fällt, wird es als Flimmern wahrgenommen. Bei der Berechnung des Auftretens eines Flimmereffektes ist zu berücksichtigen, dass - im Gegensatz zur Blendung - Flimmern als besonders unangenehm empfunden wird, wenn die Störlichtquelle sich nicht im zentralen Blickfeld, sondern seitlich vom Auge des Beobachters befindet. Daher sind bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Flimmereffektes Blickwinkel Kraftfahrer - PV-Anlage θ bis $\pm 90^\circ$ zu berücksichtigen.

5.3 Störwirkung durch Ablenkung

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

Bauwerke (Gebäude, Brücken, Industrieanlagen - z.B. Raffinerien), Gebirgsformationen, Flusslandschaften oder Seen.

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

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

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

5.4 Einfluss von Blend- und Störwirkungen auf das Fahrerverhalten und das Unfallgeschehen

Die in den Abschnitten 5.1 bis 5.3 beschriebenen Blend- und Störwirkungen können, wenn sie ein bestimmtes Maß überschreiten, zu unsicherem Fahrerverhalten führen bis hin zum Risiko, einen Unfall zu verursachen.

Allerdings wird der Einfluss z.B. der direkten Sonnenblendung auf das Unfallgeschehen oft überschätzt. Rönsch-Hasselhorn³⁾ hat die Unfälle untersucht, die zwischen 1991 und 2001 in Deutschland von Blendung durch Sonnenlicht hervorgerufen worden sind. Diese Unfallzahl beträgt im jährlichen Durchschnitt ca. 1500; dies ist jedoch verschwindend gering, verglichen mit der Gesamtzahl von ca. 385 000 Unfällen mit Personenschaden im gleichen Zeitraum. Die tatsächliche Zahl der Unfälle durch Sonnenblendung dürfte noch geringer sein, da nach den Erfahrungen der Polizei blendende Sonne - die ja unabänderlich ist - oft als Schutzbehauptung für die Unfallursache herangezogen wird, um einen krassen Verstoß gegen die StVO (z.B. Nichtbeachten der Vorfahrt, zu lange Blickabwendung von der Straße) zu verschleiern. Die Zahl der tatsächlich durch blendende Sonne hervorgerufenen Unfälle ist vermutlich deshalb so gering, weil jeder Kraftfahrer dieses Phänomen kennt und sich darauf einzustellen weiß. Er schützt sich dagegen durch die in 5.1 beschriebenen Maßnahmen oder fährt, wenn es denn gar nicht anders geht, eben langsamer.

Ähnlich verhält es sich mit der indirekten Blendung durch glänzende Fassaden, Glasoberflächen usw.. Auch dagegen schützt sich der Kraftfahrer automatisch, indem

3) Rönsch-Hasselhorn, Barbro: Untersuchung „Sichtbeeinträchtigung für Autofahrer durch Sonnenblendung“ der Forschungsstelle Mensch-Verkehr der Eugen-Otto-Butz-Stiftung am Institut ASER, Wuppertal, erschienen in der Zeitschrift für Verkehrssicherheit 1/2003

er die Blendlichtquelle nach Möglichkeit aus seinem Gesichtsfeld „ausblendet“. Wegen der gegenüber dem Sonnenlicht immer geringeren Intensität des reflektierten Lichts (s. 5.1) und der zeitlich und örtlich sehr begrenzten Blendwirkung ist das Unfallrisiko nochmals geringer als bei direktem Sonnenlicht.

Seit einigen Jahren werden Lärmschutzwände v.a. an Autobahnen mit Solarmodulen versehen, um die Lärmschutzfunktion in eleganter Weise mit der Produktion von Elektroenergie zu verbinden. Solche Anlagen befinden sich z.B. am Ammersee, in Freising, München und Saarbrücken. Treiber ⁴⁾ berichtet in einem Fachartikel auch über Betriebserfahrungen mit solchen Lärmschutzwänden. Als problematisch nennt er Graffiti-Schmierereien, Diebstahl und Vandalismus, nicht jedoch Blendung der Kraftfahrer. PV-Freiflächenanlagen befinden mittlerweile an vielen Autobahnen und nachgeordneten Straßen. Informationen über einen Unfall, der durch die Blendung durch eine PV-Anlage verursacht worden ist, liegen nicht vor. Auch dem Unterzeichner sind aus seiner langjährigen Berufspraxis auf dem Gebiet Lichttechnik und Straßenausstattung keine Unfälle bekannt, die durch von PV-Anlagen oder anderen glänzenden Objekten im Gesichtsfeld von Autobahnbenutzern erzeugte indirekte Blendung ausgelöst worden sind. Dem Unterzeichner ist überhaupt nur eine Beschwerde über eine in der Nähe der BAB A 4 in Sachsen installierte, blendende PV-Freiflächenanlage bekannt geworden; wie sich herausstellte, war bei dieser Anlage die evtl. Blendwirkung im Vorfeld nicht ausreichend untersucht worden.

Da die in 5.3 beschriebenen Auffälligkeitsparameter auf jeden Menschen anders wirken und daher nur subjektiv zu bewerten sind, ist es nicht möglich, allgemein gültige Kriterien herzuleiten, um bei Auftreten besonders auffälliger Objekte die Verkehrssicherheit zu gewährleisten. Daher muss die Störung des visuellen Prozesses und die Ablenkungsgefahr jedes neuartigen Sehobjekts individuell neu bewertet werden. In Standardfällen kann man sich behelfen, indem das auffällige Sehobjekt durch Blend- oder Sichtschutzzäune den Blicken des Kraftfahrers entzogen wird. In anderen Fällen begrenzt man die Auffälligkeit durch Limitierung beispielsweise der Helligkeit oder der Größe des störenden Objektes.

Die in diesem Abschnitt bisher beschriebenen Einflüsse von Blend- oder anderen Störwirkungen auf das Unfallgeschehen gelten für Standard-Kraftfahrer, bei denen man eine gewisse Fahrerfahrung voraussetzen kann und die das Autofahren mit Routine und Gelassenheit betreiben. Es gibt jedoch eine Gruppe von Kraftfahrern, für die Autofahren grundsätzlich mit Unsicherheit, hohem Stress bis hin zu Angst- und Panikgefühlen verbunden ist. Ein Verkehrsunfall wird zudem in den meisten Fällen durch eine unglückliche Verkettung mehrerer Einflussfaktoren verursacht, von denen jeder einzeln nicht unbedingt zu einem Unfall geführt hätte. Für diese Autofahrer kann das plötzliche Auftauchen eines für die meisten Autofahrer nur harmlos blendenden/flimmernden oder sonst störenden Sehobjektes der letzte Einflussfaktor sein, der einen Unfall auslöst. Deshalb muss bei der Bewertung des Störpotentials und Unfallrisikos straßenfremder Sehobjekte auch die Wirkung des Störpotentials auf diese Personengruppe berücksichtigt werden.

4) Treiber, Frank: Lärmschutz mit multifunktionalen Eigenschaften. Straßenverkehrstechnik 5/2007, S. 256

6 Blend- und Störpotential der geplanten PV-Anlage

6.1 Blendung

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

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Blendrisikos kann mithilfe eines so genannten Sonnenstandsdiagramms ermittelt werden. Bild 2 zeigt das Sonnenstandsdiagramm für Lauda-Königshofen 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 θ zwischen Kraftfahrer und PV-Anlage ermittelt werden. θ ergibt sich aus folgender Formel:

$$\cos \theta = \cos \sigma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \psi$$

σ ist der Winkel, gebildet durch die Höhe des Fahrerauges h_F über der Fahrbahn und die Entfernung zum Blickpunkt auf der Fahrbahn. Die Berechnungen wurden sowohl für die Sehbedingungen eines Lkw- als auch eines Pkw-Fahrers durchgeführt, wobei die Sehbedingungen hinsichtlich einer Sonnenlichtreflexion ins Fahrerauge für einen Lkw-Fahrer kritischer anzusehen sind als die Bedingungen für einen Pkw-Fahrer.

Es kann angenommen werden, dass der Fahrer bei einer Fahrt auf einer Autobahn normalerweise auf einen Punkt auf der Fahrbahn blickt, der etwa 100 m vor ihm liegt. Die mittlere Augenhöhe eines Lkw-Fahrers beträgt ca. 2,50 m. Daraus ergibt sich ein σ von ca. $-1,4^\circ$ (Blick leicht nach unten). Die mittlere Augenhöhe eines Pkw-Fahrers beträgt ca. 1,12 m. Daraus ergibt sich ein σ von ca. $-0,6^\circ$. Diese beiden Winkel σ wurden bei den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt.

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

Damit Sonnenlicht in Richtung Kraftfahrerauge reflektiert werden kann, muss der vertikale Blickwinkel des Kraftfahrers λ 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).

Die mittlere Höhe der Module h_M über Geländeoberkante beträgt 1,285 m (s. Abschnitt 4.2), die Höhe des Lkw-Fahrerauges h_F über Fahrbahnoberkante 2,50 m; die Differenz $h_F - h_M = \text{ca. } 1 \text{ m}$ ist zu der Höhendifferenz des jeweils betrachteten Ortes eines Lkw und des betrachteten Punktes der PV-Anlage zu addieren. Bei einem Pkw-Fahrer beträgt die Differenz $h_F - h_M = -0,125 \text{ m}$, diese Differenz kann vernachlässigt werden.

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 θ berechnet. Ausgewählt wurden die in Bild 1 eingetragenen Bewertungspunkte A bis J der Anlage und die ebenfalls eingezeichneten Blickpunkte 1 bis 5 auf der Autobahn sowie, falls notwendig, dazwischenliegende Punkte. Mit den weiteren Parametern Neigung der Module $\varepsilon = 25^\circ$ nach Süd, der Orientierung $\nu = 0^\circ$ der Module der Fahrtrichtung τ und dem vertikalen Winkel λ werden dann die trigonometrischen Berechnungen zur Ermittlung des Sonnenazimuts α und der vertikalen Sonnenhöhenwinkel γ durchgeführt, unter denen das Sonnenlicht auf die PV-Module fallen müsste, damit das reflektierte Licht ins Auge eines Kraftfahrers fallen kann. Da die ausgewählten Bewertungspunkte die gesamte Fläche der PV-Anlage umfassen, beschreiben die berechneten Winkel α und γ ebenfalls eine Fläche, im Folgenden als „ γ -Fläche“ bezeichnet. Diese Flächen sind in Bild 2 eingetragen. Betrachtet wurden alle Blendwinkel Kraftfahrer - PV-Anlage $\theta \leq 20^\circ$, weil nach Abschnitt 5.1 nur in diesem Winkelbereich reflektiertes Sonnenlicht störende Blendung erzeugen kann. Die Berechnungen wurden zunächst für die gesamte PV-Anlage ohne Berücksichtigung der teilweisen Verdeckung der Anlage durch den Gehölzstreifen zwischen Autobahn und PV-Anlage durchgeführt.

Haben die γ -Flächen Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, fällt Sonnenlicht ins Kraftfahrerauge; die dazugehörigen Jahres- und Tageszeiten können aus dem Polardiagramm abgelesen werden. Die Breite der γ -Flächen gibt die tägliche Einwirkzeit auf den Kraftfahrer an.

6.2 Blendung Lkw-Fahrer

6.2.1 Fahrtrichtung Nord

Die von den verschiedenen Blickpunkten der Autobahn ermittelten γ -Flächen liegen so dicht beieinander, dass sie in Bild 2 nicht voneinander zu trennen wären. Deshalb wurde in das Bild die einhüllende Fläche aller γ -Flächen als blaue Fläche 1 eingezeichnet. Diese Fläche liegt oberhalb der roten Sonnenstandslinien, sie hat keine Schnittpunkte mit diesen, Sonnenlicht kann nicht ins Fahrerauge reflektiert werden. Dieser Sachverhalt gibt die Tatsache wieder, dass auf der nördlichen Erdhalbkugel die Sonne nicht aus nördlichen Richtungen scheint und das Sonnenlicht daher nicht in Richtung Süden, d.h. ins Auge eines in Richtung Norden blickenden Kraftfahrers, reflektiert werden kann. Damit ist Blendung eines Lkw-Fahrers in Fahrtrichtung Nord ausgeschlossen.

6.2.2 Fahrtrichtung Süd

In dieser Fahrtrichtung sieht der Kraftfahrer zunächst die Rückseite der Module, Sonnenlicht kann nicht zu ihm reflektiert werden. Bei Annäherung an die PV-Anlage blickt der Kraftfahrer zunehmend seitlich auf die Module, so dass ab einem gewissen Blickwinkel θ theoretisch Sonnenlicht zu ihm reflektiert werden kann. Die von den verschiedenen Blickpunkten der Autobahn für Blickwinkel θ bis 20° ermittelten γ -Flächen liegen auch hier so dicht beieinander, dass in Bild 2 wieder die einhüllende Fläche aller γ -Flächen als grüne Fläche 2 eingezeichnet wurde. Die Fläche liegt unterhalb des Sonnenstandsdiagramms, sie hat keine Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, von der PV-Anlage kann kein Licht in Richtung Kraftfahrer reflektiert werden.

Wenn γ -Kurven unterhalb des Polardiagramms liegen, kann rechnerisch nur bei negativen Sonnenständen (die Sonne steht unterhalb des Horizonts) Sonnenlicht ins Fahrerauge reflektiert werden. In der Realität bedeutet diese Aussage, dass innerhalb des relevanten Blickwinkelbereichs $\theta \leq 20^\circ$ der Kraftfahrer immer die Rückseite der Module sieht mit der Folge, dass das Sonnenlicht immer über das Kfz hinweg reflektiert wird. Blendung eines Lkw-Fahrers ist auch in Fahrtrichtung Süd ausgeschlossen. Dieser Sachverhalt ist in Bild 3 zur besseren Erläuterung auch schematisch dargestellt.

6.2.3 Blendung Pkw-Fahrer

Die Sichtbedingungen eines Pkw-Fahrers unterscheiden sich von denen eines Lkw-Fahrers dadurch, dass die mittlere Augenhöhe eines Fahrers im Pkw ca. 1,12 m und im Lkw ca. 2,5 m und der vertikale Winkel σ - $0,6^\circ$ anstatt $-1,4^\circ$ beträgt (s. Abschnitt 6.1). Die für die Sichtbedingungen eines Pkw-Fahrers ermittelten γ -Flächen sind gegenüber denen für Lkw-Fahrer sowohl beim Sonnenhöhenwinkel γ als auch beim horizontalen Sonnenwinkel α um maximal $0,5^\circ$ verschoben.

Die γ -Flächen für Pkw-Fahrer liegen genauso wie diejenigen für Lkw-Fahrer weit oberhalb der roten Sonnenstandslinien (Fahrtrichtung Nord) bzw. unterhalb des Polardiagramms (Fahrtrichtung Süd), in keiner Situation wird während der Vorbeifahrt an der PV-Anlage Sonnenlicht ins Auge eines Pkw-Fahrers reflektiert, Blendung ist auch für Pkw-Fahrer ausgeschlossen.

6.3 Flimmereffekt

Bei den Berechnungen zur Ermittlung eines evtl. Flimmereffektes sind nach Abschnitt 5.2 Blickwinkel θ bis 90° zu berücksichtigen. In Bild 2 sind die γ -Flächen für Winkel θ bis 90° , zunächst wieder ohne Berücksichtigung der teilweisen Verdeckung der Anlage durch den Gehölzstreifen zwischen Autobahn und PV-Anlage, für beide Fahrtrichtungen (Flächen 3 und 4) eingezeichnet. Die γ -Fläche für Fahrtrichtung Süd liegt unterhalb des Polardiagramms, Sonnenlicht kann nicht zum Kraftfahrer reflektiert werden, in dieser Fahrtrichtung kann deshalb kein Flimmereffekt auftreten.

In Fahrtrichtung Nord hat die γ -Fläche Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien in der Jahreszeit ca. vom 15. Februar bis 31. Oktober gegen 7 Uhr MEZ, in dieser Zeit kann ein Flimmereffekt auftreten. Der Blickwinkel liegt zwischen 75° und 90° , also in dem für einen Flimmereffekt kritischen Bereich.

Die Flimmerfrequenz hängt von der Geschwindigkeit v und der Fahrtrichtung α des Kfz sowie vom Reihenabstand a der Solarmodule ab und errechnet sich aus der Formel

$$f \text{ (Hz)} = \frac{v \text{ (km/h)} \cdot 1000 \cdot \sin(270^\circ - \alpha - \nu)}{a \text{ (m)} \cdot 3600}$$

Tabelle 1 zeigt die Flimmerfrequenzen und Einwirkzeiten des Flimmereffektes in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für die mittlere Fahrtrichtung $\alpha = 20^\circ/200^\circ$, den Reihenabstand 9,97 m (s. Abschnitt 4.2) und die Gesamtlänge der PV-Anlage von 755 m (s. Abschnitt 4.1).

Geschwindigkeit v (km/h)	Flimmerfrequenz f (Hz)	Einwirkzeit (sec)
60	1,57	45,3
153	4,00	17,8
160	4,19	17,0

Tabelle 1: Flimmerfrequenzen und Einwirkzeiten des Flimmereffektes

Die kritische Flimmerfrequenz von 4 Hz wird erst bei Geschwindigkeiten oberhalb von 153 km/h überschritten. Dann liegt die Einwirkdauer mit 17,8 sec jedoch unterhalb der kritischen Grenze von 20 sec. Dazu ist anzumerken, dass die tatsächliche Einwirkzeit deutlich geringer ist, weil die Anlage teilweise von dem Gehölzstreifen verdeckt ist. Ein kritischer, die Verkehrssicherheit beeinträchtigender Flimmereffekt ist damit ausgeschlossen.

6.4 Ablenkung

Eine PV-Anlage, bestehend in wesentlichen aus regelmäßig angeordneten, eher dunklen Solarmodulen, die zudem eine maximale Bauhöhe von nur 1,74 m über Geländeoberkante hat, ist ein visuell unauffälliges Bauwerk, insbesondere auch angesichts der Tatsache, dass die Anlage teilweise von Bäumen und Buschwerk umgeben ist bzw. dadurch verdeckt wird. Die Auffälligkeit der PV-Anlage wird auch nicht durch evtl. von der PV-Anlage in Richtung Autobahn reflektiertes Sonnenlicht erhöht, da solche Reflexionen selten und nur aus seitlichen Blickwinkeln auftreten. Als einziges, die Auffälligkeit erhöhendes Merkmal, bleibt theoretisch der Neuigkeitscharakter der Anlage. In diesem Aspekt unterscheidet sich die PV-Anlage aber nicht von jedem beliebigen anderen neu errichteten Bauwerk, das von einer Straße aus sichtbar ist. Eine erhöhte Aufmerksamkeit und Ablenkungsgefahr durch die PV-Anlage kann daher insgesamt ausgeschlossen werden.

7 Zusammenfassung

Bei der Vorbeifahrt an der PV-Anlage tritt weder Blendung noch ein kritischer Flimmereffekt auf. Insgesamt kann eine Gefährdung des Straßenverkehrs auf der BAB A 81 durch die geplante Photovoltaik-Freiflächenanlage mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Von daher ist gegen die Errichtung der PV-Anlage Lauda-Königshofen nichts einzuwenden.



Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.

Anhang

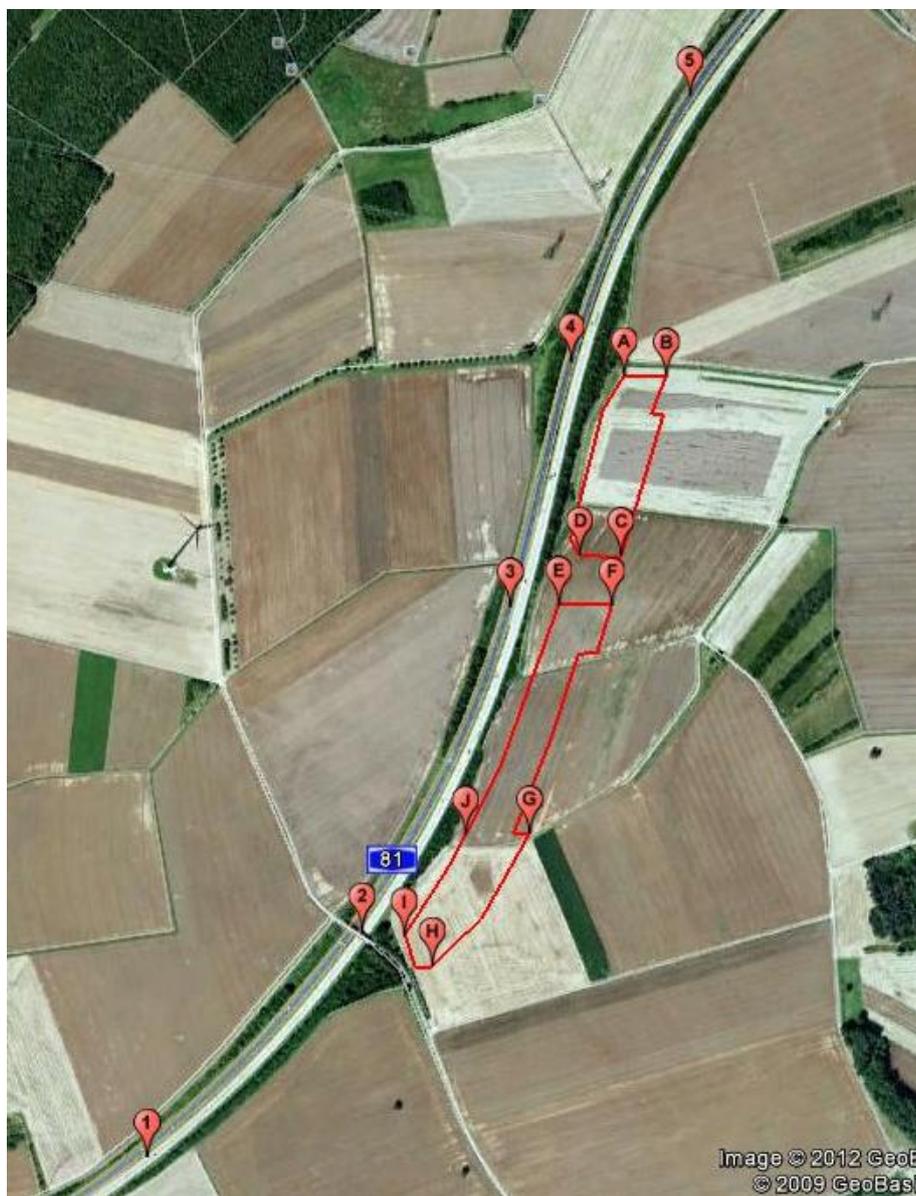


Bild 1: Schematische Darstellung der PV-Anlage Lauda-Königshofen mit Bewertungspunkten der Anlage und Blickpunkten auf der Autobahn

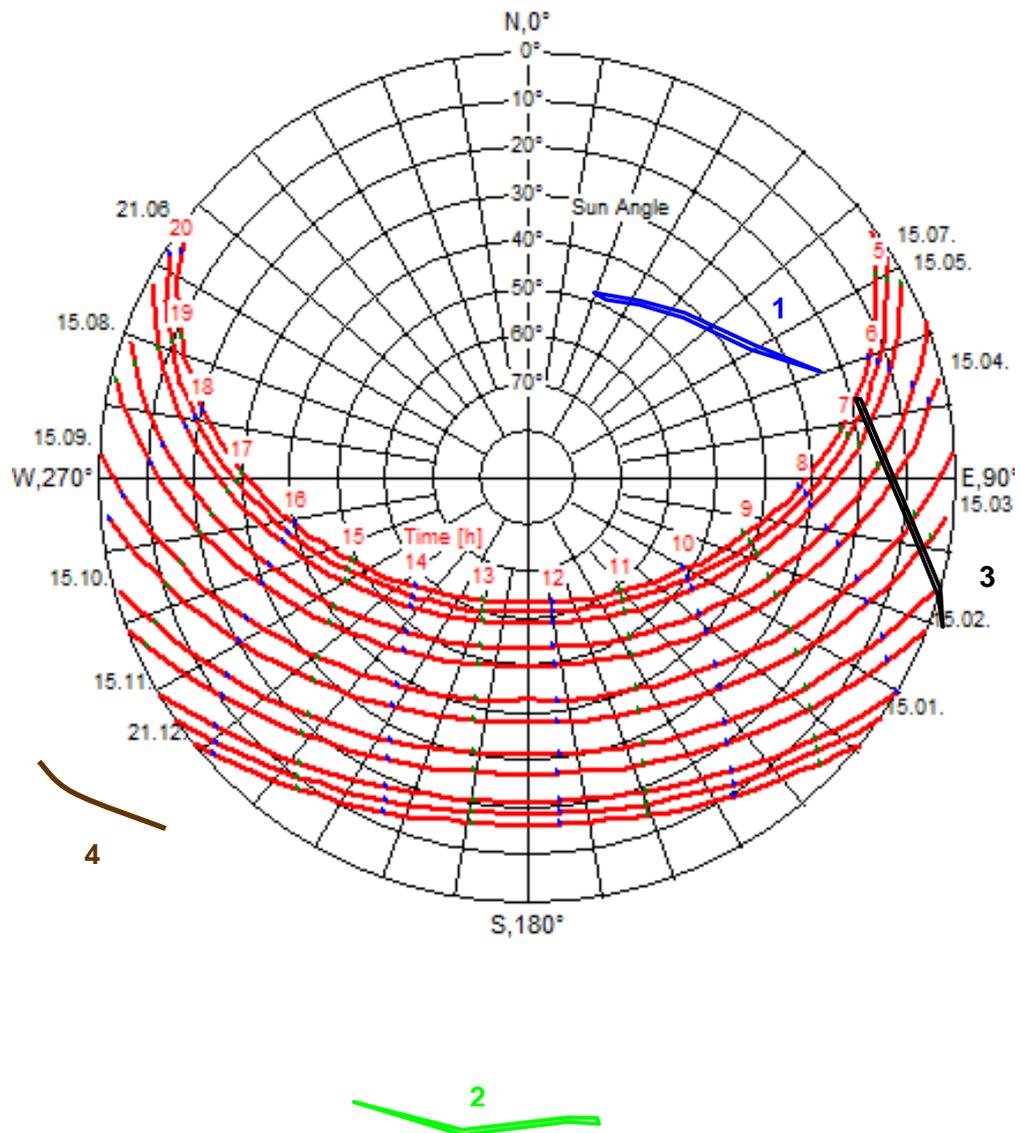


Bild 2: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung; rote Linien) für Lauda-Königshofen.

γ -Flächen zur Bestimmung der evtl. Blendung: Fläche 1: Fahrtrichtung Nord; Fläche 2: Fahrtrichtung Süd

γ -Flächen zur Bestimmung eines evtl. Flimmereffektes: Fläche 3: Fahrtrichtung Nord; Fläche 4: Fahrtrichtung Süd

Quelle des Sonnenstandsdiagramms: www.stadtklima-stuttgart.de

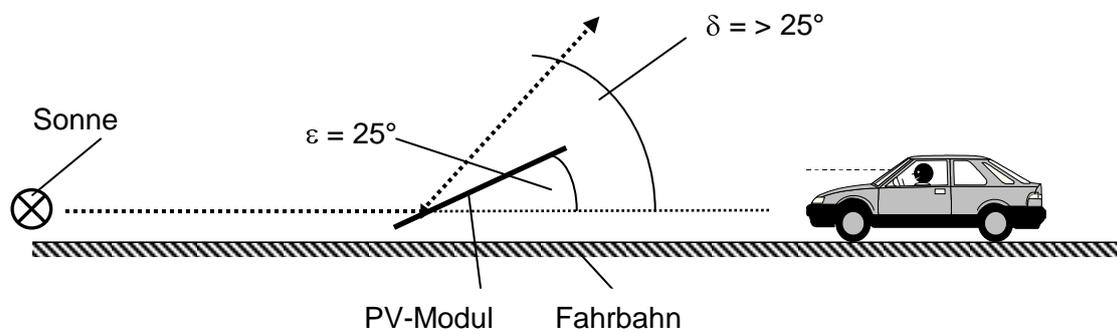


Bild 3: Bei Fahrt in Richtung Süd wird das Sonnenlicht immer über ein Fahrzeug hinweg reflektiert