

Dr. Hans Meseberg
LSC Lichttechnik und Straßenausstattung Consult
Fährstr. 10
13503 Berlin
Tel. und Fax +49 30/82707832
Email: hmeseberg@t-online.de

Berlin, den 17. Februar 2012

G u t a c h t e n
G04/2012
zur Frage der eventuellen Blend- und Störwirkung von Lokführern
durch eine neben einer Bahnstrecke bei Gundelfingen-Peterswörth
installierte Photovoltaik-Anlage

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

1 Auftraggeber

Den Auftrag zur Erarbeitung des Gutachtens erteilte die Kling Consult GmbH, Postfach 1251, 86370 Krumbach

Auftragsdatum: 17. Januar 2012

2 Auftragsache

Die Kling Consult GmbH plant die Errichtung einer Photovoltaik-Anlage in Gundelfingen-Peterswörth in unmittelbarer Nähe der eingleisigen Bahnstrecke Ulm-Donauwörth. Es besteht die Besorgnis, dass Lokführer der diese Strecke befahrenden Züge 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 Zuges	α
Orientierung der Modulreihen	α_M
Orientierung der Modulreihen gegen Ost oder West	$\alpha_M - \alpha$
vertikaler Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts	δ

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

4 Topografische Daten und Angaben zur Photovoltaik-Anlage

Die geografischen Daten und die Beschreibung der Anlage beruhen auf folgenden Informationen, die von der Firma Kling Consult zur Verfügung gestellt wurden:

- Lageplan der PV-Anlage
- Vermessungsplan (Plan mit Höhenlinien und Flurstücken der Umgebung der PV-Anlage)
- Karte Projektinformation zu Scopingtermin vom 5. 11. 2011
- Karte Bebauungsplan, Vorentwurf vom 9. 2. 2012
- Karte Flächennutzungsplan vom 15. 12. 2011
- Mündliche und Email-Informationen von Herrn Dipl.-Geogr. Peter Wolpert, Fa. Kling Consult
- Fotos von der Umgebung der PV-Anlage

4.1 Topografische Daten

Die geplante PV-Anlage wird östlich der Bahnstrecke Ulm-Donauwörth installiert. Die Bahntrasse verläuft parallel zum westlichen Rand der PV-Anlage in einem Winkel $\alpha = 13,5^\circ$ (Fahrtrichtung Nord) bzw. $193,5^\circ$ (Fahrtrichtung Süd). Der Abstand Mitte Bahntrasse (gleichzusetzen mit dem Ort des Lokführers) - westlicher Rand der PV-Anlage beträgt ca. 20 m. Die Geländeoberkante der Bahntrasse über Normalnull (NN) beträgt ca. 434 m, die Geländehöhe der PV-Anlage liegt bei 430 m bis 432 m über NN; in der weiteren Rechnung wird eine mittlere Höhe von 431 m eingesetzt; damit liegt die Geländeoberkante der Bahntrasse im Mittel 3 m oberhalb des PV-Anlagen-geländes. Um die gesamte Anlage soll eine laubabwerfende Hecke gepflanzt werden.

In der Umgebung der PV-Anlage befinden sich weder hohe Gebäude noch Bäume, die die Anlage bei niedrigem Sonnenstand abschatten könnten.

4.2 Beschreibung der PV-Anlage

Die PV-Anlage hat eine unregelmäßige Grundfläche (s. Bild 1 im Anhang), Die Längsachse der Anlage ist parallel zur Bahntrasse ausgerichtet ($\alpha = 13,5^\circ/193,5^\circ$). Die Gesamtfläche der PV-Anlage beträgt 26 831 m². Die PV-Anlage hat eine maximale Länge von ca. 310 m (in Richtung Längsachse) und eine Breite von ca. 110 m (in Richtung senkrecht zur Längsachse). In Ost-West-Richtung beträgt die Breite ca. 107 m.

Die Länge der Bahntrasse längs der PV-Anlage beträgt ca. 310 m.

Es ist eine installierte Leistung von ca. 1,5 MW_{peak} vorgesehen. Es sollen polykristalline Solarmodule verwendet werden, der verwendete Modultyp steht jedoch noch nicht

fest. Mehrere Module werden übereinander auf Tischen montiert; die Neigung ε der Module gegen Süden beträgt 25° . Die Tische sind in Reihen angeordnet, die in Ost-West-Richtung ausgerichtet sind (Winkel $\nu = 0^\circ$). Der Abstand a zweier benachbarter Reihen von Tischen (Abstand Oberkante Module einer Reihe zu Oberkante Module der nächsten Reihe) liegt in der Regel bei 6 m bis 10 m. Bei den Berechnungen werden diese unterschiedlichen Reihenabstände berücksichtigt. Die Ober- bzw. Unterkante der Module befindet sich in einer Höhe von 2,50 m bis 3,20 m bzw. ca. 0,80 m über Geländeoberkante. Die mittlere Höhe der Module h_M über Geländeoberkante beträgt damit 1,65 m bis 2,00 m.

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

5.1 Blendwirkung

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

Die bei Tageslicht am häufigsten auftretende Blendung wird von der Sonne verursacht. Befindet sich die Sonne im zentralen Gesichtsfeld des Lokführers, tritt Absolutblendung auf, bei der man nicht mehr in der Lage wäre, einen Zug sicher zu führen, da im Gesichtsfeld des Lokführers 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 verkehrgefährdende Situationen entstehen.

2. Die Blendwirkung ist zeitlich und örtlich sehr begrenzt, während die Sonnenblendung über längere Zeit auf den Menschen einwirken kann.

Ob eine Blendung auftritt, ist sehr stark vom Winkel θ , gebildet von der Blickrichtung eines Beobachters und der Verbindungslinie Auge des Beobachters - blendende Lichtquelle (z.B. Auge des Lokführers 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 **Blendwinkel $5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$** , und besonders kritisch Winkel $\theta \leq 5^\circ$, wenn also die störende Lichtquelle direkt im Gesichtsfeld des Beobachters liegt. Ein Lokführer hat nicht die Möglichkeit, diese Lichtquelle „auszublenen“, da er z.B. die in seinem Blickfeld befindlichen Signallichter beobachten muss und seinen Blick daher nicht beliebig zur Seite richten kann, um einem evtl. vorhandenen Blendreflex auszuweichen. Ob bei solch kleinen Winkeln tatsächlich Blendung vorliegt, hängt in entscheidendem Maß davon ab, wie hoch die Intensität des Störlichts im Verhältnis zur Umgebungshelligkeit und v.a. zur Intensität des direkten Sonnenlichts ist. Hierfür ein Beispiel: An einem klaren Sonnentag kann die im Zenit stehende Sonne am Auge eines Beobachters eine Beleuchtungsstärke von 110 000 lx erzeugen. Wenn gleichzeitig eine Störlichtquelle eine zusätzliche Beleuchtungsstärke von 1000 lx beim Beobachter erzeugt, so blendet diese Störlichtquelle weniger, als am Abend eine Störlichtquelle mit einer Blendbeleuchtungsstärke von 500 lx, wenn gleichzeitig die Sonnenbeleuchtungsstärke nur 5000 lx beträgt.

Bild 2 zeigt die Reflexion eines Solarmoduls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Sonnenlichts. Wenn die Sonne mittags hoch am Himmel steht, fällt das Sonnenlicht etwa senkrecht auf die Moduloberfläche (Einfallswinkel 90° in Bild 2), es wird weniger als 10 % reflektiert; die Intensität des von der Moduloberfläche reflektierten Lichts beträgt also nur einen Bruchteil der Intensität des Sonnenlichts selbst und kann daher keine Blendung erzeugen. Wenn die Sonne morgens oder abends tief am Himmel, nahe am Horizont steht, fällt das Sonnenlicht zwar sehr streifend auf die Moduloberfläche (Einfallswinkel nahe 0°), es wird fast das gesamte Sonnenlicht reflektiert, aber

die Intensität der auf- oder untergehenden Sonne ist so gering, dass diese keine Blendung erzeugt - bekanntermaßen kann man einen Sonnenauf- oder -untergang ohne weiteres mit bloßem Auge betrachten. Demzufolge kann auch das reflektierte Sonnenlicht in dieser Situation keine Blendung erzeugen. Dieser hier dargestellte Sachverhalt wird auch in einer 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 Sichrichtung tiefstehende) Sonne relativiert werden**“.* (Hervorhebung in Fettschrift durch den Unterzeichner).

Der in Bild 2 dargestellte Reflexionsgrad stellt den Gesamtreflexionsgrad dar, bei dem nicht berücksichtigt wird, in welche Richtung das Sonnenlicht reflektiert wird. Die Oberflächen von PV-Modulen sind aber nicht ideal spiegelnd, sondern mit einer leichten Struktur versehen, die für eine höhere Lichtabsorption (und damit erhöhten Energieertrag) sorgen als dies bei einer spiegelnden Oberfläche der Fall wäre. Auf der Moduloberfläche lagert sich mit der Zeit eine dünne Staubschicht ab, die auch durch Regen nicht wieder vollständig entfernt wird. Die strukturierte Oberfläche und die leichte Verschmutzung führen zu einer diffuseren Reflexion des Sonnenlichts als bei einer ideal spiegelnden Oberfläche. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass nicht sämtliche Module exakt unter $\varepsilon = \pm 25^\circ$ geneigt und unter $\nu = 0^\circ/180^\circ$ ausgerichtet sind, sondern beide Winkel sind mit einer gewissen, durch die Montage bedingten Toleranz versehen. Diese drei Einflussgrößen führen dazu, dass bei dem jeweiligen Einfallswinkel nicht der volle Anteil von Licht gemäß Bild 2 in die durch das Reflexionsgesetz vorbestimmte Richtung reflektiert wird, sondern ein geringerer Anteil. Dieser Anteil kann nicht genau quantifiziert werden, da die genauen Reflexionseigenschaften des verwendeten Moduls nicht bekannt sind und die Montagetoleranzen nicht vorhergesagt werden können. Erfahrungsgemäß ist damit zu rechnen, dass der Anteil des reflektierten Lichts durch diese drei Einflussgrößen gegenüber den Daten des Bildes 2 um ca. 40 % verringert wird.

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

Aus diesen Gründen muss zur Bewertung der Blendgefahr die Beleuchtungsstärke (Intensität) der Blendlichtquelle ins Verhältnis zur Beleuchtungsstärke der Sonne ge-

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

setzt werden, wenn Sonnenlicht innerhalb des kritischen Blickwinkelbereiches $\theta \leq 20^\circ$ das Auge eines Lokführers erreicht.

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 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 - es ist bekannt, dass Flimmern bei manchen Epileptikern sogar Anfälle auslösen kann (photosensitive Epilepsie) - als auch das von Straßenleuchten oder Baumalleen erzeugte Flimmern. Merkbare Störungen durch den Flimmereffekt sind aber erst dann zu erwarten, wenn die Länge des Flimmerns 20 sec überschreitet.

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. 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 aktuelle 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 von Zügen an der PV-Anlage 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 Lokführers eines fahrenden Zuges 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 horizontale Blickwinkel Lokführer - PV-Anlage ψ bis $\pm 90^\circ$ zu berücksichtigen.

5.3 Störwirkung durch Ablenkung

Die visuelle Informationsaufnahme eines Lokführers 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 Lokführer 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 Lokführers zusätzlich beanspruchen, können zu Störungen des visuellen Prozesses, zu „visuellem Stress“, führen. Der Lokführer 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
- Farbigeit/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 Lokführers zu dem Sehobjekt = Ablenkung. Bei sehr hoher Auffälligkeit kann die Blickzuwendung und Ablenkung so lange andauern, dass für den Lokführer wichtige Informationen nicht mehr rechtzeitig wahrgenommen werden können - es kann zu verkehrsfährdenden Situationen kommen.

6 Beschreibung der Blend- und Störwirkungen für Lokführer

Die in Abschnitt 5.1 bis 5.3 beschriebenen Blend- und Störwirkungen sind aus Erfahrungen für den Straßenverkehr abgeleitet. Sie gelten grundsätzlich auch für Lokführer aller Art von Zügen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich die Sehaufgabe eines Lokführers wesentlich von der eines Kraftfahrers unterscheidet: Letzterer orientiert sich - trotz Navigations- und anderer Fahrerassistenzsysteme - über die Verkehrssituation fast ausschließlich mittels des Sehapparates (Auge-Nervenleitung-Gehirn). Er muss ständig die wechselnden visuellen Eindrücke aufnehmen, verarbeiten und daraus seine Fahrentscheidungen ableiten. Ein Lokführer muss die vor ihm liegende Strecke beobachten und muss die optischen Signale und andere an der Strecke vorhandene Hinweistafeln aus bestimmten, durch die entsprechenden Vorschriften festgelegten Entfernungen erkennen können. Zusätzlich hat der Lokführer eine Reihe technischer Einrichtungen zur Verfügung, die ihn bei der Fahraufgabe unterstützen. Das sind Anzeigeelemente und Monitore, auf denen der Lokführer jederzeit alle Informationen über den Fahrweg, den momentanen Betriebszustand des Zuges und Anweisungen zum Fahrbetrieb bekommt. Die visuelle Beobachtung und Überwachung der Anzeigeelemente durch den Lokführer stellt eine zusätzliche Sicherheitsebene dar. Physiologische Blendung kann dazu führen, dass die visuelle Erkennung der Strecke vor dem Zug, die Erkennbarkeit der Signale und der genannten Instrumente im Führerstand beeinträchtigt wird und dadurch diese Sicherheitsebene wegfällt. Die stärkste physiologische Blendung tritt auf, wenn man direkt in die Lichtquelle blickt; je größer der Winkel zwischen Lichtquelle und Blickrichtung ist, um geringer fällt der Blendeffekt bei konstanter Lichtintensität.

Die Bedingungen hinsichtlich körperlicher und geistiger Leistungsfähigkeit, die zum Erwerb und Erhalt einer Lizenz für das Führen eines Zuges notwendig sind, sind viel strenger als die zum Erwerb eines Kfz-Führerscheins notwendigen Bedingungen. Aus diesem Grund wirkt sich visueller Stress auf Lokführer weniger stark aus als auf Autofahrer.

7 Blend- und Störpotential der geplanten PV-Anlage

7.1 Blendung

7.1.1 Blendwahrscheinlichkeit

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 Lokführers gelangt. Ist eine gewisse Wahrscheinlichkeit gegeben, muss die Intensität des ins Auge des Lokführers reflektierten Lichts ermittelt werden. Das Blendrisiko insgesamt ergibt sich aus der Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens und der Intensität des ins Auge eines Lokführers reflektierten Sonnenlichts.

Diese Wahrscheinlichkeit kann mithilfe eines so genannten Sonnenstandsdiagramms ermittelt werden. Bild 3 zeigt das Sonnenstandsdiagramm für Gundelfingen-Peterswörth 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. 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 Lokführer 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 Lokführerauges h_F über der Geländeoberkante und die Entfernung zum Blickpunkt auf dem Gleiskörper. Als Augenhöhe h_F über Geländeoberkante (Höhe Gleisbett, Schienen, Position des Lokführerauges oberhalb Schienenoberkante) wird ein Wert von ca. 4 m eingesetzt, um auch die Sichtbedingungen der Lokführer von Güterzügen einbeziehen zu können (hinsichtlich Blendung kritischerer Fall). Es wird weiter vorausgesetzt, dass der Lokführer normalerweise ca. 100 m voraus auf den Gleiskörper schaut. Mit der Augenhöhe h_F von 4 m ergibt sich daraus ein vertikaler Winkel σ von ca. $-2,3^\circ$, unter dem der Lokführer auf den Gleiskörper blickt.

λ ist der vertikale Winkel, gebildet durch die Differenz der Höhe Lokführerauge - Höhe der Mitte PV-Modul und die Entfernung Lokführerauge - PV-Modul für einen bestimmten Punkt der PV-Anlage. Mit der mittleren Höhe der Module h_M über Geländeoberkante 1,65 m bis 2 m (s. Abschnitt 4.2), der Differenz zwischen Bahntrassen- und PV-Anlagengelände von 3 m und der Höhe des Lokführerauges h_F von 4 m ergibt sich eine Höhe des Lokführerauges von $3 \text{ m} + 4 \text{ m} - (1,65 \text{ m bis } 2,00 \text{ m}) = 5 \text{ m bis } 5,35 \text{ m}$ über PV-Modulmitte. Als Wert bei der Bestimmung von λ wird 5,35 m verwendet.

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

Damit Sonnenlicht in Richtung Lokführerauge reflektiert werden kann, muss der vertikale Blickwinkel des Lokführers 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 jeden Punkt der Vorbeifahrt eines Zuges an der PV-Anlage werden nun mittels google earth die Winkel τ , α , ψ bestimmt, dann wird nach obiger Formel θ berechnet. Mit den weiteren Parametern Neigung der Module $\varepsilon = 25^\circ$ nach Süd, der Orientierung $\nu = 0^\circ/180^\circ$ der Module, der Fahrtrichtung τ und dem vertikalen Winkel λ werden anschließend 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 Lokführers fallen kann.

Die geplante Hecke, die auch zwischen Bahntrasse und PV-Anlage gepflanzt werden soll, wird zunächst bei den Berechnungen nicht berücksichtigt, weil diese wegen ihrer vermutlich noch niedrigen Höhe unmittelbar nach Anpflanzung die PV-Anlage für einen Lokführer noch nicht verdeckt und weil auch später zu erwarten ist, dass ein Lokführer zumindest den östlichen Teil der PV-Anlage noch sehen kann.

Im Folgenden werden die Winkel γ entweder für einen Sichtstrahl des Lokführers zu einem Punkt der PV-Anlage bestimmt - dann bilden die γ -Werte eine Kurve - oder die Winkel γ werden für die gesamte Fläche der PV-Anlage bestimmt, dann bilden die γ -Werte eine Fläche. Als Bewertungspunkte wurden die in Bild 1 eingetragenen Punkte A bis H sowie je nach Notwendigkeit dazwischen liegende Punkte verwendet. Haben die γ -Kurven oder γ -Flächen Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, fällt Sonnenlicht ins Lokführerauge; die dazugehörigen Jahres- und Tageszeiten können aus dem Polardiagramm abgelesen werden. Berücksichtigt wurden alle Blendwinkel Lokführer - PV-Anlage $\theta \leq 20^\circ$, weil nach Abschnitt 5.1 nur innerhalb dieses Winkelbereichs reflektiertes Sonnenlicht evtl. eine störende Blendung erzeugen kann.

Fahrt in Richtung Nord

Für den Lokführer eines in Richtung Nord fahrenden Zuges ist die PV-Anlage etwa aus einer Entfernung von 175 m südlich des Bahnübergangs der Offinger Straße = ca. 500 m Entfernung zum Bewertungspunkt A sichtbar. Ermittelt wurden die γ -Flächen für Entfernungen von 500 m bis 100 m zum Bewertungspunkt A in 100 m-Schritten. In Bild 3 sind die γ -Flächen (Nr. 1 bis 3) eingetragen, die für den Blick eines Lokführers auf die PV-Anlage aus einer Entfernung Lokführer - Bewertungspunkt A der Anlage von 500 m, 300 m und 100 m ermittelt wurden. Auf die Wiedergabe der Flächen für die übrigen betrachteten Entfernungen kann verzichtet werden, da diese mit den in Bild 3 dargestellten γ -Flächen praktisch zusammenfallen.

Alle γ -Flächen liegen oberhalb der roten Sonnenstandslinien und haben keine Schnittpunkte mit diesen, von der PV-Anlage kann kein Licht in Richtung Lokführer 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 Lokführers, reflektiert werden kann. Blendung eines Lokführers ist in dieser Situation ausgeschlossen.

Fahrt in Richtung Süd

Für den Lokführer eines in Richtung Süd fahrenden Zuges ist die PV-Anlage etwa aus einer Entfernung von 400 m bis zum Bewertungspunkt A bzw. 700 m zum Bewertungspunkt B sichtbar; vorher ist die Anlage durch Wohngebäude verdeckt. Ermittelt wurden die γ -Flächen für Entfernungen von 700 m bis 100 m zum Bewertungspunkt B in 100 m-Schritten. In Bild 3 sind die γ -Flächen (Nr. 4 bis 6) eingetragen, die für den Blick eines Lokführers auf die PV-Anlage aus einer Entfernung Lokführer - Bewertungspunkt B der Anlage von 700 m, 500 m und 200 m ermittelt wurden. Auf die Wiedergabe der Flächen für die übrigen betrachteten Entfernungen kann wieder verzichtet werden, da diese mit den in Bild 3 dargestellten γ -Flächen 4 bis 6 praktisch zusammenfallen.

Die γ -Flächen liegen unterhalb des Polardiagramms, sie haben keine Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, auch in dieser Fahrtrichtung kann kein Sonnenlicht zum Lokführer reflektiert werden. Wenn γ -Kurven unterhalb des Polardiagramms liegen, kann rechnerisch nur bei negativen Sonnenständen (die Sonne steht unterhalb des Horizonts) Sonnenlicht ins Auge eines Lokführers reflektiert werden. In der Realität bedeutet diese Aussage, dass das Sonnenlicht immer weit über die Lok hinweg reflektiert

wird. Dieser Sachverhalt ist in Bild 4 zur besseren Erläuterung auch schematisch dargestellt.

Fazit

Bei einer Fahrt in beiden Richtungen erreicht kein reflektiertes Sonnenlicht das Auge eines Lokführers, Blendung kann daher ausgeschlossen werden. Aus Sicht der Vermeidung von Blendung eines Lokführers ist es daher nicht notwendig, eine Hecke um das PV-Gelände zu pflanzen.

7.2 Flimmereffekt

7.2.1 Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Flimmereffektes

Wie in Abschnitt 5.2 ausgeführt, sind bei der Ermittlung eines evtl. Flimmereffektes horizontale Winkel ψ zwischen Lokführer und PV-Anlage bis 90° zu berücksichtigen. Für die Position eines Lokführers, der sich etwa in der Mitte zwischen den Bewertungspunkten A und B befindet (kritischster Fall), wurden die γ -Werte für den östlichen Rand der PV-Anlage für Winkel ψ bis 90° ermittelt. Bild 5 zeigt für beide Fahrtrichtungen die so ermittelten γ -Kurven des vertikalen Sonnenhöhenwinkels.

Fahrtrichtung Nord

In Fahrtrichtung Nord hat die γ -Kurve (grüne Kurve 1) Schnittpunkte mit den Sonnenhöhenlinien, von der PV-Anlage reflektiertes Sonnenlicht kann unter horizontalen Winkeln ψ bis 90° ins Auge eines Lokführers gelangen. Es handelt sich um die Jahreszeit etwa vom 15. Februar bis 30. Oktober in der Tageszeit gegen 7 Uhr. Deshalb sind als nächstes die Flimmerfrequenz und die Dauer der Einwirkung des Flimmerns zu bestimmen. Nach Abschnitt 4.1 beträgt die Länge der Bahntrasse längs der PV-Anlage 310 m. Nach Abschnitt 5.2 ist der Flimmereffekt nur im Frequenzbereich 4 Hz bis 15 Hz bei gleichzeitiger Einwirkdauer ≥ 20 sec als kritisch zu betrachten.

Die Flimmerfrequenz f hängt von der Geschwindigkeit v des Zuges und dem Reihenabstand a der Solarmodule ab und errechnet sich aus der Formel

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

Die Strecke Günzburg - Gundelfingen wird lt. Fahrplan in 8 min durchfahren; bei einer Entfernung von ca. 13,5 km beträgt die durchschnittliche Geschwindigkeit etwa 100 km/h. Daher kann angenommen werden, dass die Reisegeschwindigkeit bei 120 km/h liegt; andererseits muss damit gerechnet werden, dass auch deutlich geringere Geschwindigkeiten (Güterzüge oder bei Einrichtung von Langsamfahrstellen) auftreten können. Die Berechnungen werden deshalb für Geschwindigkeiten von 60 km/h bis 120 km/h und einem Reihenabstand von 6 m bis 10 m der PV-Module (s. Abschnitt 4.2) durchgeführt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 1 zusammengestellten Flimmerfrequenzen und Einwirkzeiten.

Geschwindigkeit v (km/h)	Flimmerfrequenz f (Hz) für Reihenabstand a =		Einwirkzeit (sec)
	6 m	10 m	Länge 310 m
55,8	2,4	1,5	20,0
60	2,7	1,6	18,6
88,7	4,0	2,4	12,6
120	5,4	3,3	9,3
147,8	7,3	4,0	7,6

Tabelle 1: Flimmerfrequenzen und Einwirkzeiten des Flimmereffektes

Die kritische Flimmerfrequenz von 4 Hz wird bei einer Geschwindigkeit von 88,7 km/h bzw. 147,8 km/h überschritten. Dann beträgt die Einwirkzeit (Dauer der Vorbeifahrt an der PV-Anlage) aber nur noch 12,6 sec bzw. 7,6 sec; die kritische Einwirkdauer von 20 sec wird bereits bei einer Geschwindigkeit von 55,8 km/h unterschritten. Ein kritischer, die Verkehrssicherheit beeinträchtigender Flimmereffekt entsteht daher nicht, da je nach Geschwindigkeit entweder die kritische Flimmerfrequenz oder die kritische Einwirkzeit unterschritten wird.

Fahrtrichtung Süd

In Fahrtrichtung Süd hat die γ -Kurve (blaue Kurve 2) keine Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, d.h., auch bei horizontalen Winkeln ψ zwischen Lokführer und PV-Anlage bis 90° kann kein Licht ins Auge eines Lokführers dringen, ein Flimmereffekt kann ausgeschlossen werden.

Fazit

In Fahrtrichtung Nord tritt ein Flimmereffekt innerhalb von einigen Monaten am frühen Morgen für wenige Minuten auf, bei dem aber entweder die kritische Flimmerfrequenz oder die kritische Einwirkzeit unterschritten werden. Eine Beeinträchtigung oder gar Gefährdung der Sicherheit des Zugverkehrs ist durch diesen Flimmereffekt nicht zu erwarten. In Fahrtrichtung Süd kann kein Flimmereffekt auftreten.

7.3 Ablenkung

Eine PV-Anlage, die im Wesentlichen aus regelmäßig angeordneten, eher dunklen Solarmodulen besteht, ist ein visuell unauffälliges Bauwerk, das sich von der im Umfeld vorhandenen, ebenfalls dunklen Vegetation kaum abhebt. Da keine Reflexionen von Sonnenlicht in Richtung Lokführer auftreten, kann auch dadurch keine erhöhte Auffälligkeit erzeugt werden. Als einziges, die Auffälligkeit erhöhendes Merkmal, bleibt der Neuigkeitscharakter der Anlage. In diesem Aspekt unterscheidet sich die PV-Anlage aber nicht von jedem beliebigen anderen neu errichteten Bauwerk, das von einer Bahntrasse aus sichtbar ist. Die Lokführer befahren immer wieder die gleiche Strecke, erleben so die PV-Anlage bereits während ihrer Installation, so dass auch eine erhöhte Auffälligkeit infolge des Neuigkeitscharakters auszuschließen ist, wenn die PV-Anlage fertig gestellt ist. Eine erhöhte Aufmerksamkeit und Ablenkungsgefahr durch die PV-Anlage kann daher insgesamt ausgeschlossen werden.

8 Zusammenfassung

Die in Gundelfingen-Peterswörth in unmittelbarer Nähe der Bahnstrecke Ulm-Donauwörth geplante Photovoltaik-Anlage erzeugt keine Blendung für Lokführer. Flimmereffekte treten nur selten auf und sind nicht geeignet, den Zugverkehr zu beeinträchtigen oder gar zu gefährden. Eine Ablenkungsgefahr durch die PV-Anlage ist ebenfalls nicht zu erwarten.

Insgesamt kann eine Gefährdung des Zugverkehrs durch die geplante Photovoltaik-Freiflächenanlage in Gundelfingen-Peterswörth mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Von daher ist gegen die Errichtung der Anlage nichts einzuwenden.



Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.

Anhang



Bild 1: Die geplante PV-Anlage (rot umrandet, schematische Darstellung). A bis H: Bewertungspunkte der PV-Anlage

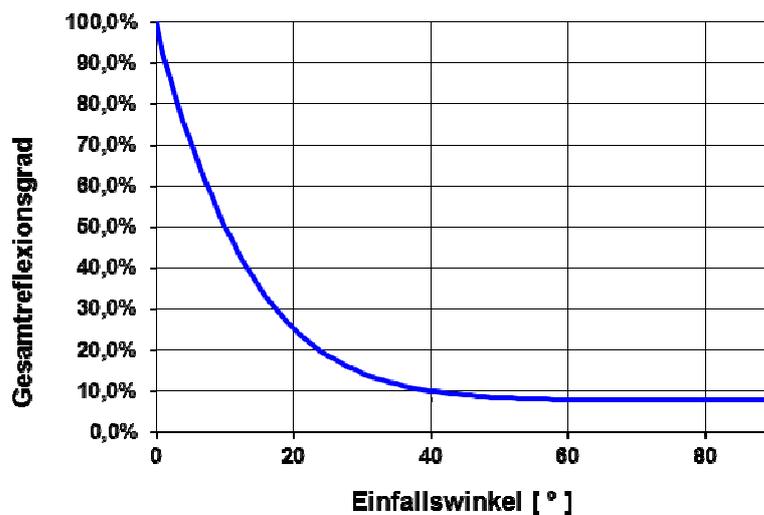


Bild 2: Gesamtreflexionsgrad der Oberfläche eines neuen Solarmoduls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Sonnenlichts. Winkel nahe 0°: Das Licht fällt streifend auf die Moduloberfläche. 90°: senkrechter Lichteinfall

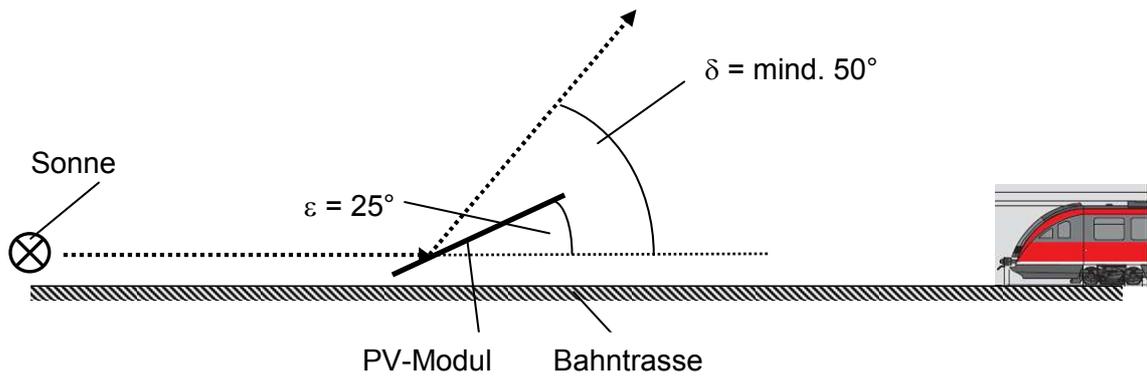


Bild 4: Bei Fahrt in Richtung Süd wird das Sonnenlicht immer über die Lok hinweg reflektiert

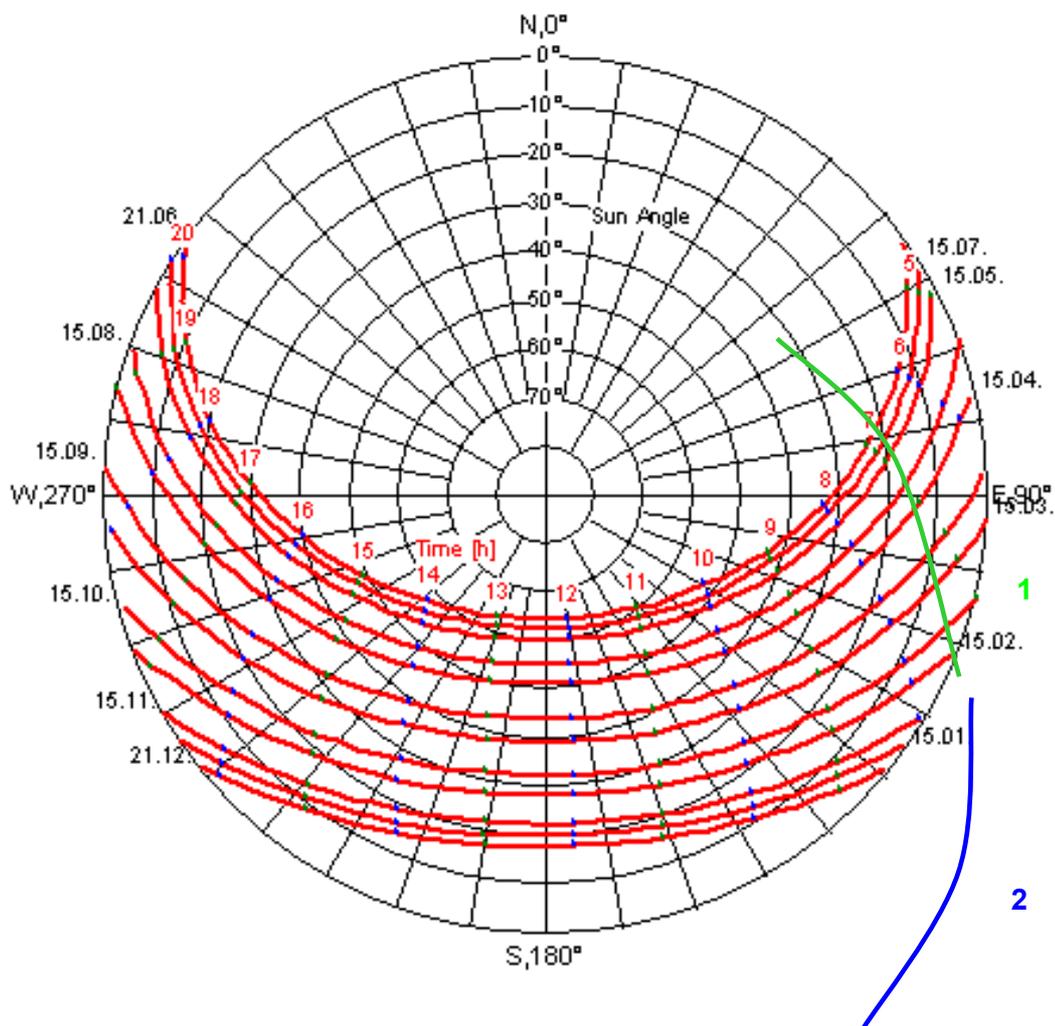


Bild 5: Monatlicher Sonnenstand für Gundelfingen mit γ -Kurven zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Flimmern
 1: Fahrtrichtung Nord, 2: Fahrtrichtung Süd