

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 69 (2011)
Heft: 366

Artikel: Wie werden Solarpanels optimal ausgerichtet? : Die Beleuchtungsdauer bei Solaranlagen
Autor: Laager, Erich
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-897229>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wie werden Solarpanels optimal ausgerichtet?

Die Beleuchtungsdauer bei Solaranlagen

■ Von Erich Laager

Bei der Planung einer Solaranlage möchte man wissen, wann und wie lange die Sonne auf die Panelfläche scheint. Astronomische Überlegungen und Berechnungen bieten da wertvolle Hilfe. Der Beitrag zeigt auch, wie durch vorgängige Überlegungen kleine, aber wesentliche Verbesserungen realisiert werden konnten.

Der verstorbene Sonnenuhren-Spezialist Prof. HEINZ SCHILT aus Biel verfasste im Jahr 1985 ein kleines Büchlein mit dem Titel «Ebene Sonnenuhren verstehen und planen, beschreiben und zeichnen». Darin beschreibt er zuerst die Konstruktion von Uhren auf einer horizontal liegenden Ebene. Im folgenden Kapitel «Sonnenuhren auf Ebenen beliebiger Lage» findet man die entscheidende, weiterführende Idee:

«Um eine Sonnenuhr auf der Ebene E zu konstruieren suchen wir auf der Erdkugel einen Ort H, dessen Zenitrichtung parallel ist zum Lot auf die Ebene E. Die Horizontalebene in H ist nach dieser Bestimmung parallel zur Ebene E. Somit muss die horizontale Sonnenuhr in H verwandt sein mit der Sonnenuhr auf der Ebene E.»

Was heisst «verwandt sein»? Beide Ebenen – die Ebene E in beliebiger Lage und die Horizontalebene am Ort H – werden gleichzeitig von der Sonne beleuchtet, sie haben also zur gleichen Zeit «Sonnenaufgang» und «Sonnenuntergang». Ein senkrechter Stab in beiden Ebenen zeichnet denselben Schattenverlauf.

Ich verwende in diesem Beitrag die folgenden «privat definierten» Begriffe:

- Mit Panelort (P) bezeichne ich den Standort der Solaranlage.
- Der Horizontort (H) ist derjenige Ort auf der Erdoberfläche, wo die Horizontebene parallel liegt zum Solar-Panel bei P.

- Das Panelazimut ist das Azimut der Panel-Falllinie (Abbildung 1).

Wann hat mein Solarpanel Sonne?

Mit dieser Frage gelangte vor drei Jahren ein Bekannter an mich, der in Schwarzenburg eine recht grosse Fotovoltaik-Anlage plante. Er wusste natürlich, dass er mir die Neigung

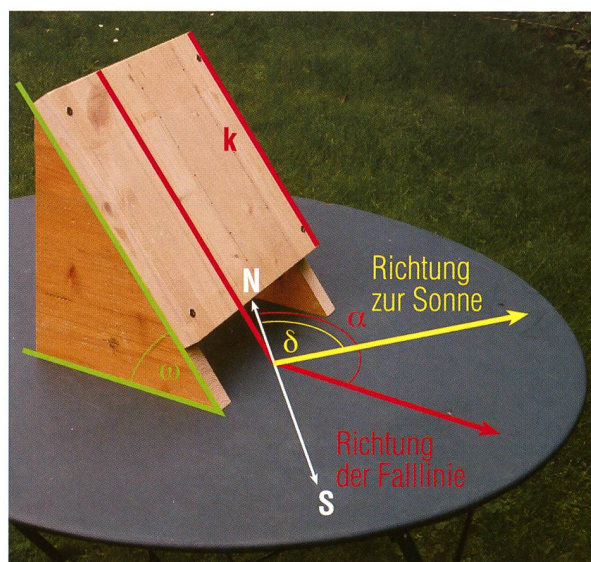


Abbildung 1: Eine Ebene in beliebiger Lage mit den wichtigen Winkeln. Eine Kugel, die ungestört über das Brett nach unten rollt beschreibt dessen Falllinie. Die Verlängerung dieser Linie auf der horizontalen Fläche gibt die Richtung des Brettes an, ich nenne diese «Panelazimut» (α). – Bei einem rechteckigen Panel ist die Falllinie parallel zu einer Kante (k) des Panels. Die Lage der Ebene wird durch die beiden Winkel α und ω bestimmt. Mit dem Azimut-Messgerät (Abbildung 4) bestimmt man die Differenz zwischen α und dem Sonnenazimut δ zu einer bestimmten Zeit. So erhält man den Wert für α .

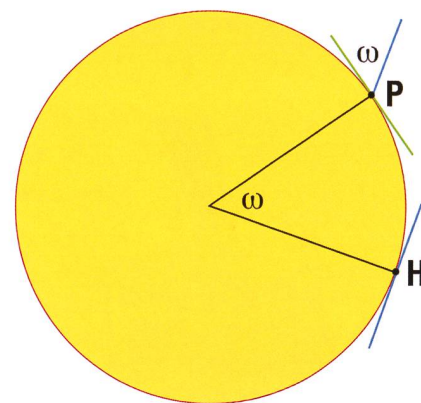


Abbildung 2: Die beiden Orte P (Panelort) und H (Horizontort) liegen auf einem Grosskreis (rot) auf der Erdoberfläche. Dieser liegt schief, er ist also kein Meridiankreis! (Man vergleiche mit Abbildung 3.) Bei P ist die Horizontebene grün, die geneigte Panelfläche blau gezeichnet. Die Neigung ist definiert durch den Winkel ω . Verschiebt man die Paneebene parallel (ohne zu drehen und zu kippen) entlang des Grosskreises um ω Grad, erreicht man den Punkt H. Dort ist die Horizontebene parallel zur Panelfläche bei P.

und die Orientierung der Panelfläche angeben musste. Es handelte sich also wiederum um eine «Ebene in beliebiger Lage» und ich erinnerte mich sogleich an die Idee von HEINZ SCHILT.

Ich verschiebe in Gedanken das Solarpanel an denjenigen Ort H auf der Erde, wo es eine horizontale Lage hat. Dies erreiche ich durch eine Parallelverschiebung der Paneebene, und zwar bei P in Richtung des Panelazimuts α entlang eines Grosskreises um so viele Grad, wie die Neigung der Panelfläche beträgt (Abbildung 2). In meinem Astro-Simulationsprogramm wähle ich diesen Ort H aus und schaue nach, zu welcher Zeit an bestimmten Tagen die Sonne dort auf- und untergeht. Die Zeiten notiere ich in Universalzeit (UT), damit ich das Umrechnen aus anderen Zeitzonen vermeiden kann. Dieselben Auf- und Untergangszeiten gelten prinzipiell auch für die

Besonnung der Panelflächen, allerdings mit Einschränkungen – doch darauf werde ich später eingehen.

Wo liegt der «Panelort»?

Zum Bestimmen dieses Ortes brauche ich vier Angaben:

- Die geographische Länge und Breite des Ortes P (in Schwarzenburg)
- Die Neigung und das Azimut der Panelfläche (Abbildung 1).

Im Kasten auf Seite 12 findet man die Anleitung zum Berechnen des Ortes H (geogr. Länge und Breite) und der Richtung des Panelazimuts bei H. Dazu wird ein Dreieck auf der Erdoberfläche benützt (sphärisches Dreieck), welches mit Hilfe der Abbildung 3 erklärt wird.

Die Seitenlängen (Teile von Grosskreisen) werden im Winkelmass angegeben. Dieses entspricht dem zugehörigen Zentriwinkel in der Erdmitte. (Beispiel: Ein Bogen vom Äquator zum Pol misst 90° .) Ist $a > 180^\circ$, liegt das sphärische Dreieck westlich des gelben Grosskreises. β wird negativ, die Schlussresultate werden jedoch automatisch richtig.

Abbildung 3 und das Zahlenbeispiel gelten für die erwähnte Solaranlage in Schwarzenburg.

Im Spezialfall $\alpha = 180^\circ$ wird $\lambda = 0$, $\mu = \lambda$, $a = b + c$, $\eta = \phi - \omega$, $\chi = 180^\circ$. Hier entfallen alle weiteren Berechnungen!

Das Messgerät zur Bestimmung des Panelazimuts

Es ist ein einfaches Gerät, welches ich beim Bau von Sonnenuhren zur Bestimmung des Wandazimutes verwendet habe (Abbildung 4). Das Prinzip ist, diese Richtung mit Hilfe der Sonne zu bestimmen, was genauer und zuverlässiger ist als die Verwendung eines Kompasses, da die magnetische Deklination am Ort zu wenig genau bekannt ist. Abbildung 5 zeigt das Beispiel einer Messung: Die Richtung der Wandnormalen liegt 30° westlich der Richtung zur Sonne. Das Azimut der Wandnormalen ist somit 30° grösser als das Azimut der Sonne zur Zeit der Messung. Solche Messungen wiederholt man einige Male, wobei der Winkel für die Mitte des «Sonnenstrichs» auf Zehntelgrad geschätzt werden kann.

Abbildung 3: Zur Berechnung der Koordinaten von Punkt H wird das sphärische Dreieck PHN benützt. Dessen Seiten liegen auf 3 Grosskreisen: Der gelbe Kreis läuft durch den Nordpol (N) und den Ort der Solaranlage (P); rot ist der Kreis, entlang dessen die Panelfläche bis zum Punkt H parallel verschoben wird; der weisse Kreis geht durch den Nordpol und durch den gesuchten Ort H.

Bekannt sind die Seiten b und c und der Winkel α . Daraus können die übrigen Stücke des Dreiecks berechnet werden. (Formeln im Kasten auf Seite 12) χ ist das Panelazimut am Ort H.



Nun sucht man in einem Astronomie-Simulationsprogramm die Sonnenazimute zu den Zeiten der Ableistung. Aus dem Durchschnitt einiger Messungen kann das gesuchte Azimut auf etwa $\frac{1}{2}^\circ$ genau bestimmt werden.

Überprüfung im Experiment

Ich wollte die obigen Überlegungen durch einen Versuch überprüfen. Eine schräg montierte Holzplatte mit bekannter Neigung wird auf einer horizontalen Tischfläche (diese mit einer Wasserwaage ausgerichtet) so weit gedreht dass die Sonne möglichst genau streifend einfällt (Abbildung 6). Nun notiere ich die aktuelle Uhrzeit, dies ist die Zeit für «Sonnenuntergang» oder «Sonnenaufgang» auf der schrägen Ebene. Für die so gefundene Orientierung der schiefen Platte bestimme ich noch das Panelazimut, wie oben beschrieben.

Es ist nun interessant herauszufinden, wie genau diese Zeiten mit dem wirklichen Sonnenlauf am «Horizontort» übereinstimmt. Bei allen vier Versuchen war die berechnete Sonnenhöhe für die Zeit von Sonnenaufgang oder Sonnenuntergang etwas zu gross (15 bis 55 Bogenminuten). Diese unbedeutenden Differenz zeigte mir, dass das Berechnungsverfahren korrekt ist.

HANS ROTH hat meine Berechnungen freundlicherweise überprüft und mir weitere wertvolle Hinweise gegeben. Er schreibt: «Ich habe Rek-

taszenion und Deklination eines Objekts berechnet, das senkrecht auf das Panel scheint und dann den Ort auf der Erde gesucht, wo dieses Objekt zur gleichen Zeit im Zenit steht. Ich habe also das Problem direkt angegangen und bin beim Zahlenbeispiel auf die gleichen Resultate gekommen.»

Die tatsächliche Besonnung der Solaranlage

Wir können nun für einen beliebigen Tag herausfinden, wann die Sonne am «Horizontort» am Himmel steht. Diese Zeiten gelten auch für die Besonnung der Solarzellen, aber nur «wenn die Erde durchsichtig wäre».

Natürlich müssen jetzt noch die Zeiten für den Sonnenaufgang und -untergang in Schwarzenburg (und zudem Abschattungen durch Bäume, Häuser usw.) berücksichtigt werden. Tabelle 1 zeigt im 1. Teil folgendes:

- Am kürzesten Tag bescheint die Sonne das Panel von Sonnenaufgang bis -untergang.
- Bei Tag und Nacht-Gleiche ist der Morgen ebenfalls optimal, das Panel wird aber schon 51 Minuten vor Sonnenuntergang nicht mehr beschienen.
- Am längsten Tag beginnt die Besonnung des Panel erst 10 Minuten nach Sonnenaufgang und endet schon 1 Stunde 45 Minuten vor Sonnenuntergang.

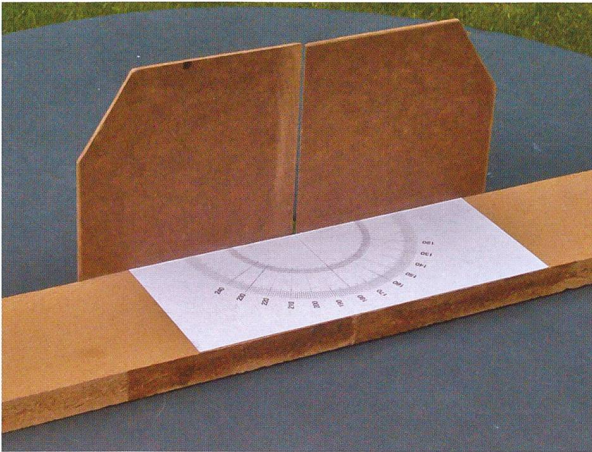


Abbildung 4: Gerät zum Bestimmen der Wandnormalen bei ebenen Sonnenuhren oder zum Ermitteln des Panelazimuts. Am langen rechteckigen Brett ist eine senkrecht stehende Wand montiert. Diese enthält eine Spalte, durch welche das Sonnenlicht auf den Winkelmesser fällt. Hier kann ich die horizontale Richtung zur Sonne in Bezug auf das Gerät ablesen.

Die Abschattung durch Befestigungselemente

Ein kleines Detail nur, aber wie sich zeigen wird, kein unwichtiges! In technischen Hinweisen steht: «Trifft Schatten auf ein Solarmodul, sinkt die Leistung des Moduls drastisch. Der Strom des ganzen Moduls ist nie grösser als der Strom der beschatteten Zelle.» Das heisst: Wird auch nur ein kleiner Teil der Silizium-Fläche von Schatten getroffen, produziert die ganze Anlage praktisch keinen Strom mehr. Und

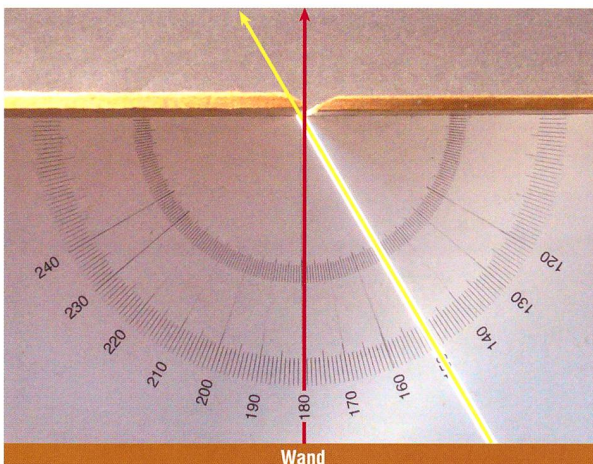


Abbildung 5: Das Azimut-Messgerät liegt an der Wand an. Das Lot auf die Wand (Wandnormale) geht durch die Marke 180° der Winkelskala. Die Sonne scheint durch den Spalt im senkrechten Brett und erzeugt eine helle Linie, welche die Skala bei 150° trifft. Der gelbe Pfeil zeigt die horizontale Richtung zur Sonne. Die Differenz der beiden Richtungen beträgt 30°. Messung: Man liest gleichzeitig den Winkel des «Sonnenstrichs» und die Zeit ab.

diese entscheidende kleine Fläche kann der Schatten sein, den die Aluminium-Leisten werfen, mit denen die Glasplatten festgeklemmt sind (Abbildung 7). Deren obere Kante lag ursprünglich 15 mm über der Siliziumschicht; durch abschrägen der Kante konnte die Höhe auf 12 mm reduziert werden. Zudem wurde der Abstand der Siliziumfläche von 20 mm auf 30 mm vergrössert, wodurch die ganze Anlage 36 cm länger wurde – der Platz dazu war reichlich vorhanden. Beide Massnahmen brachten eine deutliche Verbesserung, d.h. eine Verlängerung der nutzbaren Besonnungszeit.

Es ist schwierig, die Dauer dieser zusätzlichen Beschattung abzuschätzen. Am Horizontort ist unsere parallel verschobene Anlage ja nicht nach Süden ausgerichtet, sondern um 24,5° nach Osten gedreht (berechnetes Panelazimut $\chi = 155,5^\circ$). Die Beeinträchtigungen am Vormittag und am Nachmittag sind deshalb zeitlich nicht symmetrisch. Ein Gedankenexperiment schafft etwas Klarheit:

Wir nehmen an, die Kante k des Panels sei nach Süden gerichtet ($\chi = 180^\circ$) und die Sonne laufe am Himmel in immer gleicher Höhe ringsum (δ wächst von 0° bis 360°). Bei einer Sonnenhöhe $\sigma = 10^\circ$ und einer Kantenhöhe $h = 12$ mm ist der Schattenstreifen am breitesten, wenn die Sonne von Osten oder Westen her scheint, er verschwindet, wenn die Sonne im Süden oder Norden steht. Bei $d = 30$ mm hätte die Siliziumschicht Sonne bei einem Sonnenazimut von 154° bis 206° und von 334° bis 26° . (Diese Grenzen wurden mit Hilfe der nachstehenden Formeln berechnet.) Sie liegen symmetrisch zu 180° und 0° . Ist das Panel

um 25° gedreht, ändern sich die genannten Winkel ebenfalls um 25° : Die Besonnung wird erreicht bei einem Sonnenazimut von 129° bis 181° und von 309° bis 1° – die asymmetrische Situation. Wenn wir uns jetzt noch die in Wirklichkeit ändernde Sonnenhöhe vergegenwärtigen, wird die Situation wesentlich komplizierter und anschaulich kaum mehr fassbar. Da helfen nur die Berechnungen weiter:

Aus der Sonnenhöhe σ und dem Sonnenazimut δ am «Horizontort» zu einer bestimmten Zeit wird die Breite des Schattenstreifens berechnet. Man orientiere sich bei den Abbildungen 7 und 8 und benutze folgende Formeln:

Gegeben:

χ = Azimut der Sonne zur Zeit t
 h = Höhe der Kante
 d = Distanz Silizium vom Alu-Profil
 σ = Höhe der Sonne zur Zeit t
 δ = Azimut der Sonne zur Zeit t

Gesucht:

f = Breite des Schattens zur Zeit t

Formeln:

$\varepsilon = \chi - \delta$
 ϕ = Absolutwert von ε (d. h. wenn ε negativ wird, wechsele man das Vorzeichen)
 $e = h / \tan \sigma$
 $f = e \cdot \sin \phi$
 Schatten auf Silizium zur Zeit t , wenn $f > d$

Durch Probieren finde ich diejenige Zeit, wo die Schattenbreite gerade 30 mm (resp. 20 mm) beträgt. Dies ist die Zeit, bei der die Besonnung am Morgen beginnt oder am Abend endet.

Die Resultate stehen im 2. Teil in Tabelle 1, sie zeigt die Daten zu beiden Bau-Varianten:

- Am kürzesten Tag wirkt sich die Abschattung überhaupt nicht aus. (Am «Horizontort» wäre das Panel – bei beiden Varianten – sogar schon ab 06:39 Uhr ohne störenden Schatten.)
- Am 20. März verliert man am Morgen mit beiden Varianten fast gleich viel an Besonnungszeit (42 oder 43 Minuten) am Nachmittag gewinnt man durch die abgeänderte Bauweise 1 Std. 15 Minuten mehr Besonnungszeit und für den ganzen Tag 16% mehr. Aber: Die Abschattung reduziert die Zeit am Abend in beiden Fällen trotzdem empfindlich!
- Am längsten Tag wirkt sich die Abschattung stark aus. Mit Bauvariante 2 scheint die Sonne am Morgen 1 Std. 7 Min. früher und am Abend 1 Std. 11 Min. länger als

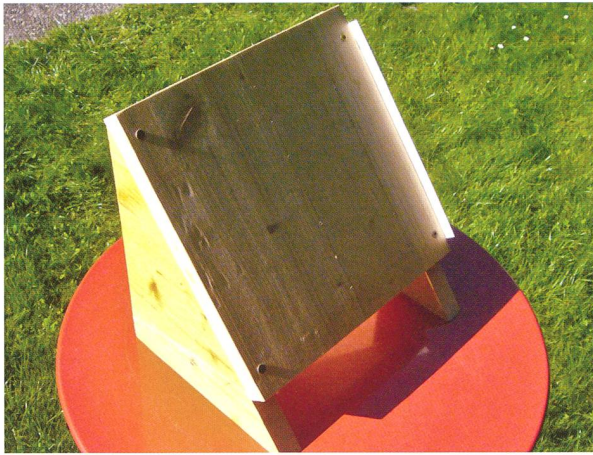


Abbildung 6: Sonnenuntergang am Brett in beliebiger Lage. Die Neigung des Brettes wird durch die beiden rechtwinkligen Holzdreiecke bestimmt. Aus den Massen deren Katheten berechne ich den Neigungswinkel. Das Gestell steht auf einer horizontalen Tischfläche. In den späten Nachmittagsstunden simuliere ich den «Sonnenuntergang auf der Brettebene» indem ich das Brett so weit drehe, dass es möglichst genau vom streifenden Licht getroffen wird. Der Papierstreifen an der rechten Kante muss noch beleuchtet sein, aber nicht vom Brettschatten getroffen werden. Sobald die richtige Stellung gefunden ist, notiere ich die Uhrzeit.

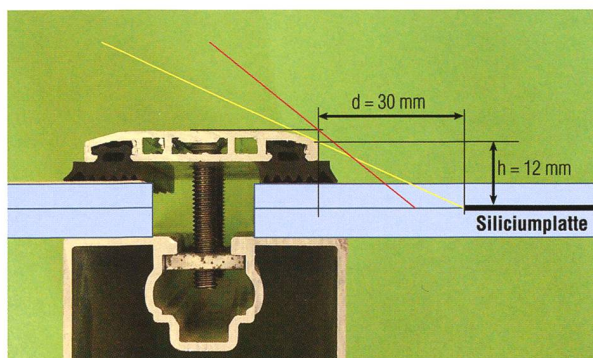
mit Variante 1. Insgesamt wird die nutzbare Zeit mit dieser Bauweise um 27% verlängert.

- Durch die Abschattung verliert man im Frühling und Herbst 21% im Sommer 23° Besonnungszeit.

Die Leistung der Solaranlage

Die Anlage hat einen Wirkungsgrad von etwa 15%, d.h. dieser Anteil der Sonnenleistung (Solarkonstante) auf 800 m Höhe wird in elektrische Leistung umgesetzt.

Die 0.2 mm dicken Siliziumschichten von 156 x 156 mm Fläche liefern je maximal 4 Watt. Die 36 Panelfelder enthalten je 40 solche Quadrate. Die 50 m² Panelfläche könnten theoretisch maximal 7,5 kW elektrische Leistung erzeugen, effektiv sind es etwa 5 kW. Die gesamte Panelfläche



Besonnung Solarpanels

Alle Zeiten in Universal Time UT

Datum	22. Dez.	20. März	21. Juni
Teil 1			
Schwarzenburg			
Aufgang	07:13	05:34	03:36
Untergang	15:45	17:43	19:28
Horizontort			
Aufgang	05:35	04:51	03:46
Untergang	15:48	16:52	17:43
Nutzbare Zeit			
von	07:13	05:34	03:46
bis	15:45	16:52	17:43
Dauer	8 h 32 m	11 h 18 m	13 h 57 m
Teil 2			
Besonnung bei d = 20 mm und h = 15 mm			
von	07:13	06:17	06:42
bis	15:45	13:56	15:08
Dauer	8 h 32 m	7 h 39 m	8 h 26 m
Besonnung bei d = 30 mm und h = 12 mm			
von	07:13	06:16	05:35
bis	15:45	15:11	16:19
Dauer	8 h 32 m	8 h 55 m	10 h 44 m

Tabelle 1

ist in 2 Teile unterteilt, jeder liefert Gleichstrom von 350 V Spannung. Dieser wird in einem Wechselrichter von 5,5 kW Maximalbelastung in Wechselstrom von 230 V Netzspannung umgewandelt. Gerät das untere Panelfeld in den Schatten, kann das obere weiterhin Strom liefern. Die maximale Stromproduktion wird erreicht bei «einigermaßen rechtwinkliger» Sonneneinstrahlung. – Wann und wie gut werden die optimalen Verhältnisse erfüllt? Der Verlauf der Sonne am «Horizontort» gibt uns die gewünschten Informationen: Am kürzesten Tag kulminiert die Sonne in 37.5° Höhe, bei Tag und Nacht-Gleiche bei 60.7° und am längsten Tag in 84.3° Höhe, jeweils kurz vor 11 Uhr UT. Das recht flach liegende Panel wird also nie aus der bestmöglichen Richtung beschienen.

Wie richtet man Solaranlagen aus?

Im Internet findet man Empfehlungen; «Für Anlagen in der Schweiz gelten folgende Richtwerte»:

- 30° Neigung wenn die Anlage grösstenteils im Sommer gebraucht wird.
- 45° Neigung wenn die Anlage im Sommer und Frühling/Herbst gebraucht wird.
- 60° Neigung wenn die Anlage während des ganzen Jahres betrieben wird und eine möglichst konstante Leistung erwartet wird.

In allen Fällen ist die Ausrichtung nach Süden (Panelazimut 180°) die beste. Kleine Abweichungen von diesen Winkeln wirken sich kaum aus.

Der Erbauer in Schwarzenburg wählte stark abweichende Werte. Er wollte seinen Zugangsweg zum Haus mit einer Art Pergola bedecken und nutzte dies für den Bau seiner Anlage (Abbildung 8). Dabei waren die Winkel aus praktischen und ästhetischen Gründen gegeben.

Abbildung 7: Schnitt durch die Befestigungselemente für die Glasplatten mit den Siliziumzellen. Die Siliziumschicht hat einen Abstand (d) von 30 mm vom Aluminiumprofil. Die obere Halterung ist zur Verminderung der Abschattung abgeschrägt, die Höhe (h) beträgt so nur 12 mm. Die gelbe Linie zeigt den minimalen Sonnenstand, der noch zu einer Beleuchtung des Siliziumrandes führt. Die rote Linie markiert die ungünstigere Situation für die zuerst geplante Variante (h = 15 mm, d = 20 mm).

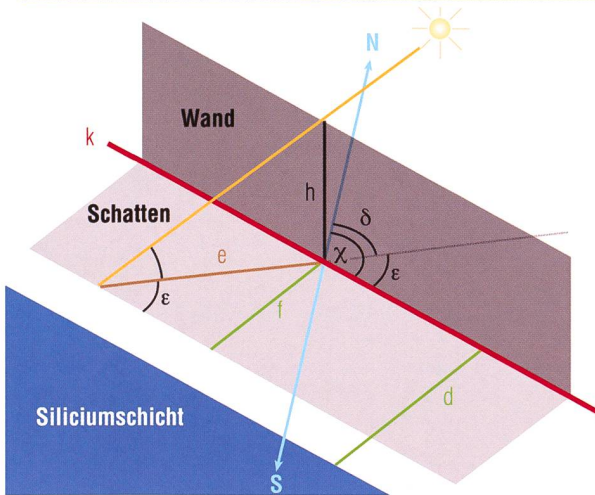


Abbildung 8: Zur Berechnung der Schattenbreite bei den Befestigungselementen. Die senkrecht stehende Wand mit der Höhe h erzeugt einen Schatten auf der horizontalen Fläche. Der Schatten trifft die Siliziumschicht, wenn $f > d$. In der Horizontalebene liegen: Die Richtung Nord-Süd, die Kante des Panels (k), die Strecken f und d (beide senkrecht zu k), die Projektion des Sonnenstrahls mit der Strecke e , der Schatten und die Siliziumschicht. Wird das Sonnenazimut δ grösser als das Panelazimut χ , liegt (in der Abbildung) der Schatten hinter der Wand. ε wird negativ, für die weitere Rechnung muss der positive Wert von ε verwendet werden. Diese Situation finden wir beim Panel, wenn die rechte Seite des Befestigungsprofils Schatten wirft.

Bei dieser Anlage in recht spezieller Lage war es für den Bauherrn besonders wichtig, zu wissen, wie die Besonnungsdauer ist und wie sie beeinflusst werden kann. Mit Hilfe der hier erläuterten Berechnungen erhielt er die gewünschten Angaben.

■ Erich Laager

Schlüchtern 9
CH-3150 Schwarzenburg/BE

Dieser Beitrag ist auch auf der ORION-Website orionzeitschrift.ch/rubriken/nachgedacht-nachgefragt.html zu finden



Abbildung 9: Die Solaranlage in Schwarzenburg liegt auf einer frei stehenden Metallkonstruktion im Garten. Diese deckt den Zugangsweg und wirkt wie eine Art Pergola. (Foto: Erich Laager)

Grössen und Symbole

Am Panelort (P)

- λ Geografische Länge
- φ Geografische Breite
- ω Neigung der Panelfläche zur Horizontebene bei P
- α Panelazimut und Richtung der Kante k

Am Horizontort (H)

- μ Geografische Länge
- η Geografische Breite
- χ Panelazimut und Richtung der Kante k
- σ Höhe der Sonne zur Zeit t
- δ Sonnenazimut zur Zeit t
- ε Winkel zwischen Sonnenrichtung und Panelkante

Beschattung durch Befestigungselemente

- h Höhe der Kante über der Siliziumschicht
- e Projektion des Sonnenstrahl auf die Horizontebene
- f Breite des Schattens beim Aluprofil
- d Abstand der Siliziumschicht vom Aluprofil

Wo liegt der «Horizontort» H?

(Bei H liegt die Horizontebene parallele zur Panelfläche)

Gegeben:

$\lambda, \varphi, \omega, \alpha$

Gesucht

μ, η, χ

Sphärische Dreieck PHN auf der Erdkugel (Abbildung 3)

Höhe der Kante über der Siliziumschicht
Seite a = gesuchter Abstand des Ortes H vom Nordpol
Seite b = Abstand des Ortes P vom Nordpol = $90^\circ - \varphi$
Seite c = Länge der Verschiebung von P nach H = ω

- α Panelazimut bei P
- β gesuchter Innenwinkel bei B
- γ Differenz der geogr. Längen von P und H

Berechnungen

- Berechnung des Winkels β

$$r = \sin \alpha \cdot \sin b$$

$$s = \sin c \cdot \cos b - \cos c \cdot \sin b \cdot \cos \alpha$$

$$\tan \beta = r / s \Rightarrow \beta$$

- Berechnung des Winkels γ

$$t = \sin \alpha \cdot \sin c$$

$$u = \sin b \cdot \cos c - \cos b \cdot \sin c \cdot \cos \alpha$$

$$\tan \gamma = t / u \Rightarrow \gamma$$

- Berechnung der Seite a

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos \alpha \Rightarrow a \text{ (wobei } 0^\circ < a < 180^\circ)$$

Gesuchte Stücke:

$$\mu = \lambda + \gamma, \eta = 90^\circ - a, \chi = 180^\circ - \beta$$

Zahlenbeispiel

$$\lambda = 7.3^\circ \text{ Ost}, \varphi = 46.8^\circ \text{ Nord}, \omega = 20^\circ, \alpha = 148^\circ$$

$$b = 43.2^\circ, r = 0.36275, s = 0.79484, \beta = 24.53^\circ,$$

$$t = 0.18124, u = 0.85470, \gamma = 11.97^\circ, a = 60.89^\circ$$

$$\mu = 19.27^\circ \text{ Ost}, \eta = 29.11^\circ \text{ Nord}, \chi = 155.47^\circ$$