

Dr. Hans Meseberg
LSC Lichttechnik und Straßenausstattung Consult
Fährstr. 10
13503 Berlin
Tel.: 030/82707832
Fax: 030/56296415
Email: hmeseberg@t-online.de

Berlin, den 9. 5. 2017

S t e l l u n g n a h m e
G17/2017
zur Frage der eventuellen Blend- und Störwirkung
von Nutzern der BAB A 5 und von auf dem Flugplatz Heppenheim
startenden und landenden Piloten durch eine in Heppenheim
installierte Photovoltaik-Anlage

1 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, ob die bei Heppenheim von der GGEW AG Bensheim geplante PV-Freiflächenanlage ein Blendrisiko für auf der benachbarten BAB A 5 vorbeifahrende Kraftfahrer bzw. für auf dem Flugplatz Heppenheim startende und landende Piloten darstellt. Untersucht wurde diese Frage für vier Kombinationen des Neigungswinkels der Module gegen Süd und der Ausrichtung der Modultischreihen gegen die Ost-West-Richtung.

Bei der Vorbeifahrt auf der BAB A 5 an der geplanten PV-Anlage Heppenheim kann keine Blendung eines Kraftfahrers auftreten, weil von der PV-Anlage unter blendkritischen Winkeln kein Sonnenlicht zum Kraftfahrer reflektiert werden kann.

Bei Starts und Landungen auf dem Flugplatz Heppenheim kann ebenfalls keine Blendung eines Piloten auftreten, weil kein Sonnenlicht zum Piloten reflektiert werden kann. Beim Durchfliegen einer Platzrunde ist der Blickwinkel des Piloten zur PV-Anlage zu groß bzw. die Intensität des reflektierten Sonnenlichts zum Piloten zu gering, um Blendung zu erzeugen. Insgesamt kann in keiner Flugsituation Blendung eines Piloten auftreten.

Insgesamt kann eine Gefährdung des Straßenverkehrs auf der BAB A 5 oder des Flugverkehrs am Flugplatz Heppenheim durch die geplante Photovoltaik-Freiflächenanlage Heppenheim mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Diese Ergebnisse gelten nicht nur für die vier untersuchten Kombinationen des Neigungswinkels der Module und der Ausrichtung der Modultischreihen, sondern auch für beliebige Wahl dieser beiden Winkel innerhalb des untersuchten Bereichs. Von daher ist gegen die Errichtung der PV-Freiflächenanlage Heppenheim nichts einzuwenden.

Diese Stellungnahme ergänzt die Stellungnahmen des Unterzeichners vom 25. 1. 2017 und vom 9. 2. 2017 um weitere behördliche Fragen.

2 Sachverhalt

Die GGEW AG, Dammstraße 68, 64625 Bensheim, beabsichtigt die Errichtung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage in Heppenheim in unmittelbarer Nachbarschaft zur BAB A 5. In zwei Stellungnahmen vom 25. 1. 2017 bzw. vom 9. 2. 2017 hatte der Unterzeichner festgestellt, dass weder Piloten, die vom Segelflugplatz Heppenheim starten oder landen, noch Kraftfahrer, die auf der nahegelegenen BAB A 5 an der PV-Anlage vorbeifahren, durch Sonnenlicht, das von der Oberfläche der PV-Module reflektiert wird, geblendet oder in sonst unzumutbarer Weise gestört werden.

Zwischenzeitlich hat sich allerdings die Planungsgrundlage verändert:

- Die Fläche, auf der die PV-Anlage errichtet werden soll, wurde verkleinert (s. Bild 1).
- Der eingesetzte Modultyp ist noch offen.
- Die Neigung der Module gegen Süd und die Ausrichtung der Modultischreihen sind ebenfalls noch offen.
- Weitere Layoutparameter (z.B. Reihenabstand, Tischhöhe) können ebenfalls erst nach Wahl von Modultyp, Modulneigung und Ausrichtung der Modultischreihen festgelegt werden.

Der Landkreis Bergstraße hat um entsprechende Erweiterung der o.a. Stellungnahmen gebeten, in der alle für die Frage einer evtl. Blendwirkung in Frage kommenden Planungs- bzw. Layoutvarianten berücksichtigt werden. In Absprache mit der GGEW AG wurden die Untersuchungen für folgende Varianten durchgeführt (Winkeldefinitionen s. Abschnitt 4):

Neigungswinkel ε 10° , Ausrichtung der Modultischreihen $\nu = 0^\circ$

Neigungswinkel ε 30° , Ausrichtung der Modultischreihen $\nu = 0^\circ$

Neigungswinkel ε 10° , Ausrichtung der Modultischreihen $\nu = -13^\circ$

Neigungswinkel ε 30° , Ausrichtung der Modultischreihen $\nu = -13^\circ$

$\nu = -13^\circ$ bedeutet, dass die Modultischreihen um 13° gegen den Uhrzeigersinn ausgerichtet werden.

Wahl des Neigungswinkels: Mit 10° bis 30° werden alle in Deutschland wirtschaftlich sinnvollen Neigungswinkel abgedeckt.

Ausrichtung der Modultischreihen: Normalerweise werden die Modultischreihen in Ost-West-Richtung ausgerichtet, weil damit die höchsten Energieerträge erzielt werden. Bei ungünstiger Form der zur Verfügung stehenden Fläche werden jedoch die Tischreihen manchmal aus der Ost-West-Richtung herausgedreht, wenn dadurch auf der Fläche mehr Module untergebracht werden können. Wirtschaftlich sinnvoll sind Winkel

ν bis $|\pm 15^\circ|$; der untersuchte Winkel $\nu = -13^\circ$ ergab sich aus einer derzeit vorliegenden Planungsvariante.

3 Angabe zur PV-Anlage und zu topografischen Daten

Die PV-Anlage wird nicht auf der gesamten ursprünglich geplanten Fläche errichtet werden, sondern nur auf je einer Teilfläche am nördlichen und südlichen Ende der ursprünglichen Fläche; die Fläche wurde damit um ca. 50 % reduziert. Wie bereits erwähnt, steht das Modullayout noch nicht fest; genauere Angaben zur Modulneigung und Ausrichtung der Tischreihen können noch nicht gemacht werden. Die nachfolgenden Berechnungen wurden zudem ohne den ursprünglich vorgesehenen 6 m breiten Streifen zwischen den Modultischreihen durchgeführt. Zu den topografischen Daten der PV-Anlage, der Autobahn und dem Segelflugplatz s. die Stellungnahmen vom 25. 1. 2017 und 9. 2. 2017.

4 Berechnungen

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 Kraftfahrers oder Flugrichtung eines Piloten	α
im Raum liegender Blendwinkel (gebildet durch die Blickrichtung eines Lokführers/Piloten - Richtung reflektiertes Sonnenlicht)	θ
Neigung der PV-Module gegen Süd	ε
Azimut - Ausrichtung der Modultischreihen gegen Ost oder West	ν
horizontaler Blickwinkel Lokführer/Pilot - PV-Anlage	τ
Steig- oder Sinkwinkel eines Flugzeuges	σ

Datenquellen und verwendete Programme: Die Geländehöhen wurden von der GGEW AG Heppenheim zur Verfügung gestellt. Die horizontalen Winkel und Entfernungen wurden mit google earth bestimmt. Die Berechnung des monatlichen Sonnenstandes für Heppenheim (Sonnenhöhe und -azimut) erfolgte mit der Website www.stadtklima-stuttgart.de. Die Winkel des reflektierten Sonnenlichts wurden mit eigenen excel-Programmen berechnet.

Die Auswertung erfolgte mittels der in den Bildern 4 bis 8 dargestellten Sonnenstandsdiagramme in Form eines Polardiagramms für den Standort Heppenheim. In dieses Diagramm ist der Sonnenstand für den 15. jedes Monats für Heppenheim als rote Linie eingezeichnet. Werden die Berechnungen für die gesamte Fläche oder eine Teilfläche der PV-Anlage durchgeführt, stellen die ermittelten α/γ -Werte für die Sonnenhöhenwinkel Flächen in Form von geschlossenen Polygonzügen dar, die im Fol-

genden als γ -Flächen bezeichnet werden. Werden die Berechnungen nur für einen Punkt der PV-Fläche berechnet, stellen die ermittelten α/γ -Werte Kurven dar. Diese in Abhängigkeit der Beobachtungsentfernung und der Blickwinkel ermittelten γ -Flächen bzw. γ -Kurven werden in die Sonnenstandsdiagramme eingetragen. Sie kennzeichnen die Winkel der Sonnenhöhe γ und des Sonnenazimuts α , bei denen sich die Sonne befinden müsste, damit reflektiertes Sonnenlicht ins Auge eines Beobachters (Kraftfahrer auf der BAB oder Pilot) gelangen könnte. Haben sie Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, fällt demzufolge Sonnenlicht ins Auge eines Beobachters; die dazugehörigen Jahres- und Tageszeiten können aus dem Polardiagramm abgelesen werden.

Blendung eines Beobachters kann nur für Blickwinkel θ zwischen der Blickrichtung des Beobachters und der Richtung Beobachter-PV-Anlage auftreten, die 20° nicht überschreiten; bei größeren Blickwinkeln tritt das Sonnenlicht zu sehr peripher (seitlich) ins Beobachteraue ein, als dass es dann noch Blendung erzeugen könnte.

5 Einfluss des Modultyps auf das Reflexionsverhalten

Bild 2 zeigt die Reflexion eines üblicherweise verwendeten Solarmoduls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Sonnenlichts. Wenn die Sonne mittags hoch am Himmel steht, fällt das Sonnenlicht etwa senkrecht auf die Moduloberfläche (Einfallswinkel nahe 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, d.h. 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 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,***

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

die allerdings durch (die dann ebenfalls in Sichtrichtung tiefstehende) Sonne relativiert werden“. (Hervorhebung in Fettschrift durch den Unterzeichner).

Nach den Fresnelschen Gleichungen, die wegen ihrer Komplexität hier nicht näher erläutert werden können, hängt die Lichtreflexion einer glatten Oberfläche nur vom Lichteinfallswinkel und dem Brechungsgrad des Oberflächenmaterials ab. Bei allen Solarmodulen besteht die oberste Schicht aus einem glasartigen Material, dessen Brechungsindex praktisch immer identisch ist. Deshalb gilt die in Bild 2 gezeigte Reflexionscharakteristik prinzipiell für alle üblicherweise verwendeten Solarmodule mit glatter Oberfläche unterschiedlichster Bauart, d.h. sowohl für mono- und polykristalline Solarmodule als auch für Dick- und Dünnschichtmodule, die von verschiedensten Herstellern angeboten werden. Das heißt, dass für streifende Lichteinfallswinkel (in Bild 2 Einfallswinkel von 0° bis ca. 30°), die für die evtl. Blendwirkung bedeutsam sind, die Reflexion völlig unabhängig von dem eigentlichen Solarzellen-Material ist. Nur in dem für die Energieerzeugung wichtigen Winkelbereich von ca. 40° bis 90° können sich die Module unterscheiden, da durch Oberflächenvergütung oder andere Maßnahmen erreicht wird, dass die Reflexion in diesem Winkelbereich auf bis zu 2 Prozent verringert und die Absorption entsprechend erhöht werden kann mit dem Ziel, die Energieausbeute zu erhöhen. Aber es soll nochmals betont werden, dass die Verringerung der Reflexion nur im Winkelbereich von ca. 40° bis 90° , aber **nicht** bei streifendem Lichteinfallswinkel funktioniert. Firmenaussagen wie „besonders reflexionsarm“ beziehen sich **nicht** auf streifende Lichteinfallswinkel!

Eine Möglichkeit, die Reflexion auch bei streifenden Winkeln zu verringern, besteht darin, die Moduloberflächen nicht glatt, sondern strukturiert auszuführen. So werden Solarmodule mit Pyramidenprägung angeboten, die nach Messungen des Unterzeichners bei streifenden Winkeln tatsächlich sehr reflexionsarm sind. Wegen ihres hohen Preises sind sie jedoch unwirtschaftlich und werden kaum angewendet. Sie besitzen zudem den Nachteil, dass sie zu Verschmutzung neigen; in einem Fall wurde von einem Anwender sogar berichtet, dass sich auf der Oberfläche Flechten angesiedelt hätten. Wie die folgenden Berechnungen zeigen, ist der Einsatz solcher Module in Heppenheim nicht nötig.

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 üblichen 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. Das gemäß Reflexionsgesetz reflektierte Licht stellt den sogenannten Kernreflex dar, das diffus reflektierte Licht wird als Streureflex bezeichnet. Die Intensität des Streureflexes ist viel geringer als die des Kernreflexes, die Wirkung des Streureflexes muss daher bei den Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

6 Blendrisiko für Kraftfahrer

Wie ausgeführt, können Blickwinkel $\theta > 20^\circ$ keine Blendung erzeugen und müssen demnach nicht untersucht werden. Da die Fahrtrichtung Nord auf der Autobahn in Höhe der südlichen Teilfläche $\alpha = 332^\circ$ und in Fahrtrichtung Süd in Höhe der nördlichen Teilfläche $\alpha = 148^\circ$ beträgt, müssen in Fahrtrichtung Nord nur Blickwinkel Kraftfahrer - PV-Anlage von 332° bis 352° und in Fahrtrichtung Süd von 128° bis 148° untersucht werden.

Die Berechnungen finden für einen Kraftfahrer statt, der sich jeweils auf dem der PV-Anlage näherliegenden Fahrstreifen befindet: rechter Fahrstreifen in Fahrtrichtung Nord, Überholfahrstreifen Fahrtrichtung Süd (hinsichtlich Blendung kritischerer Fall).

6.1 Fahrtrichtung Nord

Die Berechnungen beginnen bei dem Punkt auf der Autobahn, bei dem der Kraftfahrer am südlichen Rand der südlichen Teilfläche der PV-Anlage vorbeifährt. In das Polar diagramm von Bild 4 sind die γ -Flächen für den untersuchten Blickwinkelbereich 332° bis 352° für die in Abschnitt 2 genannten vier Winkelkombinationen ε/v eingezeichnet. Die γ -Flächen für alle Winkelkombinationen liegen oberhalb der Sonnenstandslinien, sie haben keine Schnittpunkte mit diesen. Sonnenlichtreflexion in Richtung Autobahnnutzer ist nicht möglich. 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 bis Südosten, d.h. ins Auge eines in Richtung Norden bis Nordwesten blickenden Kraftfahrers, reflektiert werden kann. Während der Weiterfahrt ändern sich die Winkelverhältnisse nur unwesentlich, weitere γ -Flächen fallen praktisch mit den in Bild 4 dargestellten γ -Flächen zusammen, die daher als repräsentativ für die gesamte Vorbeifahrt an der Teilfläche Süd gelten kann; auf die Wiedergabe der weiteren γ -Flächen kann daher verzichtet werden. Dieses Ergebnis, nach den Ausführungen der Stellungnahme vom 9. 2. 2017 für die Blickverhältnisse eines Lkw-Fahrers ermittelt, kann auch auf Pkw-Fahrer übertragen werden (hinsichtlich Blendung unkritischerer Fall). In Bild 4 ist ein rot schraffierter Bereich eingezeichnet, der sozusagen die „Einhüllende“ der γ -Flächen der untersuchten Winkelkombinationen darstellt. Dieser Bereich würde für beliebige Kombinationen des Neigungswinkels ε im Bereich 10° bis 30° und der Modultischausrichtung v im Intervall 0° bis -13° gelten. Der Bereich liegt natürlich ebenfalls komplett oberhalb der Sonnenstandslinien; das bedeutet, dass für beliebige Winkelkombinationen innerhalb des untersuchten Bereichs keine Sonnenlichtreflexion in Richtung Nutzer der Autobahn möglich ist.

Da sich die Fahrtrichtung auf der Autobahn bei der Weiterfahrt in Richtung Nord bis zum Erreichen der nördlichen Teilfläche nur unwesentlich ändert, bleiben die Sichtverhältnisse eines Kraftfahrers auf der Autobahn praktisch unverändert. Die in Bild 4 wiedergegebenen und im vorangehenden Absatz diskutierten Ergebnisse für die südliche Teilfläche der PV-Anlage gelten damit uneingeschränkt auch für die nördliche Teilfläche.

Fazit: Unter blendkritischen Blickwinkeln kann in Fahrtrichtung Nord kein Sonnenlicht von der PV-Anlage zu einem auf der Autobahn vorbeifahrenden Kraftfahrer reflektiert werden, Blendung eines Kraftfahrers kann daher nicht auftreten.

6.2 Fahrtrichtung Süd

Die Berechnungen beginnen bei dem Punkt auf der Autobahn, bei dem der Kraftfahrer am nördlichen Rand der nördlichen Teilfläche der PV-Anlage vorbeifährt. In das Polardiagramm von Bild 4 sind auch die γ -Flächen für den untersuchten Blickwinkelbereich 128° bis 148° für die in Abschnitt 2 genannten vier Winkelkombinationen ε/v eingezeichnet. Alle γ -Flächen liegen unterhalb der Sonnenstandslinien, sogar außerhalb des Sonnenstandsdiagramms. Die γ -Flächen haben keine Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, Sonnenlicht kann in keinem Fall zum Kraftfahrer gelenkt werden. Dieser Sachverhalt gibt die Tatsache wieder, dass der Kraftfahrer nur die Modulrückseiten sieht und das Sonnenlicht immer über das Kfz hinweg reflektiert wird. Auch in dieser Fahrtrichtung ändern sich die Winkelverhältnisse während der Weiterfahrt nur unwesentlich, so dass weitere γ -Flächen wieder mit den in Bild 4 dargestellten γ -Flächen zusammenfallen. Diese können daher als repräsentativ für die gesamte Vorbeifahrt an der nördlichen Teilfläche gelten. Auch für diese Fahrtrichtung kann das Ergebnis auf Pkw-Fahrer übertragen werden.

Auch die Einhüllende der γ -Flächen der untersuchten vier Winkelkombinationen liegt komplett unter- bzw. außerhalb der Sonnenstandslinien; das bedeutet, dass für beliebige Winkelkombinationen innerhalb des untersuchten Bereichs keine Sonnenlichtreflexion in Richtung Nutzer der Autobahn möglich ist.

Da sich die Fahrtrichtung auf der Autobahn bei der Weiterfahrt in Richtung Süd bis zum Erreichen der südlichen Teilfläche nur unwesentlich ändert, bleiben die Sichtverhältnisse eines Kraftfahrers auf der Autobahn praktisch unverändert. Die in Bild 4 wiedergegebenen und im vorangehenden Absatz diskutierten Ergebnisse für die nördliche Teilfläche der PV-Anlage gelten damit uneingeschränkt auch für die südliche Teilfläche.

Fazit: Auch in Fahrtrichtung Süd kann ein Kraftfahrer nicht von der PV-Anlage geblendet werden.

7 Blendrisiko für Piloten

7.1 Starts

Bei Starts von Motorflugzeugen, auch beim Flugzeugschlepp, muss der Pilot das gesamte Umfeld der SLB im Auge haben, er ist dann einem evtl. Blendrisiko ausgesetzt. Bei Windenstarts muss sich der Segelflugpilot zwar im Wesentlichen auf das vor ihm befindliche Seil und weniger auf die Umgebung des Flugzeugs konzentrieren; weil dieser aber ebenfalls durch die PV-Anlage geblendet werden könnte, erfolgen die Berechnungen auch für die Situation des mittels Winde startenden Segelflugzeugpiloten.

Es wird davon ausgegangen, dass das schleppende Flugzeug/das Segelflugzeug frühestens 300 m nach Beginn der SLB vom Boden abhebt. Die Berechnungen wurden für Steigwinkel σ von 1°, 3°, 5°, 10° und 20° für die westliche, also die der PV-Anlage näher liegende SLB (hinsichtlich Blendung kritischerer Fall) durchgeführt. Als Blickpunkt zur PV-Anlage wurde bei Starts in Richtung Norden der nordöstliche Eckpunkt der nördlichen Teilfläche und bei Starts in Richtung Süden der südöstliche Eckpunkt der südlichen Teilfläche verwendet (hinsichtlich Blendung wieder jeweils kritischster Punkt der PV-Anlage). Die Berechnungen fanden für die in Abschnitt 2 genannten vier Winkelkombinationen ε/v statt.

Blendung eines Piloten kann nur für Blickwinkel θ zwischen der Blickrichtung des Piloten und der Richtung Pilot-PV-Anlage auftreten, die 20° nicht überschreiten.

Die Ergebnisse sind in das Polardiagramm von Bild 5 eingezeichnet. In das Diagramm wurden nur die γ -Kurven für den Steigwinkel $\sigma = 3^\circ$ eingetragen, die repräsentativ für alle berechneten γ -Kurven bei Starts sind.

Die γ -Kurven für den Start in Richtung Nord liegen sämtlich oberhalb der Sonnenstandslinien, die γ -Kurven für Start in Richtung Süden unterhalb der Sonnenstandslinien, sogar außerhalb des Sonnenstandsdiagramms. Alle Kurven haben keine Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, wie in den Abschnitten 6.1 und 6.2 erläutert, kann bei fehlenden Schnittpunkten mit den Sonnenstandslinien in keinem Fall Sonnenlicht zum Piloten gelenkt werden.

In Bild 5 sind wieder die Einhüllenden für die vier untersuchten Winkelkombinationen ε/v eingetragen. Sie liegen komplett oberhalb bzw. unterhalb der Sonnenstandslinien; das bedeutet, dass für beliebige Winkelkombinationen innerhalb des untersuchten Bereichs keine Sonnenlichtreflexion in Richtung startender Piloten möglich ist.

Fazit: Insgesamt kann ein startender Pilot nicht von der PV-Anlage geblendet werden.

7.2 Blendrisiko bei Landungen

Die Berechnungen erfolgten entsprechend der Ausrichtung der SLB bei der Landerichtung 150° bzw. 330° für Sinkwinkel $\sigma = 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ und 20° wieder für die westliche SLB. Zusätzlich wurden auch „Landungen aus ungewohnter Richtung“ berücksichtigt. Bei diesen Landungen erfolgt der Anflug zunächst aus Richtungen, die um bis zu $\pm 15^\circ$ von der Standardlanderichtung abweichen können, das ist für Heppenheim $\alpha = 135^\circ/315^\circ$ und $165^\circ/345^\circ$; erst kurz vor der Landung schwenkt dann der Pilot auf die Standardlanderichtung ein. Die Berechnungen finden bei Landungen in Flugrichtung Süd für die südliche Teilfläche, für Landungen in Flugrichtung Nord für die nördliche Teilfläche statt (jeweils kritischere Teilfläche).

Die Berechnungen fanden für die in Abschnitt 2 genannten vier Winkelkombinationen ε/v statt. In Bild 6 sind die γ -Kurven für den Sinkwinkel 3° und die Standardlanderichtungen $150^\circ/330^\circ$ eingezeichnet, die Kurven sind repräsentativ für alle berechneten Sinkwinkel und Anflugrichtungen bei Landungen. Alle γ -Kurven liegen wieder oberhalb bzw. unterhalb der Sonnenstandslinien, Sonnenlichtreflexion zum landenden Piloten ist in keinem Fall möglich. Die Begründung hierfür ist die gleiche wie in den Abschnitten 6.1 und 6.2 beschrieben.

In Bild 6 sind wieder die Einhüllenden für die vier untersuchten Winkelkombinationen ε/v eingetragen. Sie liegen komplett oberhalb bzw. unterhalb der Sonnenstandslinien; das bedeutet, dass für beliebige Winkelkombinationen innerhalb des untersuchten Bereichs keine Sonnenlichtreflexion in Richtung landender Piloten möglich ist.

Fazit: Auch ein landender Pilot kann von der PV-Anlage nicht geblendet werden.

7.3 Platzrunden

7.3.1 Segelflugplatzrunde

Die folgenden Informationen wurden von Herrn Dr. Rüllmann, Aero-Club Heppenheim, zur Verfügung gestellt: Bei Segelflug-Anflügen, die in Heppenheim aus der östlich der SLB befindlichen Segelflugplatzrunde geflogen werden, sieht man häufig zum Flugplatz, um die Höhe für die Landeinteilung gut einschätzen zu können. Die Flughöhen in der Segelflugplatzrunde sind näherungsweise: 200 m über Grund im Gegenanflug, Blick querab zum Anfang der SLB für die Landerichtung Nord oder Süd (s. Bild 3, Pfeile 1 und 2 bzw. 5 und 6), ca. 150 m im Queranflug (Pfeile 3 und 7), die Kurve in den Endanflug wird in etwa 100 m über Grund geflogen (Pfeile 4 und 8). In Abweichung zur Sichtflugkarte wird der Gegenanflug häufig etwas weiter ausgedehnt, z.B. für die Landerichtung 33 wird die Kurve vom Gegen- in den Queranflug manchmal erst beim Laudenbacher Sportplatz geflogen.

Auch bei Anflügen aus der Segelflug-Platzrunden fanden die Berechnungen für die in Abschnitt 2 genannten vier Winkelkombinationen ε/v statt; berücksichtigt wurden wieder nur Winkel θ des Piloten Aufsetzpunkt auf der SLB-Mittelpunkt der nördlichen bzw. südlichen PV-Teilfläche. Die Berechnungen wurden für einen Piloten durchgeführt, der vom Beginn des Gegenanflugs bis zum Endanflug in kurzen Zeitabständen zum Aufsetzpunkt blickt. Dadurch ergeben sich kontinuierliche γ -Kurven; in den Bildern 7 und 8 sind die γ -Kurven mit den Zahlen 1 bis 4 bzw. 5 bis 8 versehen, die mit den entsprechenden Zahlen der Pfeile von Bild 3 korrespondieren und den zeitlichen Ablauf des Anflugs gemäß Bild 3 kennzeichnen.

Da sich die Blickwinkel für beide SLB für einen von der Platzrunde anfliegenden Piloten nur um wenige Zehntelgrade unterscheiden, gelten die nachfolgenden Ergebnisse für beide SLB.

Landeanflug zur SLB 33L oder 33R

Die für die genannten Blickrichtungen ermittelten γ -Kurven wurden in Bild 7 eingetragen. Die Grafik zeigt, dass bei den Blickrichtungen, die zu den Pfeilen 2 bis 4 gehören, Sonnenlicht zum Piloten gelenkt werden kann. Diese Sonnenlichtreflexion tritt im Winkelbereich ca. 257° bis 290° auf, also wenn der Pilot im Gegenanflug so weit geflogen ist, dass er zum Aufsetzpunkt querab oder bereits leicht nach rechts (westlich) rückwärts blickt (Pfeile 2 oder 3) oder der Pilot sich im Queranflug befindet (Pfeil 4). Die Blickzuwendung zum Aufsetzpunkt kann mehrere Sekunden betragen. Während dieser Zeit wandert sozusagen das Bild der Sonne auf der PV-Anlage mit. Die Sonnenlichtreflexion tritt innerhalb Einhüllenden in Bild 7 auf (wegen der besseren Unterscheidbarkeit zu den roten Sonnenstandslinien ist die Einhüllende in diesem Bild grau schaffiert); je nach gewählter Winkelkombination ε/v kommt es im ganzen Jahr mit Ausnahme des Monats Juli zu Sonnenlichtreflexionen, etwa zwischen ca. 16 Uhr und 18 Uhr. Die Möglichkeit der Sonnenlichtreflexion zum Piloten über mehrere Sekunden ist aber nicht gleichbedeutend mit der Tatsache, dass der Pilot auch geblendet wird. Vielmehr muss nun die Intensität des reflektierten Sonnenlichts ins Verhältnis gesetzt werden zur Intensität des direkten Sonnenlichts, das ja **gleichzeitig** das Pilotenauge erreicht. Die Intensität des reflektierten Sonnenlichts hängt von mehreren Einflussgrößen ab:

- a. Je nach Blicksituation, von der der jeweilige Modulreflexionsgrad abhängt, werden 13 % bis 53 % des einfallenden Sonnenlichts von der Oberfläche der Module reflektiert.
- b. Eine weitere Reduzierung des reflektierten Sonnenlichts ergibt sich dadurch, dass dieses Licht nur von den Teilen der Fläche, die mit Modulen bestückt sind, reflektiert werden kann, aber nicht von den Flächenanteilen, die von den freien Gängen zwischen den Modulreihen eingenommen werden (s. Bild 7). Je nach Modullayout und momentanen Blickwinkel des Piloten zur PV-Anlage der PV-Anlage liegt der Reduktionsfaktor zwischen 0,36 bei westlichem Blick zur PV-Anlage und geht gegen 1,0 bei nördlichem Blick zur Anlage.
- c. Die Blickentfernung des Piloten zur südlichen Teilfläche der PV-Anlage beträgt ca. 800 m bis 1000 m. Bei einer solchen Entfernung 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. Bei 1000 m ist nach früheren Messungen des Unterzeichners mit einem weiteren Reduktionsfaktor von 0,6 bis 0,8 zu rechnen.
- d. Die Oberflächen von PV-Modulen sind nicht ideal spiegelnd, sondern mit einer leichten Struktur versehen (die aber die Wirksamkeit der in Abschnitt 5 genannten Fresnelschen Gleichungen nicht beeinträchtigt), 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 leichte Oberflächenstruktur 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 dem vorhergesehenen Neigungswinkel ε montiert und nicht genau im geplanten Azimut ν gegen die Ost-West-Richtung 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 dem zugehörigen Reflexionsgrad entsprechende Anteil von Licht 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 Verschmutzungsneigung sowie die Montagetoleranzen nicht vorhergesagt werden können. Erfahrungsgemäß ist damit zu rechnen, dass der Anteil des reflektierten Lichts durch diese drei Einflussgrößen gegenüber dem theoretischen Wert um weitere ca. 40 % verringert wird.

Die Berechnung dieser Einflussfaktoren führt zu folgendem Ergebnis:

Bei den Winkelkombinationen mit steilem Neigungswinkel $\varepsilon/\nu = 30^\circ/0^\circ$ und $30^\circ/-13^\circ$ tritt die Sonnenlichtreflexion ca. 2 Stunden vor Sonnenuntergang bis zum Sonnenuntergang auf. Das Verhältnis der Intensität reflektiertes/direktes Sonnenlicht beträgt ca. 4 % bis 8 %. Blendung kann allenfalls durch die Sonne selbst auftreten, aber nicht durch das am Auge des Piloten **gleichzeitig** ankommende reflektierte Sonnenlicht wegen dessen geringer Intensität.

Bei den Winkelkombinationen mit flachem Neigungswinkel $\varepsilon/\nu = 10^\circ/0^\circ$ und $10^\circ/-13^\circ$ tritt die Sonnenlichtreflexion ca. 1 Stunde vor Sonnenuntergang bis zum Sonnenuntergang auf. Das Verhältnis der Intensität reflektiertes/direktes Sonnenlicht beträgt zwar wegen der bei flachen Sonneneinfallswinkeln höheren Reflexion (s. Bild 2) ca. 12 % bis 14 %, das Verhältnis Intensität reflektiertes Sonnenlicht/Intensität des direkten Sonnenlichts im Zenit beträgt aber nur 0,1 % bis 4 %, da die Sonnenlichtreflexion vorwiegend zu Zeiten nahe des Sonnenuntergangs stattfindet. Dann ist aber die absolute Intensität der untergehenden Sonne ist so gering, dass diese keine Blendung erzeugt - wie bereits in Abschnitt 5 erwähnt, kann man einen Sonnenauf- oder -untergang ohne weiteres mit bloßem Auge betrachten. Demzufolge kann das reflektierte Sonnenlicht in dieser Situation erst recht keine Blendung erzeugen.

Diese Ergebnisse gelten auch für die grau schraffierte Einhüllende für die vier untersuchten Winkelkombinationen ε/ν und damit für beliebige Winkelkombinationen innerhalb dieser Winkelbereiche.

Landeanflug zur SLB 15L oder 15R

In Bild 8 sind die γ -Kurven für die Blickrichtung beim Anflug aus nördlichen Richtungen eingezeichnet. Nur bei der Blicksituation, bei der bei einem Neigungswinkel von 10° und einer Modultschausrichtung von -13° der Pilot bei Beginn des Gegenanflugs (Pfeil 5 in Bild 3) zum Aufsetzpunkt blickt, kann wenige Minuten vor Sonnenuntergang bis Sonnenuntergang Sonnenlicht zum Piloten gelenkt werden, aber dann ist die Intensität des reflektierten und des direkten Sonnenlichts so gering, dass man ohne Blendrisiko dorthin blicken kann. Abgesehen von dieser Ausnahme liegen alle γ -Kurven und die rot schraffierte Einhüllende unterhalb der Sonnenstandslinien bzw. außerhalb des Polardiagramms, gemäß der in Abschnitt 6.2 gegebenen Erklärung ist für die vier untersuchten Winkelkombinationen ε/ν und für beliebige Winkelkombinationen innerhalb dieser Winkelbereiche keine Reflexion zum Piloten und damit keine Blendung möglich.

Fazit: Beim Durchfliegen einer Segelflugplatzrunde ist in keiner Situation Blendung eines Piloten zu erwarten.

7.3.2 Platzrunde MSL 1200

Die Platzrunde MSL 1200 für Motorflugzeuge wird in 1200 Fuß = 366 m über Normalnull geflogen. Bei der Höhe der SLB von 95 m entspricht dies einer Höhe von 271 m über Grund. Die Form der Platzrunde ist rechteckig, eine Teilstrecke wird in der Regel direkt oberhalb und parallel zu einer SLB geflogen. Die Blickwinkel θ des Piloten zur PV-Anlage sind beim normalen Blick geradeaus weitaus größer als die oben genannten 20° , die für eine evtl. Blendwirkung kritisch sind, Blendung kann nicht auftreten. Wenn der Pilot zum Aufsetzpunkt und damit auch zur PV-Anlage schaut und in bestimmten Situationen Sonnenlicht zu ihm reflektiert wird, ist dessen Intensität wieder weitaus geringer als die Intensität des direkten Sonnenlichts. Da die Entfernung des Piloten beim Durchfliegen der westlichen Strecke der MSL 1200 mehr als 2 km von der PV-Anlage beträgt, ist wegen der atmosphärischen Trübung das Verhältnis der Intensität reflektiertes/direktes Sonnenlicht noch kleiner als im vorangehenden Abschnitt für die Segelflugplatzrunde beschrieben. Auch beim Durchfliegen der MSL 1200 tritt keine Pilotenblendung auf.

Für die Sichtbedingungen des Endanflugs eines Motorflugzeuges gelten die Ausführungen des Abschnitts 7.2; dort konnte eine Blendung für landende Piloten ausgeschlossen werden. Dieses Resultat gilt für die vier untersuchten Winkelkombinationen ε/ν und für beliebige Winkelkombinationen innerhalb dieser Winkelbereiche.

Fazit: Auch beim Durchfliegen einer Platzrunde auf der MSL 1200 ist keine Blendung eines Piloten zu erwarten.

7.3.3 Vergleich mit der Sonnenlichtreflexion von Gewässern

Die Sonnenlichtreflexion von einer PV-Anlage ist mit der Sonnenlichtreflexion zu vergleichen, die von einer Gewässeroberfläche bei Windstille erzeugt wird, wie am Beispiel der Bilder 9 und 10 zu sehen ist. Beide Fotos wurden unmittelbar nacheinander bei sonst gleichen Beobachtungsbedingungen aufgenommen. Der Reflexionsgrad einer ruhigen Wasseroberfläche erreicht bei streifendem Lichteinfall wie bei glasartigen Materialien nahezu 100 %. Da eine Wasseroberfläche aber optisch gesehen nicht verschmutzt ist, ist die Intensität des von einer PV-Anlage reflektierten Sonnenlichts sogar geringer als die Intensität des von einem Gewässer bei Windstille reflektierten Sonnenlichts; Klagen von Piloten über Blendung durch Gewässer sind dem Unterzeichner bisher auch nicht bekannt geworden.



Diese Stellungnahme wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.



Bild 1: Mit PV-Modulen geplante, bebaute Fläche der PV-Anlage Heppenheim. Gelb umrandet: Ursprüngliche Fläche, rot ausgefüllt: Aktualisierte Planung

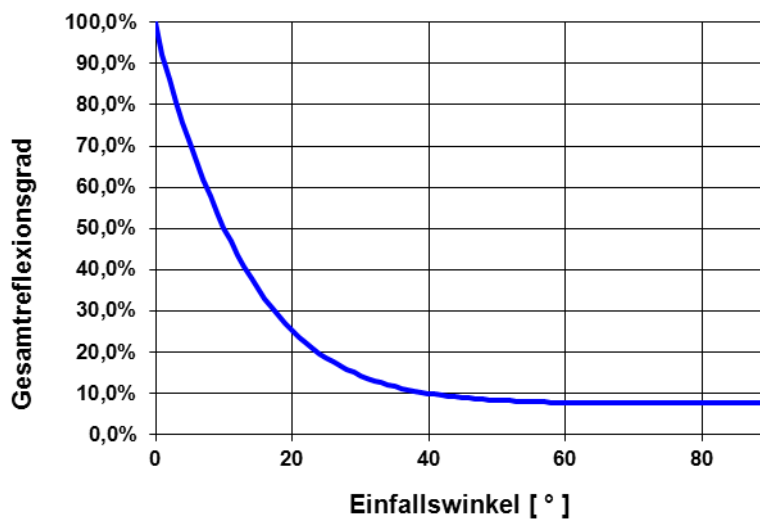


Bild 2: Gesamtreflexionsgrad der Oberfläche eines neuen Solarmoduls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Sonnenlichts. Winkel nahe 0°: Das Licht fällt streifend auf die Moduloberfläche. 90°: senkrechter Lichteinfall

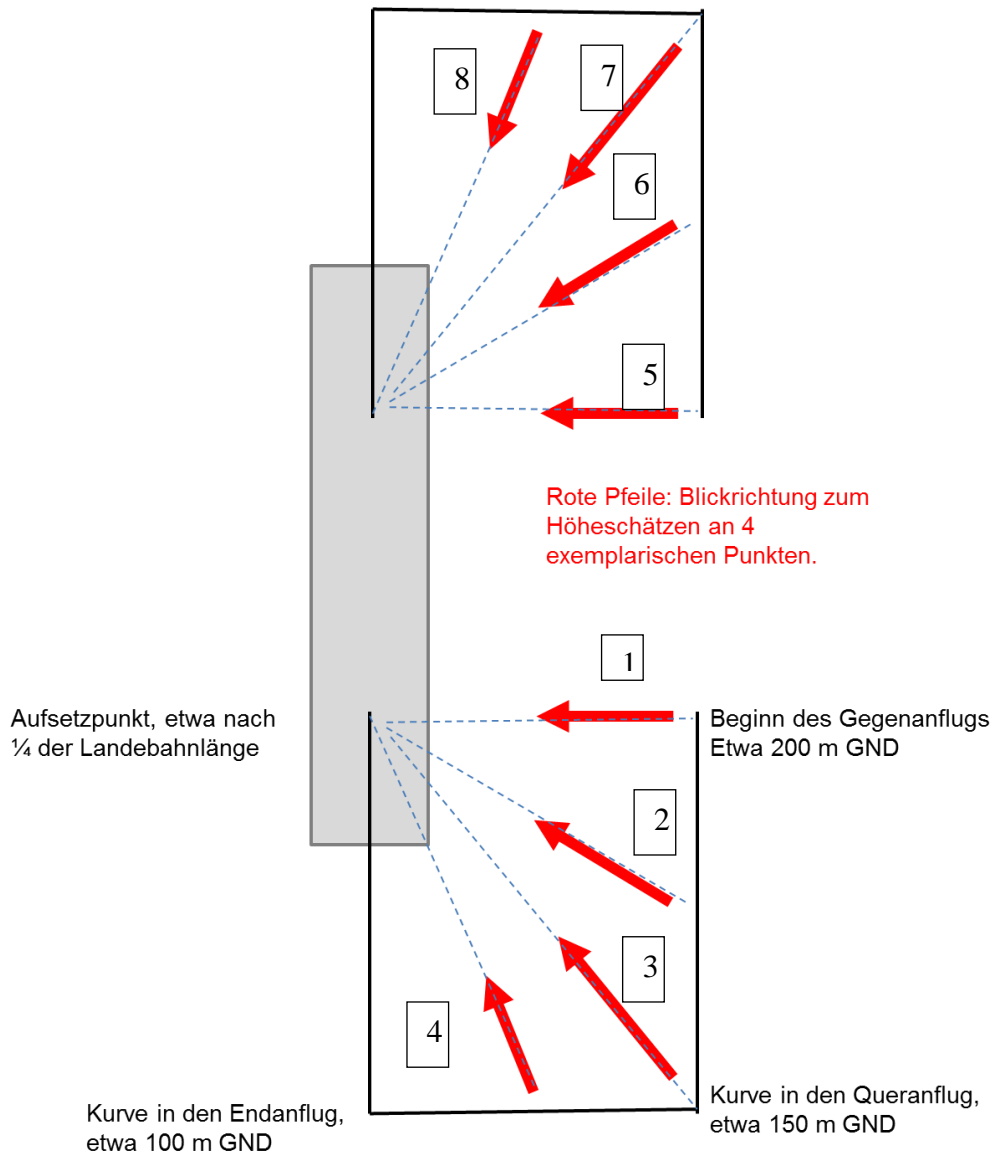


Bild 3: Blickrichtung eines Segelfluggiloten beim Anflug auf den Flugplatz Heppenheim (Grafik nach einer Vorlage von Dr. Rüllmann, Aero-Club Heppenheim e.V.)

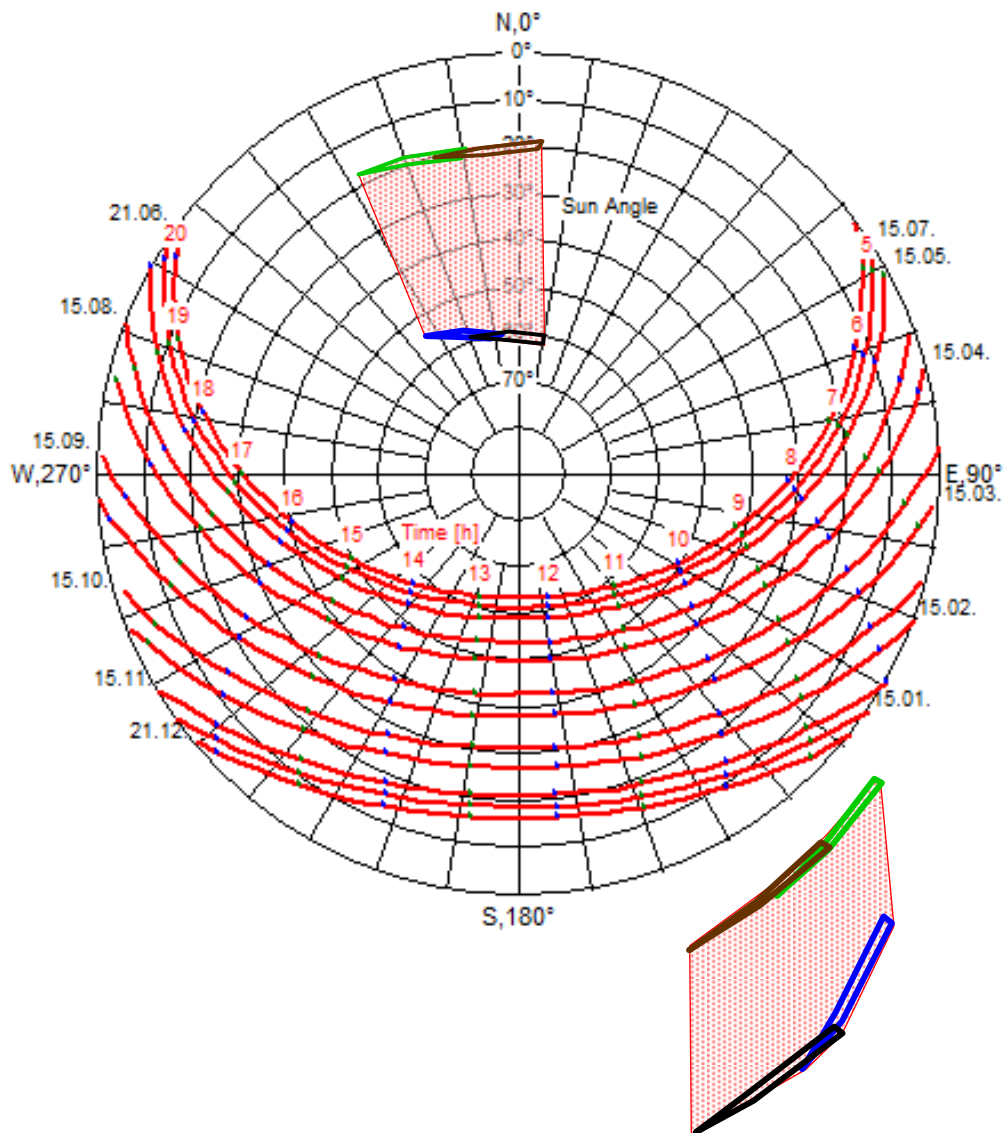


Bild 4: Sonnenstandsdiagramm für Heppenheim mit γ -Flächen für Vorbeifahrt auf der BAB A 5

γ -Flächen im Polardiagramm oben: Fahrtrichtung Nord

γ -Flächen unterhalb des Polardiagramms: Fahrtrichtung Süd

— : Neigung $\varepsilon = 30^\circ$, Ausrichtung $\nu = 0^\circ$

— : Neigung $\varepsilon = 10^\circ$, Ausrichtung $\nu = 0^\circ$

— : Neigung $\varepsilon = 30^\circ$, Ausrichtung $\nu = -13^\circ$

— : Neigung $\varepsilon = 10^\circ$, Ausrichtung $\nu = -13^\circ$

▨ : Bereich, in dem die Sonne stehen müsste, um in Richtung Kraftfahrer gelenkt zu werden, wenn eine Winkelkombination ε / ν des Modullayouts gewählt würde, die zwischen den vier untersuchten Winkelkombinationen liegt
Quelle des Sonnenstandsdiagramms: www.stadtklima-stuttgart.de

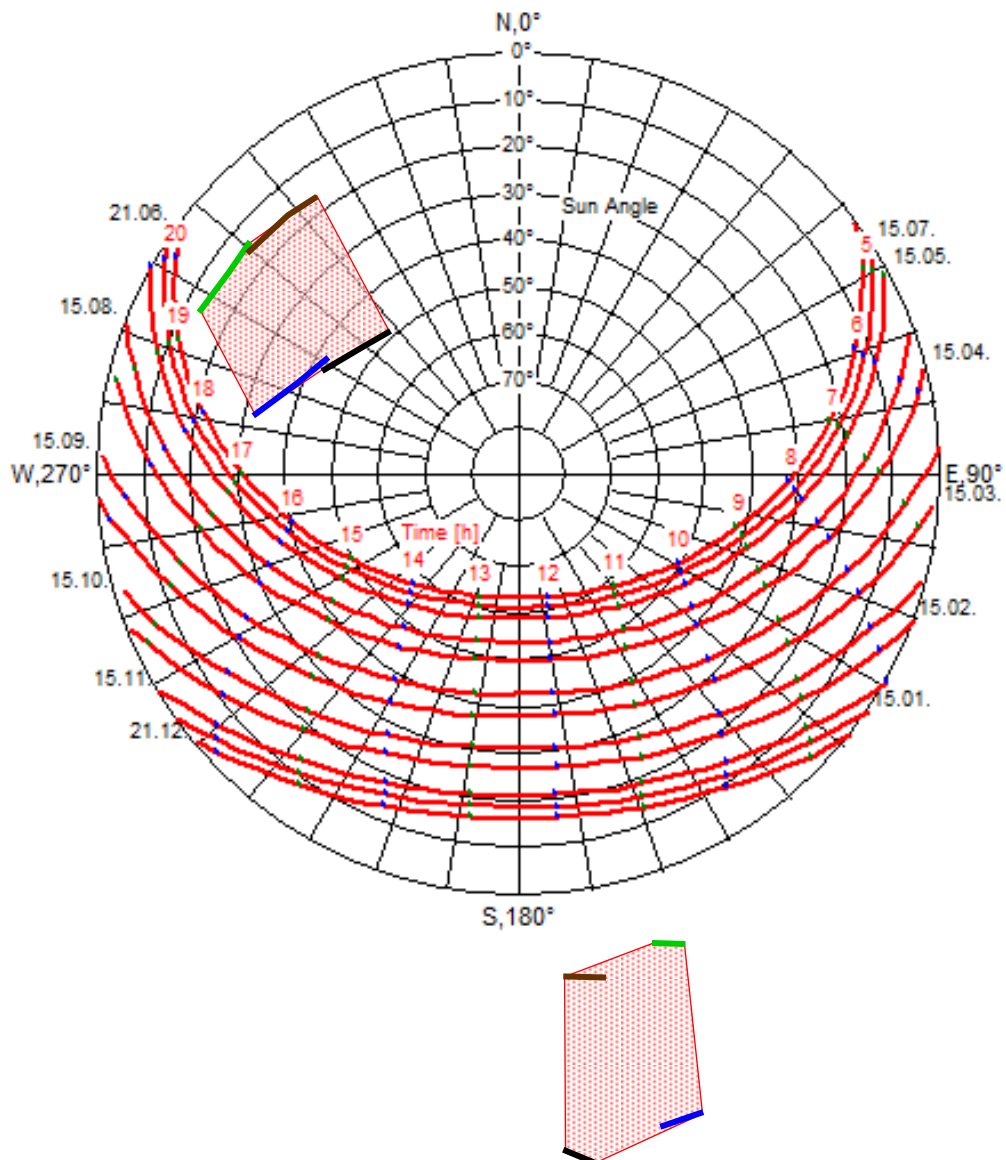


Bild 5: Sonnenstandsdiagramm für Heppenheim mit γ -Kurven bei Starts vom Segelflugplatz für Steigungswinkel $\sigma = 3^\circ$
 γ -Flächen im Polardiagramm: Start in Richtung Nord, Flugrichtung $\alpha = 330^\circ$
 γ -Flächen unterhalb des Polardiagramms: Start in Richtung Süd, Flugrichtung $\alpha = 150^\circ$

- : Neigung $\varepsilon = 30^\circ$, Ausrichtung $\nu = 0^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 10^\circ$, Ausrichtung $\nu = 0^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 30^\circ$, Ausrichtung $\nu = -13^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 10^\circ$, Ausrichtung $\nu = -13^\circ$

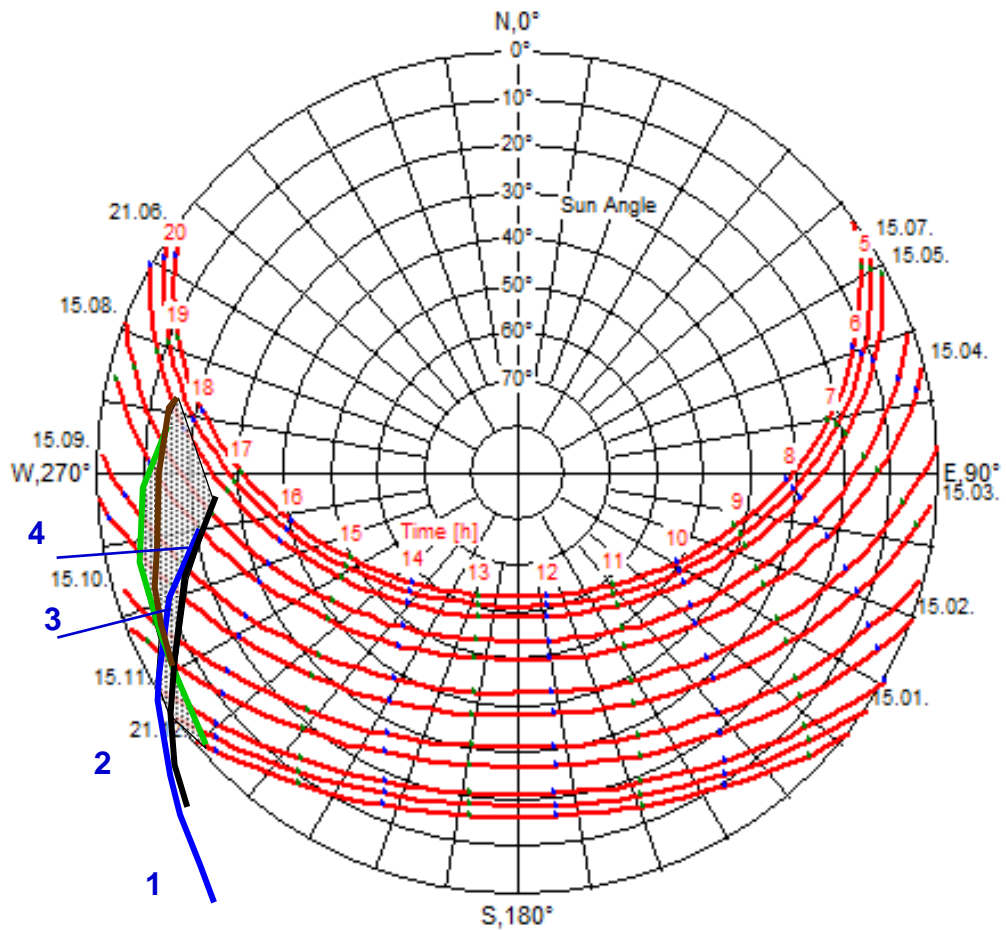


Bild 7: Sonnenstandsdiagramm für Heppenheim mit γ -Kurven für die Segelfluggplatzrunde
Anflug Richtung 33L oder 33R, Pfeilbezeichnung 1 bis 4 lt. Bild 3

- : Neigung $\varepsilon = 30^\circ$, Ausrichtung $\nu = 0^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 10^\circ$, Ausrichtung $\nu = 0^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 30^\circ$, Ausrichtung $\nu = -13^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 10^\circ$, Ausrichtung $\nu = -13^\circ$

▨ : Bereich, in dem die Sonne stehen müsste, um in Richtung Pilot gelenkt zu werden, wenn eine Winkelkombination ε/ν des Modullayouts gewählt würde, die zwischen den vier untersuchten Winkelkombinationen liegt (s. Ausführungen zu Abschnitt 7.3.1 auf S. 10)

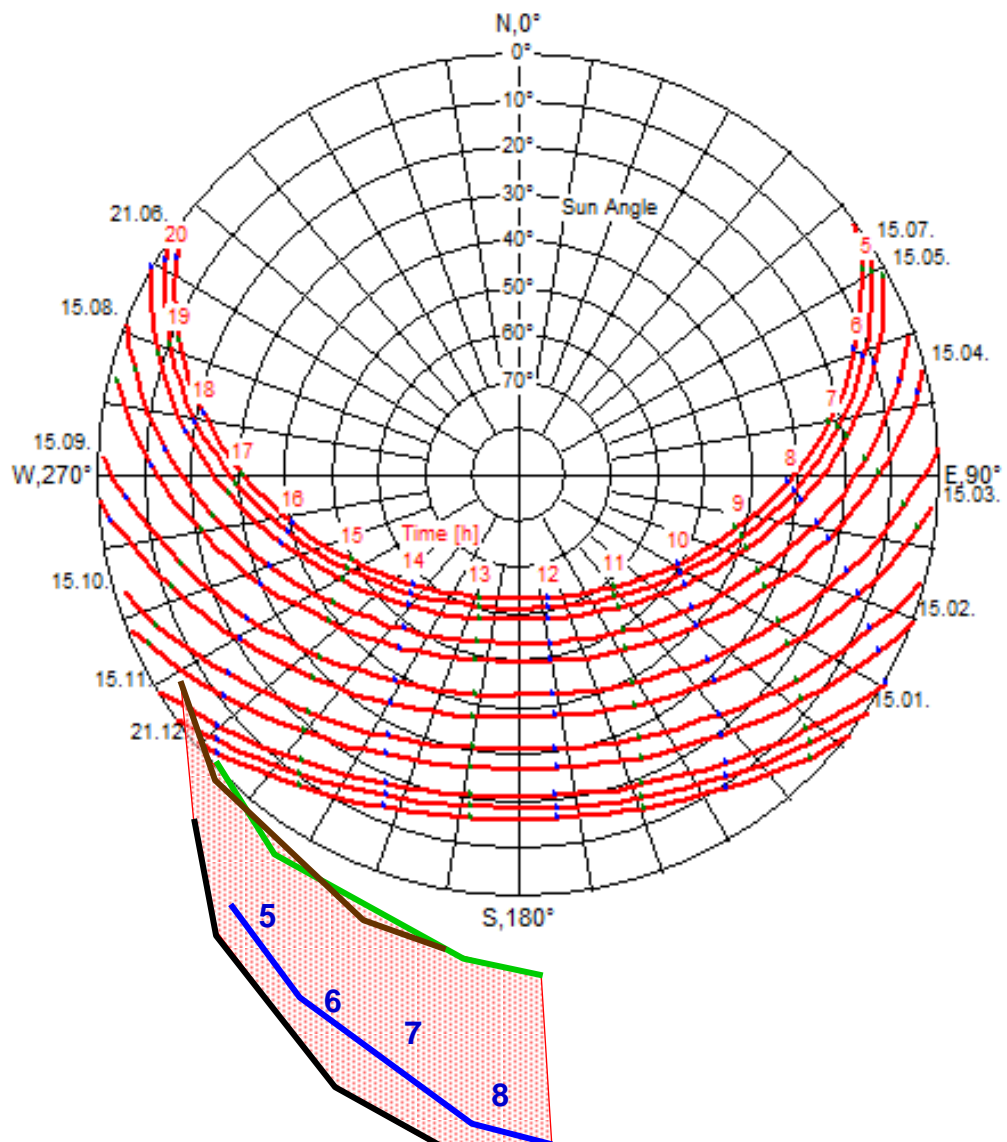


Bild 8: Sonnenstandsdiagramm für Heppenheim mit γ -Kurven für die Segelfluggplatzrunde
Anflug Richtung 15L oder 15R, Pfeilbezeichnung 5 bis 8 lt. Bild 3

- : Neigung $\varepsilon = 30^\circ$, Ausrichtung $\nu = 0^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 10^\circ$, Ausrichtung $\nu = 0^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 30^\circ$, Ausrichtung $\nu = -13^\circ$
- : Neigung $\varepsilon = 10^\circ$, Ausrichtung $\nu = -13^\circ$
- ▨ : Bereich, in dem die Sonne stehen müsste, um in Richtung Pilot gelenkt zu werden, wenn eine Winkelkombination ε/ν des Modullayouts gewählt würde, die zwischen den vier untersuchten Winkelkombinationen liegt



Bild 9: Sonnenlichtreflexion eines Sees



Bild 10: Sonnenlichtreflexion einer PV-Freiflächenanlage