

Dr. Hans Meseberg
LSC Lichttechnik und Straßenausstattung Consult
Fährstr. 10
D-13503 Berlin
Tel.: 030/82707832
Mobil: 0177/3733744
Email: hmeseberg@t-online.de

Berlin, den 17. 2. 2020

G u t a c h t e n
G02/2020
zur Frage der eventuellen Blend- und Störfwirkung von Straßennutzern
und Anwohnern durch eine bei Röckingen installierte Photovoltaikanlage

(Dieses Gutachten besteht aus 13 Seiten
und einem Anhang mit weiteren 4 Seiten)

1 Auftraggeber

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

Auftragsdatum: 28. 1. 2020

2 Auftragsache

Die juwi AG plant die Errichtung einer Freiflächen-Photovoltaikanlage in 91740 Röckingen. Es stellt sich die Frage, ob Nutzer der nahegelegenen Straßen St2218 und AN47 sowie Anwohner oder Beschäftigte in Gewerbebetrieben in benachbarten Orten bzw. Ortsteilen durch die PV-Anlage in unzumutbarer Weise geblendet oder belästigt werden könnten. Dieses Gutachten dient der Untersuchung der Frage, ob und mit welcher Häufigkeit solche Situationen entstehen können und falls ja, welche Abhilfemöglichkeiten bestehen.

3 Definitionen

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

Es werden folgende Winkel verwendet:

Sonnenhöhenwinkel (vertikaler Sonnenwinkel)	γ
Azimut (horizontaler Sonnenwinkel)	α
Orientierung der Modultischreihen gegen Ost oder West	ν
vertikaler Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts	δ
Neigung der PV-Module gegen Süd	ε
vertikaler Blickwinkel Kraftfahrer - vor ihm liegende Fahrbahn	σ

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

4 Informationen zur Photovoltaik-Anlage

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

- Bebauungsplan Vorentwurf vom 21. 11. 2019
- Modulbelegungsplan bei einer maximalen Belegung
- Modultischquerschnitt bei 20° Modulneigung
- Datenblatt PV-Modul JKM Cheetah 405M-72H-V
- Geländehöhenplan
- Fotos
- Mündliche und Emailinformationen durch Herrn Tilman Rückert, juwi AG

Die Geländehöhen der PV-Anlage, der Straßen und der Gebäude wurden dem Höhenplan bzw. google earth entnommen. Die Entfernungen und horizontalen Winkel wurden mit google earth ermittelt. Der monatliche Sonnenstand für Röckingen (Sonnenhöhe und -azimut) wurde mit der Website www.stadtklima-stuttgart.de bestimmt. Die Berechnung der Winkel des reflektierten Sonnenlichts erfolgte mit eigenen Excel-Programmen.

5 Beschreibung der PV-Anlage Röckingen und topografische Daten

5.1 Die PV-Anlage

Die PV-Anlage wird auf einem bisher landwirtschaftlich genutzten Gelände errichtet, s. Bild 1 im Anhang. Die Grundfläche der PV-Anlage ist rechteckig. Die Gesamtfläche der PV-Anlage beträgt ca. 13,8 ha bei einer maximalen Belegung. Das PV-Anlagengelände steigt von Südwest nach Nordost kontinuierlich von ca. 425 m auf 450 m über Normalnull NN. Östlich der PV-Anlage befindet sich ein Waldstück, wodurch die Anlage aus genau östlicher Richtung, also aus Richtung Opfenried, gegen Einblick abgeschirmt ist.

Es ist geplant, monokristalline Solarmodule des Typs JKM Cheetah 405M-72H-V mit einer Modulleistung von je 405 Wp einzusetzen. Die installierte Leistung liegt bei 15,626 MWp bei einer maximalen Belegung. Die Neigung ε der Module gegen Süd steht noch nicht fest; im Folgenden wird alternativ mit Modulneigungen 20° und 25° gerechnet. Die Module werden auf sogenannten Modultischreihen montiert, deren Länge der verfügbaren Breite der Fläche entspricht. Die Ausrichtung der Modultischreihen erfolgt in Ost-West-Richtung. Die Modulunterkante befindet in einer Höhe von 0,80 m über Geländeoberkante (GOK), die Höhe der Moduloberkante über GOK beträgt 2,87 m. Die Tiefe eines Modultisches beträgt (in Draufsicht gesehen) 5,69 m und der lichte Abstand zwischen zwei Tischreihen 4,60 m. Daraus errechnet sich bei einer maximalen Belegung ein mittlerer Reihenabstand a von $4,60 \text{ m} + 5,69 \text{ m} = 10,29 \text{ m}$.

5.2 Die untersuchten Straßen

5.2.1 St2218

Die St2218 verläuft etwa in Ost-West-Richtung. In Fahrtrichtung West beträgt die Fahrtrichtung am Ortsausgang Wassertrüdingen $\tau = \text{ca. } 290^\circ$, beschreibt dann bis zur Straßenkreuzung nach Opfenried/Röckingen eine langgezogene S-Kurve, dort liegt die Fahrtrichtung bei 257° . Im weiteren Verlauf dreht bis Gerolfingen die Fahrtrichtung wieder nach rechts, am Ortseingang Gerolfingen beträgt die Fahrtrichtung ca. 305° . Die Fahrbahnhöhe der St2218 liegt in diesem Streckenabschnitt bei ca. 420 m bis 427 m. Im gesamten Streckenverlauf ist der Einblick von der Straße auf die PV-Anlage zumindest teilweise gegeben.

5.2.2 AN47

Die AN47 verläuft von Röckingen bis Reichenbach etwa in Nord-Süd-Richtung. Am Ortsausgang von Röckingen beträgt die Fahrtrichtung ca. 180° , dreht in einer langgezogenen S-Kurve in Richtung Südwest zunächst auf 222° und dreht nach der Vorbeifahrt an der PV-Anlage wieder zurück auf 180° . Die Fahrbahnhöhe fällt von ca. 440 m bei Röckingen auf ca. 425 m bei Reichenbach ab. Von Röckingen aus (Fahrtrichtung Süd) ist die PV-Anlage durch das Waldstück zwischen Anlage und Straße bis zur Vorbeifahrt an der Anlage abgeschirmt; von Reichenbach aus (Fahrtrichtung Nord) ist der Einblick auf die PV-Anlage vollständig gegeben.

5.3 Die untersuchten Gebäude (Immissionsorte)

In die Untersuchungen wurden Gebäude in den folgenden Orten bzw. Ortsteilen einbezogen:

	Markierung in Bild 1	Höhe über NN
Gerolfingen	G	434 m
Stahlhöfe	St	448 m
Reichenbach	R	426 m
Schalmühle	S	423 m
Gugelmühle	Gu	423 m
Wassertrüdingen	W	423 m

Ausgewählt wurden die Gebäude, die der PV-Anlage am nächsten liegen.

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

6.1 Blendwirkung

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

onsblendung. Weiterhin differenziert man zwischen **direkter Blendung**, die durch eine Lichtquelle selbst ausgelöst wird, und **indirekter Blendung**, die durch das Reflexbild einer Lichtquelle erzeugt wird.

Die bei Tageslicht am häufigsten auftretende Blendung wird von der Sonne verursacht. Befindet sich die Sonne im zentralen Gesichtsfeld eines Beobachters, tritt Absolutblendung auf, bei der man nicht mehr in der Lage wäre, z.B. ein Kfz sicher zu führen, da im Gesichtsfeld des Autofahrers keine Kontraste mehr erkennbar sind. Dieser sehr gefährlichen Situation entzieht man sich, indem die Sonne gegenüber dem Auge durch eine Sonnenblende bzw. Jalousie oder durch eine Hand abgeschattet wird. Das Aufsetzen einer Sonnenbrille hilft hier kaum, da dadurch nicht nur die Intensität des Sonnenlichtes, sondern auch die Helligkeiten aller anderen Objekte im Gesichtsfeld herabgesetzt werden.

Häufig wird das Licht der Sonne auch durch glänzende Objekte ins Auge eines Betrachters gespiegelt: Wasseroberflächen, Fensterfronten von Gebäuden, verglaste Treibhäuser. Gegenüber der direkten Sonnenblendung ist bei dieser indirekten Blendung die tatsächliche Blendgefahr geringer:

1. Das reflektierte Sonnenlicht hat immer eine geringere Intensität als das direkte Sonnenlicht, es kommt selten zu einer Absolutblendung, sondern meist „nur“ zu Adaptationsblendung; d.h., die Helligkeitskontraste sind zwar verringert und die Wahrnehmung von Objekten wird erschwert, 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 Blendung auftritt, ist sehr stark vom Winkel θ , gebildet von der Blickrichtung eines Beobachters und der Verbindungslinie Auge des Beobachters - blendende Lichtquelle (z.B. Auge des Kraftfahrers zur PV-Anlage) abhängig. **Bei Nacht** nimmt die Blendempfindlichkeit B proportional mit dem reziproken Wert des Winkelquadrats ab: $B \sim 1/\theta^2$. Bei Nacht wird physiologische Blendung deshalb nur in einem Winkelbereich $\theta \pm 30^\circ$, bezogen auf die Blickrichtung, berücksichtigt; Licht aus größeren Winkeln liefert keinen nennenswerten Betrag zur Blendung. **Bei Tageslicht** hat man andere Verhältnisse: Die Gesamthelligkeit ist um mehrere Zehnerpotenzen höher als bei Nacht. Die evtl. blendenden Objekte werden nicht wie bei Nacht gegen eine meist lichtlose Umgebung gesehen, sondern die Umgebung hat ebenfalls eine gewisse Helligkeit. Diese beiden Unterschiede führen dazu, dass tagsüber Blendungseffekte eher selten auftreten. Die reziprok quadratische Abhängigkeit der Blendung vom Winkel θ gilt auch nicht mehr unbedingt; allerdings nimmt auch bei Tageslicht die Blendung deutlich zu, wenn der Blickwinkel θ kleiner wird.

Für die Nacht gibt es klare Anforderungen an die Begrenzung der Blendung, die von leuchtenden Objekten ausgeht. Für die Bewertung von Blend- oder anderen visuellen Störeffekten, die von Bauwerken oder anderen technischen Anlagen bei Tageslicht erzeugt werden, gibt es überhaupt keine Regelwerke oder Vorschriften. Deshalb ist man hier auf Einzelfallbetrachtungen und -entscheidungen angewiesen.

Der Blickwinkel θ ist bei Tageslicht weniger kritisch zu sehen als bei Nacht. Bei Tageslicht liefert störendes Licht aus **Winkeln $\theta > 20^\circ$** keinen merklichen Beitrag zur Blendung und kann außer Betracht bleiben. Störendes Licht aus einem **Winkelbereich $10^\circ < \theta \leq 20^\circ$** kann u.U. eine moderate Blendung erzeugen. I.a. kann man Blendung wie oben beschrieben durch leichtes Zur-Seite-Schauen oder „Ausblenden“ der störenden Lichtquelle vermeiden. Dieser Winkelbereich sollte aber bei einer Blendungsbewertung mit in Betracht gezogen werden. Kritischer sind **Blickwinkel $5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$** , und besonders kritisch Winkel $\theta \leq 5^\circ$, wenn also die störende Lichtquelle direkt im Gesichtsfeld des Beobachters liegt. Ein Kraftfahrer hat nicht mehr die Möglichkeit, diese Lichtquelle „auszublenden“: Er muss den vor ihm liegende Gleiskörper bzw. die Straße und dessen Umgebung beobachten und alle Licht- und sonstigen Signale sowie die Anzeigeeinstrumente im Pkw eindeutig erkennen können. Deshalb kann man in solchen Situationen seinen Blick nicht beliebig zur Seite richten, um einem evtl. vorhandenen Blendreflex auszuweichen.

Bei allen Situationen, in denen evtl. eine Blendgefahr besteht, ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Sonne ebenfalls im Blickfeld des Beobachters befindet und das direkte Sonnenlicht **gleichzeitig** mit dem Blendreflex auf den Beobachter einwirkt.

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

6.2 Störf Wirkung durch den Flimmereffekt und durch Ablenkung

Periodisch oder unregelmäßig an- und abschwellendes Licht, das ins Auge gelangt, wird als Flimmern bezeichnet. Im Verkehrswesen wird Flimmern z.B. durch die periodisch angeordneten Leuchten der Straßen- oder Tunnelbeleuchtung erzeugt. Der Flimmereffekt bei der Vorbeifahrt an einer PV-Anlage entsteht dadurch, dass die PV-Modultische in Reihen mit einem festen, regelmäßigen Abstand voneinander angebracht sind, wodurch es, wenn die Modultischausrichtung und die Fahrtrichtung etwa senkrecht zueinander stehen und die Straße nicht weiter als 100 m von der PV-Anlage entfernt ist, zu einer periodischen Unterbrechung des reflektierten Sonnenlichts, zu „Lichtblitzen“ kommen kann, was als Flimmern wahrgenommen wird. Es ist bekannt, dass **periodisches** Flimmern bei manchen Epileptikern sogar Anfälle auslösen kann (photosensitive Epilepsie).

Bei der PV-Anlage Röckingen verlaufen jedoch St2218 und Modultischreihen parallel zueinander, ein Flimmereffekt kann daher von vornherein ausgeschlossen werden. Die Fahrtrichtung auf der AN47 verläuft teilweise zwar etwa senkrecht zur Modultischausrichtung, aber der kleinste Abstand der Straße der PV-Anlage beträgt 250 m, so dass evtl. Lichtblitze miteinander verschmelzen; Flimmern ist damit ausgeschlossen.

Verkehrsfremde Sehobjekte neben einer Straße können die Aufmerksamkeit eines Kraftfahrers so stark beanspruchen, dass er die vor ihm liegende Fahrbahn - zumin-

dest für Sekunden - nicht mehr mit genügender Sorgfalt beobachtet, es kann zu verkehrgefährdenden Situationen kommen. Die Auffälligkeit hängt ab z.B. von der Größe, der Helligkeit/dem Helligkeitskontrast, der Bewegung oder dem Neuigkeitscharakter des Sehobjektes ab. Die PV-Anlage Röckingen besteht im Wesentlichen aus regelmäßig angeordneten, eher dunklen Solarmodulen und hat zudem eine maximale Bauhöhe von nur 2,87 m über Geländeneiveau. Sie ist ein insgesamt visuell unauffälliges Bauwerk; 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. Mittlerweile wurde eine Vielzahl von PV-Anlagen in Sichtweite zu Straßen errichtet, so dass es Kraftfahrer gewohnt sind, an solchen Anlagen vorbeizufahren. Eine erhöhte Aufmerksamkeit und Ablenkungsgefahr durch die PV-Anlage Röckingen kann daher von vornherein ausgeschlossen werden.

7 Blend- und Störwirkung von sich in Gebäuden aufhaltenden Personen

Lichtimmissionen gehören nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) formal zu den schädlichen Umwelteinwirkungen, wenn sie nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Anwohner herbeizuführen. Weitere Ausführungen hierzu macht das BImSchG jedoch nicht. Die von PV-Freiflächenanlagen verursachte Blend- und Störwirkung von Personen, die sich in Wohn- oder Gewerbegebäuden aufhalten, wird nach den „Hinweisen zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) vom 13. 9. 2012, Anhang 2, vorgenommen (im Folgenden „LAI-Hinweise“ genannt). Die Blend- und Störwirkung = Lichtimmission ist durch die Zeit definiert, in der Sonnenlicht von der PV-Anlage auf die Fensterflächen der betroffenen Gebäude auftrifft. Diese Zeit, damit ist die astronomisch maximal mögliche Zeit von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang gemeint, darf täglich 30 min und im Kalenderjahr 30 Stunden nicht überschreiten.

Die LAI-Hinweise gelten für „schutzwürde Räume“. Dazu gehören

- Wohnräume
- Schlafräume, einschließlich Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten und Bettenräume in Krankenhäusern und Sanatorien
- Unterrichtsräume in Schulen, Hochschulen und ähnlichen Einrichtungen
- Büroräume, Praxisräume, Arbeitsräume, Schulungsräume und ähnliche Arbeitsräume.

Lt. Abschnitt 7e. der LAI-Hinweise sind die Sonne als punktförmig und die Solarmodule als ideal verspiegelt zu betrachten, so dass die Berechnungen gemäß dem Reflexionsgesetz Ausfallswinkel = Einfallswinkel durchgeführt werden können. Tatsächlich wird das Sonnenlicht von den üblicherweise verwendeten Solarmodulen aber auch teilweise gestreut reflektiert. Das führt dazu, dass das Sonnenlicht z.T. spiegelnd (Kernreflex) und z.T. gestreut (Streureflex) reflektiert wird. Der Streureflex kann je nach Entfernung Beobachter - PV-Anlage und Grad der Streuwirkung bis zu 40 min vor dem Kernreflex auftreten und erst bis zu 40 min nach dem Kernreflex verschwinden. Die Intensität des Streureflexes ist aber immer deutlich geringer als

die Intensität des Kernreflexes und erzeugt daher keine nennenswerte Störwirkung. Alle durchzuführenden Berechnungen beziehen sich daher lt. Abschnitt 7e. der LAI-Hinweise nur auf den Kernreflex, die zusätzliche Reflexionszeit durch den Streureflex wird nach den LAI-Hinweisen nicht berücksichtigt.

Sonnenlicht, das unter Sonnenhöhenwinkeln $\gamma \leq 7,5^\circ$ von einer PV-Anlage in Richtung Immissionsort reflektiert wird, wird wegen dessen geringer Intensität und wegen Bewuchs, Bebauung und der zu durchdringenden Atmosphärenschichten in ebenem Gelände nicht berücksichtigt.

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

8.1 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion ins Auge eines Kraftfahrers

8.1.1 Sehbedingungen eines Kraftfahrers

Um die evtl. von der PV-Anlage ausgehende Blendung zu bewerten, ist es zunächst notwendig, die Wahrscheinlichkeit dafür zu ermitteln, dass von der Anlage reflektiertes Licht in die Blickrichtung eines Kraftfahrers gelangt. Ist eine gewisse Wahrscheinlichkeit gegeben, muss die Intensität des reflektierten, ins Auge des Vorbeifahrenden gerichteten Lichts ermittelt werden. Das Blendrisiko insgesamt ergibt sich aus der Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens und der Intensität des ins Auge eines Vorbeifahrenden reflektierten Sonnenlichts.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Blendrisikos kann mithilfe eines so genannten Sonnenstandsdiagramms ermittelt werden. Die Bilder 2 bis 4 zeigen das Sonnenstandsdiagramm für Röckingen in Form eines Polardiagramms. Die roten Linien zeigen den Sonnenstand (Sonnenhöhe γ und Azimut α) für den 15. Tag jedes Monats in Abhängigkeit von der Uhrzeit an. Die Darstellung erfolgt für die Mitteleuropäische Zeit (MEZ) ohne Berücksichtigung der Mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ). Die Uhrzeit ist durch blaue und grüne Punkte gekennzeichnet.

Zunächst muss der im Raum liegende Winkel Blickwinkel θ zwischen Kraftfahrer und PV-Anlage ermittelt werden. θ ergibt sich aus folgender Formel:

$$\cos \theta = \cos \sigma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \psi \quad (1)$$

Die in dieser Formel genannten Winkel müssen gemäß den Sehbedingungen für bestimmte Situationen der Vorbeifahrt von Kraftfahrern an der PV-Anlage ermittelt werden.

Die Berechnungen wurden für die Sehbedingungen eines Lkw-Fahrers durchgeführt, die hinsichtlich einer Sonnenlichtreflexion ins Fahrerauge kritischer anzusehen sind als die Bedingungen für einen Pkw-Fahrer: Die mittlere Augenhöhe eines Lkw-Fahrers beträgt ca. 2,50 m, die des Pkw-Fahrers ca. 1,12 m; deshalb kann eine PV-Anlage vom höher sitzenden Lkw-Fahrer u.U. zeitlich eher und auf größere Entfernungen gesehen werden, wodurch theoretisch die Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer erhöht werden kann. Es kann angenommen werden, dass der Fahrer bei einer Fahrt auf einer Straße normalerweise auf einen Punkt auf der Fahrbahn blickt, der etwa 50 m vor ihm liegt. Daraus ergibt sich mit der mittleren Augenhöhe eines Lkw-

Fahrers h_F von 2,50 m ein vertikaler Winkel σ von ca. $-2,9^\circ$ (Blick leicht nach unten). Dieser Winkel σ wurde bei den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt. Die Höhe des Lkw-Fahrers h_F über PV-Anlagengelände beträgt $2,50\text{ m} + 2,56\text{ m}$ (Moduloberkante) $+ 5\text{ m}$ (Differenz der Geländehöhen) = ca. 10 m .

8.1.2 Auswertung mittels des Sonnenstandsdiagramms

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

Damit Sonnenlicht in Richtung Kraftfahrerauge reflektiert werden kann, muss der vertikale Blickwinkel des Kraftfahrerauges λ dem vertikalen Winkel des von den Solarmodulen reflektierten Lichts δ entsprechen: $\lambda = -\delta$ (wenn λ abwärts gerichtet ist, muss δ aufwärts gerichtet sein und umgekehrt).

Für bestimmte Punkte der Annäherung eines Kfz an die bzw. Vorbeifahrt an der PV-Anlage werden nun mittels google earth die Winkel τ , α , ψ bestimmt, dann wird nach obiger Formel (1) der Winkel θ berechnet. Mit den weiteren Parametern Neigung der Module $\varepsilon = 23^\circ$ bis 26° nach Süd und dem vertikalen Winkel λ werden dann die trigonometrischen Berechnungen zur Ermittlung des Sonnenazimuts α und der vertikalen Sonnenhöhenwinkel γ durchgeführt, unter denen das Sonnenlicht auf die PV-Module fallen müsste, damit das reflektierte Licht ins Auge eines Kraftfahrers fallen kann.

Die Ergebnisse der Berechnungen für α und γ werden in das Sonnenstandsdiagramm für Röckingen eingetragen. Werden die Berechnungen für einen Punkt der PV-Fläche bei der Vorbeifahrt auf einer Straße berechnet, bilden die ermittelten α/γ -Werte für die Sonnenhöhenwinkel Polygone, im Folgenden γ -Kurven genannt. Werden die Berechnungen für die gesamte Fläche oder eine Teilfläche der PV-Anlage von einem festen Beobachterstandort aus durchgeführt, stellen die ermittelten α/γ -Werte Flächen in Form von geschlossenen Polygonzügen dar, die im Folgenden als γ -Flächen bezeichnet werden. Wenn die Berechnungen aber nur für einen Punkt der PV-Fläche von nur einem Beobachterstandort aus durchgeführt, ergibt sich als Ergebnis auch nur ein α/γ -Punkt im Sonnenstandsdiagramm. Haben diese γ -Kurven, γ -Flächen oder der α/γ -Punkt Schnittpunkte mit den roten Sonnenstandslinien, fällt Sonnenlicht ins Auge eines Kraftfahrers; die dazugehörigen Jahres- und Tageszeiten können aus dem Polardiagramm abgelesen werden. Bei fehlenden Schnittpunkten ist keine Sonnenlichtreflexion zum Kraftfahrer möglich.

Berücksichtigt wurden alle Blickwinkel Kraftfahrer - PV-Anlage $\theta \leq 20^\circ$, weil nach Abschnitt 6.1 nur in diesem Winkelbereich reflektiertes Sonnenlicht störende Blendung erzeugen kann.

8.2 Ergebnisse

8.2.1 St2218

Die St2218 führt im Süden an der PV-Anlage vorbei. In Fahrtrichtung Westen ist der Blickwinkel θ eines Kraftfahrers zur PV-Anlage nur zwischen den Markierungen 1 bis 3 kleiner als 20° . In Fahrtrichtung Osten ist der Winkel θ für den gesamten interessierenden Streckenabschnitt größer als 20° . Nach Abschnitt 6.1 liefert störendes Licht aus Winkeln $\theta > 20^\circ$ keinen merklichen Beitrag zur Blendung und kann außer Betracht bleiben. Demnach ist die Sonnenlichtreflexion insgesamt nur für den Streckenabschnitt von Markierung 1 bis 3 in Fahrtrichtung Westen zu berechnen. Wegen des Waldstücks östlich der Anlage ist jedoch nur die südwestliche Ecke der PV-Anlage für einen in Richtung West fahrenden Kraftfahrer einsehbar. Deshalb genügt es, die Sonnenlichtreflexion für den hinsichtlich Blendung kritischsten Punkt der PV-Anlage zu berechnen; dieser Punkt ist in Bild 1 durch einen Stern gekennzeichnet. Die für diese Sehbedingungen ermittelten γ -Kurven sind in Bild 2 in blauer bzw. grüner Farbe für die Modulneigungen $\varepsilon = 20^\circ$ bzw. 25° eingezeichnet. Beide Kurven haben Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, Sonnenlicht kann etwa in der zweiten März- und Septemberhälfte je nach Modulneigung gegen 17.45 Uhr bzw. 18 Uhr MEZ, etwa 30 min bis 40 min vor Sonnenuntergang, von der PV-Anlage zum Kraftfahrer gelenkt werden.

Die Tatsache, dass zu bestimmten Zeiten evtl. Sonnenlicht von der PV-Anlage zu einem Kraftfahrer gelenkt werden kann, ist aber nicht gleichbedeutend damit, dass der Kraftfahrer auch geblendet wird. Um dies festzustellen, muss in einem weiteren Schritt das Verhältnis $V = \text{Beleuchtungsstärke (Intensität) des reflektierten Sonnenlichts } E_R \text{ zur Beleuchtungsstärke des direkten Sonnenlichts } E_D = E_R/E_D$ berechnet werden. V berechnet sich aus

$$V = E_R/E_D = \rho \cdot f_S \cdot f_P \cdot f_W \cdot f_T$$

mit

ρ : Reflexionsgrad der PV-Module beim jeweiligen Einfallswinkel des Sonnenlichts auf einem Modul. ρ beträgt in Röckingen 0,73.

f_S : Die Sonnenscheibe hat einen von einem Beobachter gesehenen Winkeldurchmesser von ca. $0,5^\circ$. Ist die von einem Kraftfahrer gesehene Winkelhöhe der PV-Anlage $\leq 0,5^\circ$, kann nicht die ganze Sonnenscheibe auf den Modulen abgebildet werden; deshalb ist die Intensität des reflektierten Sonnenlichts um das Verhältnis der Teilfläche der Sonnenscheibe auf der Moduloberfläche/gesamte Fläche der Sonnenscheibe = f_S reduziert.

In Blickrichtung West eines Kraftfahrers zur südwestlichen Ecke des PV-Geländes steigt das PV-Gelände nur von 427 m bis 429 m an, ist also in dieser Blickrichtung fast eben. Deshalb und wegen der relativ großen Entfernung von ca. 2000 m sieht der Kraftfahrer die PV-Anlage nur unter einem extrem flachen vertikalen Winkel von ca. $0,1^\circ$. Daraus errechnet sich ein f_S von 0,263.

f_P : Sonnenlicht kann nur von den Modulen selbst, aber natürlich nicht von den Lücken (freien Gängen) zwischen den Modultischreihen reflektiert werden. Dadurch reduziert sich die Intensität des reflektierten Sonnenlichts weiter um

das Verhältnis Modulfläche/Gesamtfläche der Anlage = f_p . Diese Reduzierung findet nur statt, wenn die Differenz des horizontalen Blickwinkels des Beobachters zur PV-Anlage τ und der Modultischreihen α nicht größer als 10° ist.

Aus den Daten von Abschnitt 5.1 ergibt sich für f_p ein Wert von 0,553.

f_T : Die Oberflächen von PV-Modulen sind nicht ideal spiegelnd, sondern mit einer leichten Struktur versehen, die für eine höhere Lichtabsorption 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 $\varepsilon = 20^\circ$ bzw. 25° geneigt und in Ost-West-Richtung ($\nu = 0^\circ$) 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 dem zugehörigen Reflexionsgrad entsprechende Anteil von Licht in die durch das Reflexionsgesetz vorbestimmte Richtung reflektiert wird, sondern ein geringerer Anteil. Befindet sich die PV-Anlage in größerer Entfernung als 500 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. Die Verringerung der Intensität des reflektierten Sonnenlichts infolge dieser Streu- und Trübungseffekte wird durch den Faktor f_T beschrieben.

Der Faktor ist bei der in Röckingen in Frage kommenden Entfernung Beobachter-PV-Anlage von ca. 2000 m erfahrungsgemäß mit 0,7 anzusetzen.

Damit ergibt sich $V = 0,73 \cdot 0,263 \cdot 0,553 \cdot 0,7 = 0,074$.

Die Beleuchtungsstärke des von der PV-Anlage reflektierten Sonnenlichts beträgt nur ca. 7 % der Beleuchtungsstärke des direkten Sonnenlichts, das ja **gleichzeitig** und aus fast der gleichen Richtung auf den Kraftfahrer einwirkt; die Winkeldifferenz zwischen Sonne und dem Sonnenreflex auf der PV-Anlage beträgt etwa 8° . Die Beleuchtungsstärke des direkten Sonnenlichts beträgt 30 min bis 40 min vor Sonnenuntergang ca. 7000 lx bis 9000 lx; 7 % davon sind 490 lx bis 630 lx. Die Beleuchtungsstärke des direkten Sonnenlichts 15 min vor Sonnenuntergang liegt bei 700 lx bis 1500 lx. Die Beleuchtungsstärke des von der PV-Anlage reflektierten Sonnenlichts liegt also in der Größenordnung des direkten Sonnenlichts, 10 min bis 15 min vor Sonnenuntergang. Bekanntlich kann man kurz vor Sonnenuntergang problemlos in die Sonne schauen ohne geblendet zu werden. Insgesamt ist festzustellen, dass ein in Fahrtrichtung West fahrender Kraftfahrer durch die PV-Anlage nicht geblendet werden kann, sondern allenfalls durch das direkte Sonnenlicht.

Fazit: Bei Fahrt auf der St2218 tritt keine Blendung eines Kraftfahrers durch die PV-Anlage auf.

8.2.2 AN47

Wie in Abschnitt 5.2.2 ausgeführt, ist in Fahrtrichtung Süd die PV-Anlage durch das Waldstück zwischen Anlage und Straße bis zur Vorbeifahrt an der Anlage abgescrimt, diese Fahrtrichtung braucht daher nicht untersucht zu werden.

Der Blickwinkel θ eines Kraftfahrers zur PV-Anlage liegt nur in dem Abschnitt von Markierung 4 bis Markierung 5 in Bild 1 im Bereich $\theta \leq 20^\circ$, und zwar auch nur für die unmittelbare Umgebung des südöstlichen Eckpunkts der Anlage. In Bild 2 sind auch die γ -Kurven für die Fahrt auf der AN47 in Richtung Nord in brauner und schwarzer Farbe für die Modulneigungen 20° und 25° eingezeichnet, berechnet für den südöstlichen Eckpunkt der Anlage. Beide γ -Kurven liegen oberhalb der Sonnenstandslinien und haben keine Schnittpunkte mit diesen. Reflektiertes Sonnenlicht kann das Kraftfahrerauge nicht erreichen, Blendung ist nicht möglich. Die Lage der γ -Kurven oberhalb der Sonnenstandslinien gibt die Tatsache wieder, dass auf der nördlichen Erdhalbkugel die Sonne nicht aus nördlichen Richtungen scheint und das Sonnenlicht daher nicht in Richtung Süd, d.h. ins Auge eines in Richtung Nord blickenden Kraftfahrers, reflektiert werden kann.

Fazit: Auch bei der Fahrt auf der AN47 kann ein Kraftfahrer durch die PV-Anlage nicht geblendet werden.

9 Zeitliche Wahrscheinlichkeit der Sonnenlichtreflexion in Richtung Gebäude

9.1 Geometrische Bedingungen

Um die evtl. von der PV-Anlage ausgehende Störf Wirkung für Anwohner/Beschäftigte in Gewerbegebäuden zu bewerten, ist es zunächst notwendig, die zeitliche Wahrscheinlichkeit dafür zu ermitteln, dass von der PV-Anlage reflektiertes Licht in die Fensterflächen bzw. die dahinterliegenden Räume der blendgefährdeten Gebäude gelangt. Diese Wahrscheinlichkeit kann ebenfalls mit dem Sonnenstandsdiagramm für Röckingen ermittelt werden.

Für die zu untersuchenden Immissionsorte wurden die horizontalen und vertikalen Blickwinkel Anwohner - PV-Anlage ψ und λ ermittelt und daraus die horizontalen Sonnenwinkel α und die vertikalen Sonnenhöhenwinkel γ berechnet, unter denen das Sonnenlicht auf die PV-Module treffen müsste, damit es die Fensterflächen eines Wohnhauses oder Gewerbegebäudes gelangen könnte.

Da keine Fotos der einzelnen Immissionsorte vorliegen, wurde angenommen, dass die dortigen Gebäude höchstens zweigeschossig sind; dies ist als „worst case-Szenario zu betrachten, da die Wahrscheinlichkeit und Dauer der Sonnenlichtreflexion in Richtung von Gebäuden mit der Fensterhöhe zunimmt.

Die Immissionsorte sind in Abschnitt 5.3 zusammengestellt. Die Immissionsorte Schmalzmühle (Markierung S), Reichenbach (Markierung R) und Stahlhöfe (Markie-

zung St) liegen südlich der PV-Anlage. Nach den Aussagen in Abschnitt 8.2.2 kann zu diesen Immissionsorten kein Sonnenlicht reflektiert werden, da die Sonne nicht aus nördlichen Richtungen scheint. Um diese Aussage abzusichern, wurde für diese Immissionsorte die im zweiten Absatz genannten Winkel α und γ für den Mittelpunkt der PV-Anlage berechnet. Nur für die Immissionsorte Gerolfingen und Gugelmühle wurden die Winkel α und γ für die komplette PV-Fläche und für Wassertrüdingen für eine Teilfläche der PV-Anlage (von Wassertrüdingen aus ist nur der südliche Teil der Anlage sichtbar) ermittelt.

Wie bereits ausgeführt, wird Sonnenlicht, das unter Winkeln $\gamma \leq 7,5^\circ$ von der PV-Anlage in Richtung Fensterflächen reflektiert wird, wegen dessen extrem geringer Intensität nicht berücksichtigt. Der Winkelbereich $0^\circ \leq \gamma \leq 7,5^\circ$ ist in den Polardigrammen der Bilder 3 und 4 rot schraffiert dargestellt.

9.2 Berechnungsergebnisse

Die γ -Flächen bzw. γ -Punkte für alle Immissionsorte sind in Bild 3 eingezeichnet.

9.2.1 Reichenbach, Schmalzmühle, Stahlhöfe

Die errechneten α/γ -Werte für diese drei Immissionsorte liegen oberhalb der Sonnenstandslinien. Damit wird bestätigt, dass zu diesen drei Orten kein Sonnenlicht von der PV-Anlage reflektiert werden kann, weil die Sonne nicht aus nördlichen Richtungen nach Süden scheint.

9.2.2 Gerolfingen

Die PV-Anlage wird von Gerolfingen aus wegen der relativ großen Entfernung (ca. 2000 m) vertikal stark verkürzt, nur als schmaler horizontaler Streifen, wahrgenommen. Deshalb ist die berechnete γ -Fläche so schmal, dass sie in der Grafik in Bild 3 wegen der notwendigen Strichdicke de facto nur als Linie erscheint. Die γ -Fläche liegt unterhalb der Sonnenstandslinien, sogar außerhalb des Polardigramms. Wenn γ -Flächen unterhalb der Sonnenstandslinien liegen, kann rechnerisch nur bei negativen Sonnenständen (die Sonne steht unterhalb des Horizonts) Sonnenlicht in die Fensterflächen reflektiert werden. Dieser Sachverhalt gibt die Tatsache wieder, dass man vom Blick aus einem der betroffenen Fenster überwiegend nur die Modulrückseiten sieht und das Sonnenlicht immer über die Fenster hinweg reflektiert wird. Auch zu diesem Immissionsort kann von der PV-Anlage kein Sonnenlicht reflektiert werden.

9.2.3 Gugelmühle, Wassertrüdingen

Auch die γ -Flächen dieser Immissionsorte sind wegen der großen Entfernung zur PV-Anlage in Bild 3 nur als Linien erkennbar. In Bild 4 ist der linke Teil des Diagramms von Bild 3 vergrößert dargestellt; selbst in dieser Ansicht wirken die γ -Flächen noch linienhaft. Die γ -Flächen beider Immissionsorte haben für beide Modulneigungen Schnittpunkte mit den Sonnenstandslinien, so dass Sonnenlicht zu den Immissionsorten reflektiert werden kann. In Wassertrüdingen erreicht der Sonnenhöhenwinkel γ

nur höchstens $3,5^\circ$, die γ -Fläche liegt im schraffierten Bereich in Bild 3 bzw. 4 und erzeugt deshalb gemäß nach Abschnitt 7 keine zu berücksichtigende Lichtimmission. In Gugelmühle erreicht γ jedoch Werte bis zu 20° ; Sonnenlicht wird im Juni/Juli zwischen 17.30 Uhr und 18.30 Uhr zu diesem Immissionsort gelenkt.

Die Berechnungen der maximalen täglichen und jährlichen Reflexionszeit wurde für die Gugelmühle, aber auch für Wassertrüdingen trotz des sehr kleinen Sonnenhöhenwinkels γ durchgeführt und erbrachte folgende Resultate:

	Reflexions-tage/Jahr	Maximale tägliche Reflexionszeit	Mittlere tägliche Reflexionszeit	Astronomisch mögliche jährliche Reflexionszeit im Kalenderjahr
Wassertrüdingen	10	ca. 2 min	0,73 min	$10 \cdot 0,73$ = 7,3 Minuten
Gugelmühle	54	ca. 2 min	1,55 min	$54 \cdot 1,55$ = 1,4 Stunden

Es wurde auch überprüft, ob die Ergebnisse sich ändern, wenn die Berechnungen nicht mit zweistöckigen, sondern z.B. mit vierstöckigen Gebäuden durchgeführt werden. Die in den Bildern 3 und 4 wiedergegebenen α - und γ -Winkel ändern sich dann nur um wenige Zehntelgrade, obige Ergebnisse bleiben vollumfänglich erhalten.

Fazit: Die maximale tägliche und die jährliche Reflexionszeit unterschreiten für beide Immissionsorte bei weitem die Anforderungen der LAI-Hinweise von höchstens 30 min täglich bzw. 30 Stunden pro Kalenderjahr. Die „30 Stunden-/30 Minuten“-Regel der LAI-Hinweise wird insgesamt eingehalten.

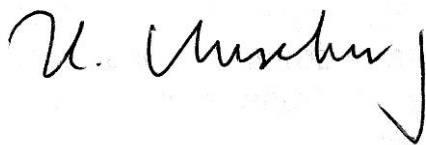
10 Zusammenfassung

Bei Fahrt auf der St2218 kann in Fahrtrichtung Ost unter blendkritischen Winkeln kein von der PV-Anlage reflektiertes Sonnenlicht das Auge eines Kraftfahrers erreichen. In Fahrtrichtung West kann im Abschnitt von Markierung A bis C zwar Sonnenlicht zum Kraftfahrer reflektiert werden, dessen Intensität ist aber so gering, dass damit keine Kraftfahrerblendung verbunden ist. Bei Fahrt auf der AN47 kann kein Sonnenlicht das Kraftfahrerauge erreichen. Insgesamt kann ein an der PV-Anlage Röckingen vorbeifahrender Kraftfahrer durch diese Anlage nicht geblendet werden. Diese Ergebnisse gelten sowohl für die Modulneigung gegen Süd von 20° als auch von 25°.

Ein zusätzliches Störrisiko durch einen Flimmereffekt oder durch erhöhte Auffälligkeit ist ebenfalls nicht gegeben.

Die evtl. von der PV-Anlage ausgehenden Lichtemissionen wurden für sechs Orte bzw. Ortsteile in der Umgebung der PV-Anlage berechnet. Zu vier Immissionsorten wird von der PV-Anlage kein Sonnenlicht reflektiert, bei zwei weiteren Immissionsorten werden die Anforderungen der „Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) vom 13. 9. 2012 (LAI-Hinweise) bei weitem unterschritten. Die „30 Stunden-/30 Minuten“-Regel der LAI-Hinweise wird insgesamt eingehalten. Die Ergebnisse sind unabhängig von der Zahl der Stockwerke bzw. der Fensterhöhe der Gebäude der untersuchten Immissionsorte und gelten ebenfalls für Modulneigungen von 20° und 25°.

Von daher ist gegen die Errichtung der PV-Freiflächenanlage bei Röckingen nichts einzuwenden.



Dieses Gutachten wurde nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt.

Anhang

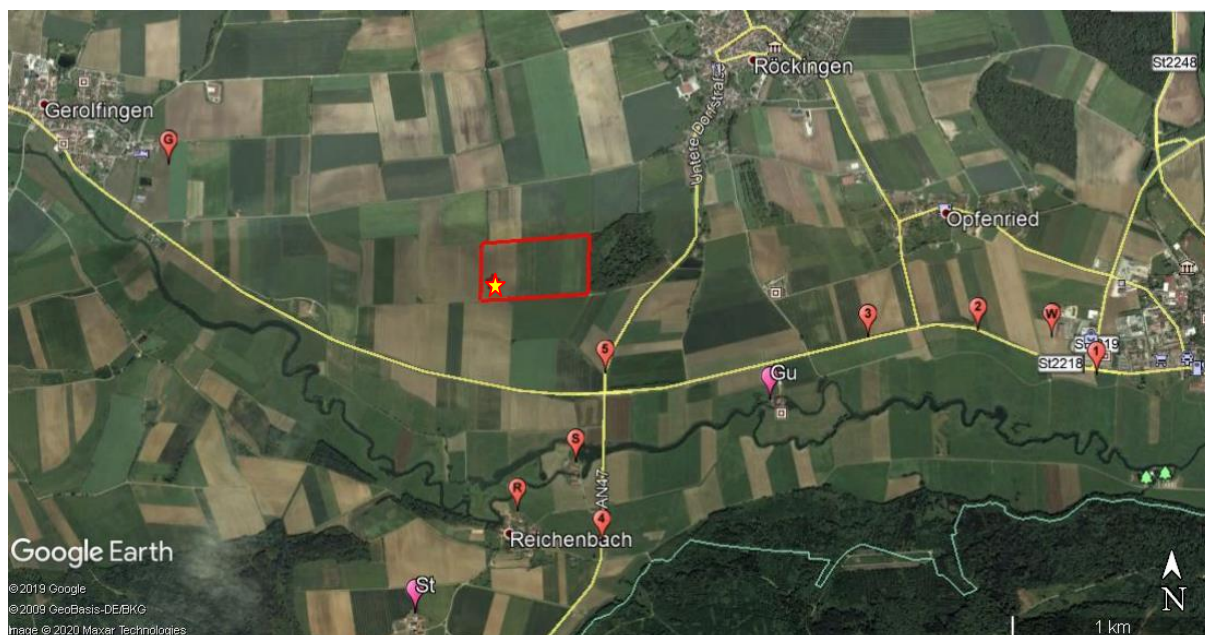


Bild 1: Die geplante PV-Anlage Röckingen

- ★: kritischster Punkt der PV-Anlage hinsichtlich Fahrt auf der St2218 in Richtung Westen

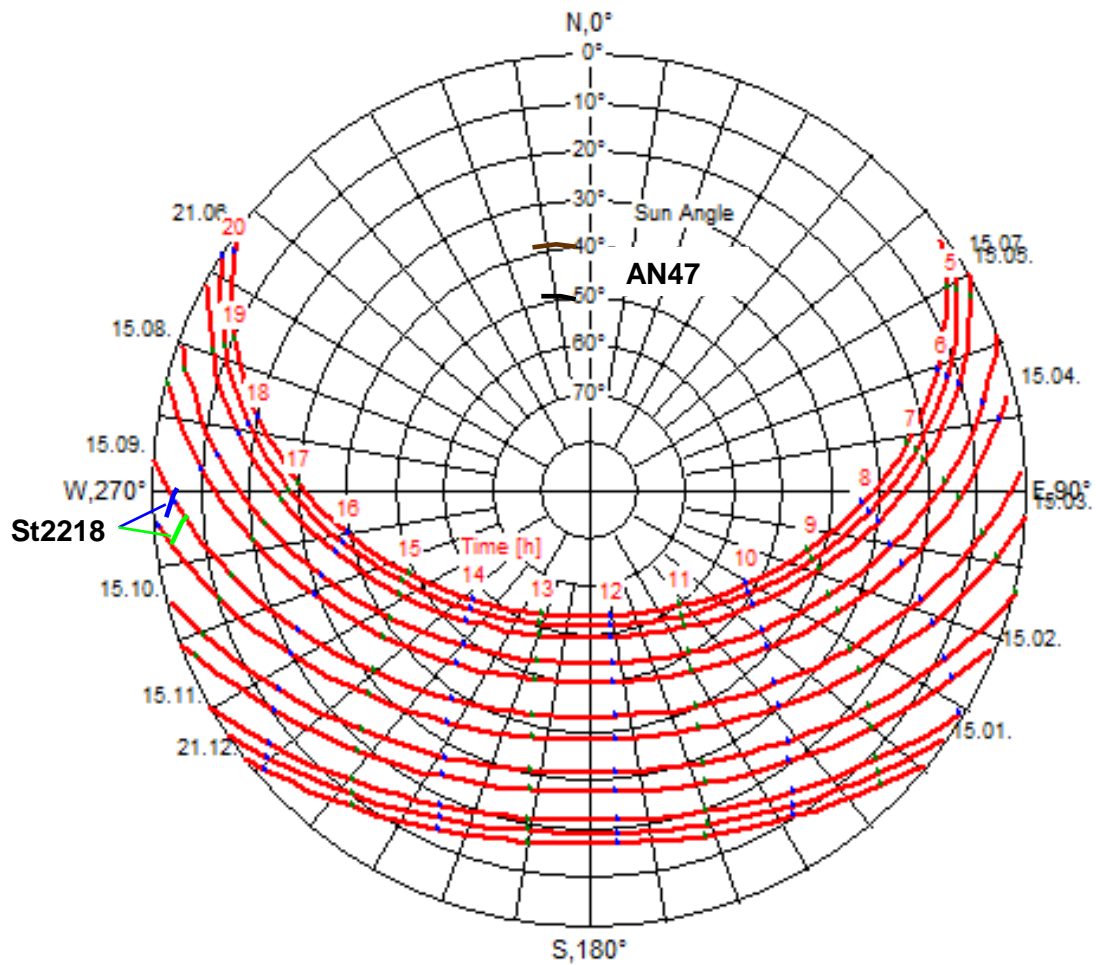


Bild 2: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Röckingen mit γ -Kurven zur Bewertung der Vorbeifahrt eines Kfz an der PV-Anlage

Quelle des Sonnenstandsdiagramms: www.stadtklima-stuttgart.de

St2218, Fahrtrichtung West, Blick zu Markierung der PV-Anlage

blau: Modulneigung $\varepsilon = 20^\circ$

grün: Modulneigung $\varepsilon = 25^\circ$

AN47, Fahrtrichtung Nord

braun: Modulneigung $\varepsilon = 20^\circ$

schwarz: Modulneigung $\varepsilon = 25^\circ$

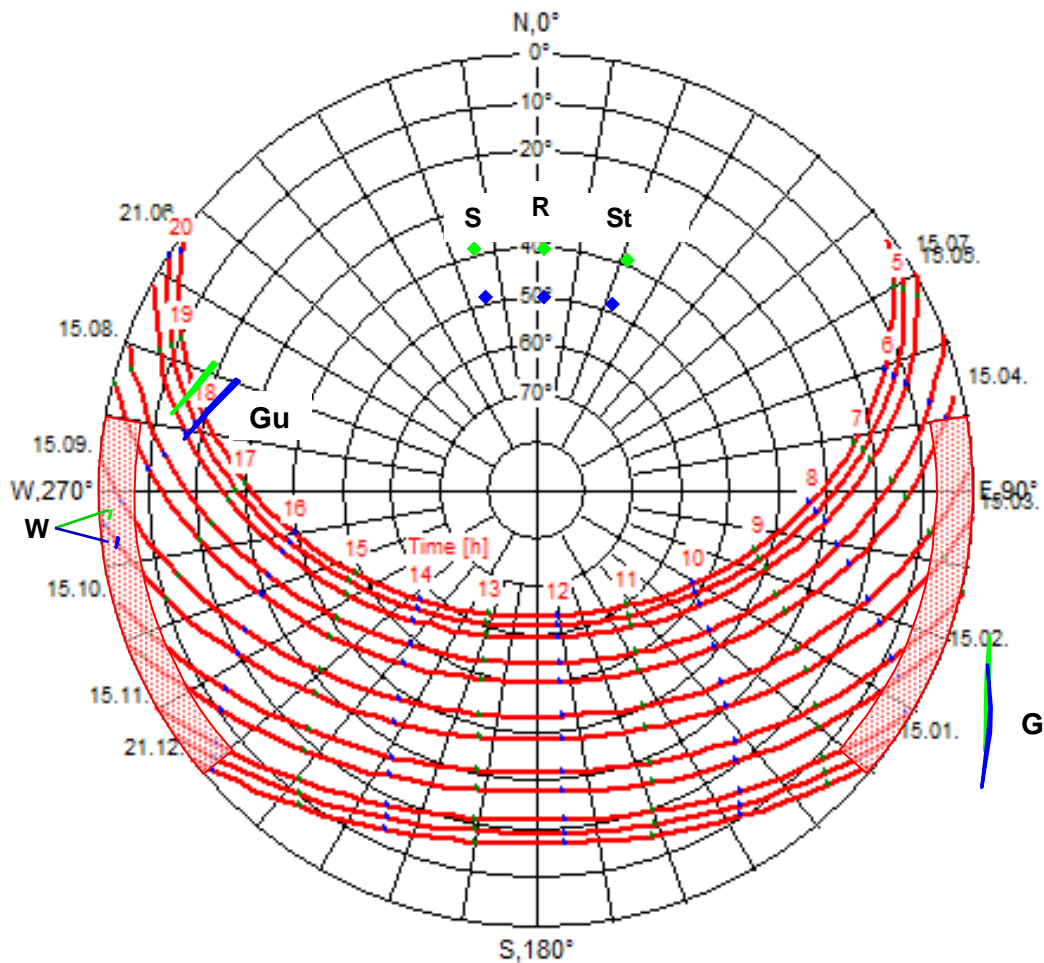


Bild 3: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Röckingen mit γ -Flächen zur Bewertung der Reflexionszeiten zu 6 Immissionsorten

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

grün: Modulneigung $\epsilon = 20^\circ$

Blau: Modulneigung $\epsilon = 25^\circ$

G: Gerolfingen

St: Stahlhöfe

R: Reichenbach

S: Schmalzmühle

Gu: Gugelmühle

W: Wassertrüdingen

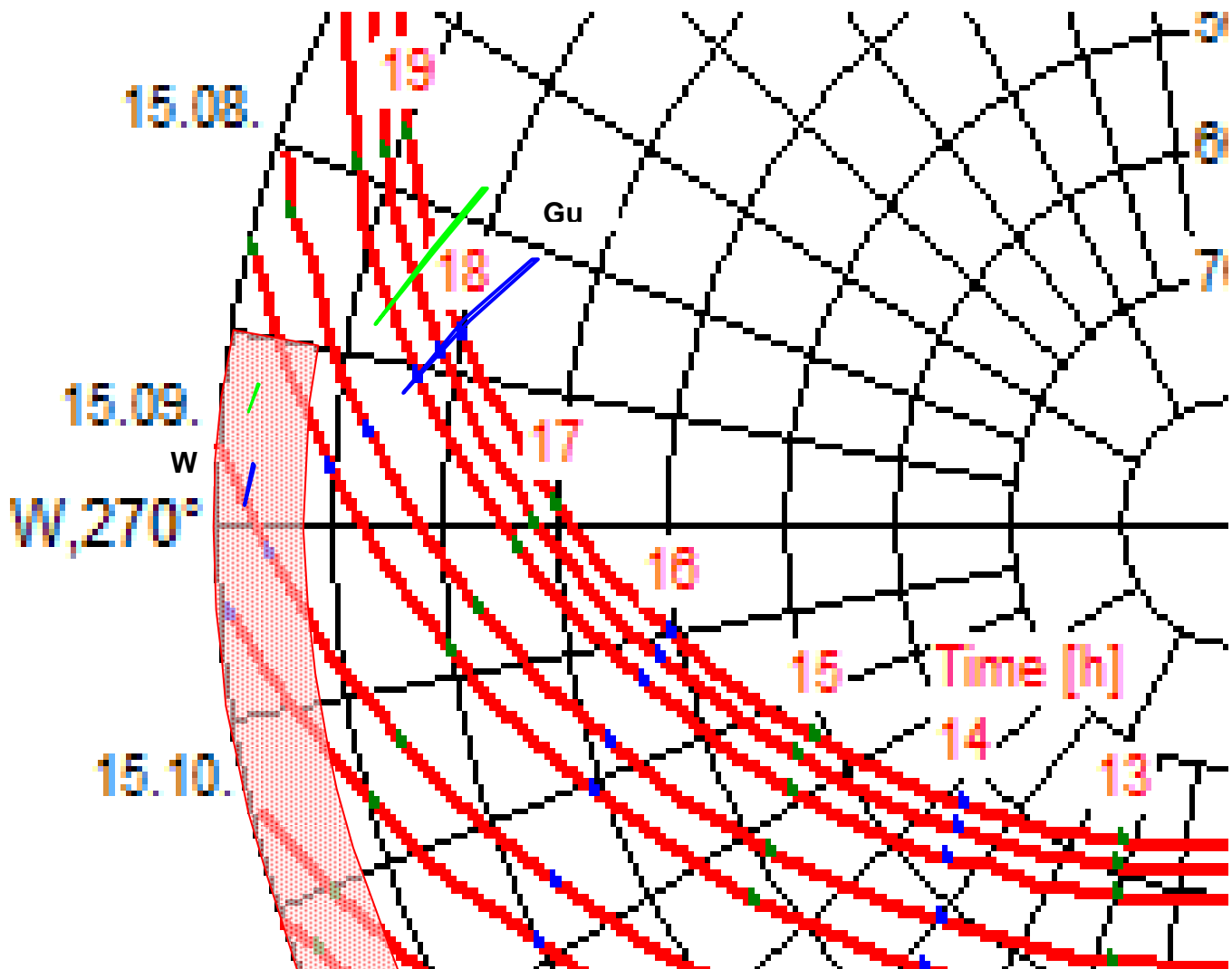


Bild 4: Ausschnitt aus Bild 3: Monatlicher Sonnenstand (Sonnenhöhe und -richtung) für Röckingen mit γ -Flächen zur Bewertung der Reflexionszeiten zu 2 Immissionsarten

grün: Modulneigung $\varepsilon = 20^\circ$

Blau: Modulneigung $\varepsilon = 25^\circ$

Gu: Gugelmühle

W: Wassertrüdingen