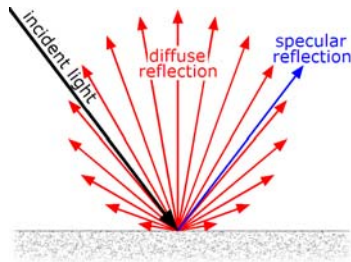




Einleitung

Reflexionen an PV-Anlagen



- Einschätzung von Reflexionswirkungen ohne Berechnungen
- Verfügbare Tools zur Berechnung von Reflexionswirkungen
- Materialien zur Reduktion der Blendwirkung
- Fazit und Erkenntnisse

Ist Blendung ein Problem

- 2022, Schweiz: 43'000 neue PV-Anlagen (fast 100% Dach)
- 20-50 Systeme (=0,1%) mit Blendungsproblemen (grobe Schätzung des Autors, keine offiziellen Zahlen verfügbar)

Herausforderung:

- Mangelndes Wissen, welche Dächer kritisch sind
- Mangelndes Wissen, wie Blendungsprobleme gemindert werden können
- Fehlende gesetzliche Grenzwerte, fehlende Prozesse, wie man Blendung berechnet
- Das öffentliche Bewusstsein steigt - Dies könnte zu einem echten Problem werden!

Es ist ein kleines Problem. Aber es muss gelöst werden, um nicht zu einem großen zu werden.

Tools

Welche Möglichkeiten gibt es für die Berechnung von Reflexionswirkungen

Einfache manuelle Grobabschätzung

- ▶ Leitfaden zum Melde- und Bewilligungsverfahren für Solaranlagen, Energie Schweiz Juni 2023
- ▶ Kapitel 8 Blendwirkung

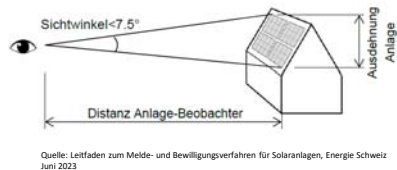


Juni 2023

Leitfaden zum Melde- und
Bewilligungsverfahren
für Solaranlagen



Einschätzung gemäss Leitfaden für einfache Anlagen

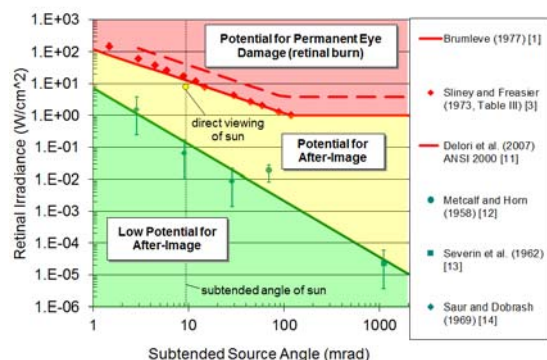


1. Die Anlage ist sehr klein (Wohnzone: Fläche $<10 \text{ m}^2$, Gewerbezone: Fläche $<100 \text{ m}^2$).
2. Die möglichen Beobachter sind sehr weit entfernt (Wohnzone: Abstand $>100 \text{ m}$, Gewerbezone $>50 \text{ m}$).
3. Das Verhältnis der maximalen Ausdehnung der Solaranlage zur Distanz zwischen Anlage und Beobachter ist kleiner als $1/8$.
4. Der maximale Sichtswinkel der Anlage vom Beobachter aus gesehen ist kleiner als 7.5° .

► → Diese Aussagen wurden bisher von keinem Gericht bestätigt.

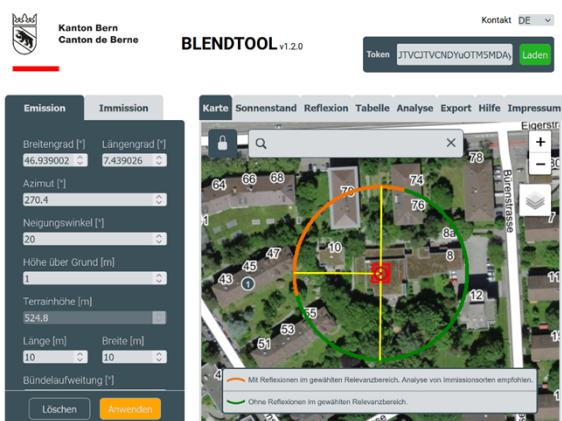
Berechnungstools - SGHAT

SGHAT von Forgesolar



- Kostenpflichtig
- Spezialisiertes Tool mit Fokus Flughäfen
- Qualitätssicherung herausfordernd, da wenig aussagekräftige Bilder ausgegeben werden

Berechnungstools – blendtool.ch

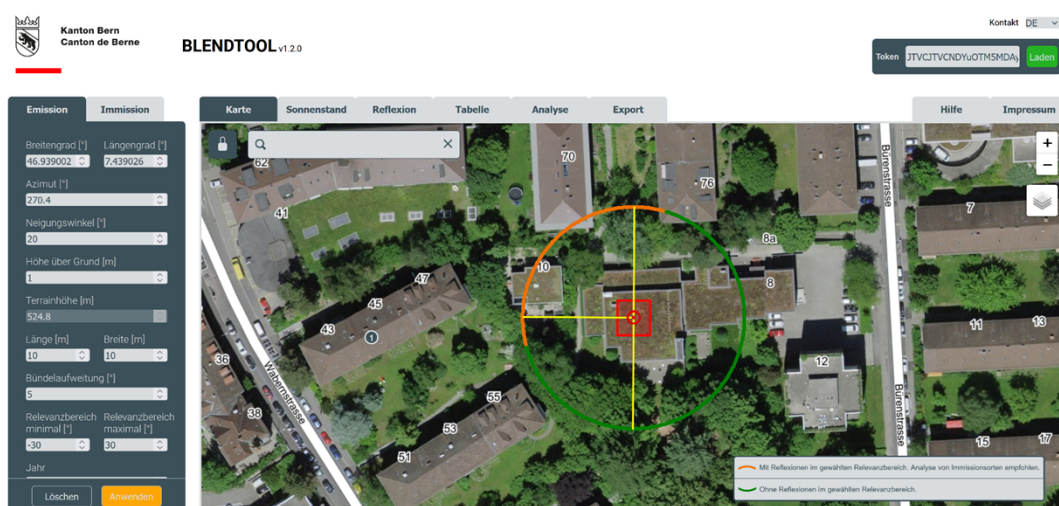


- Bedienung nicht überall ganz intuitiv jedoch mit etwas Übung machbar
- Übersichtliche Bilder die auch QS der Eingaben ermöglichen
- Bündelaufweitung nur teilweise berücksichtigt

Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

9

1) Wählen Sie einen Standort und ein Dach aus



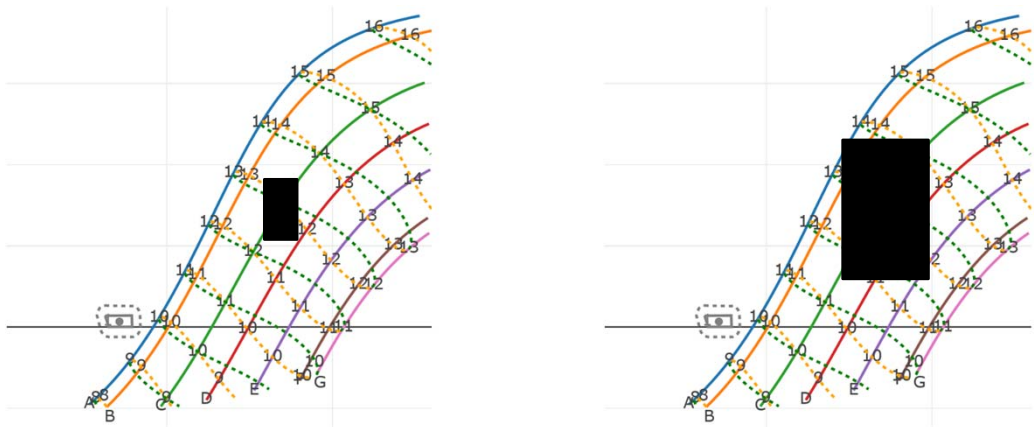
Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

10

2) Überprüfen Sie den Sonnenpfad



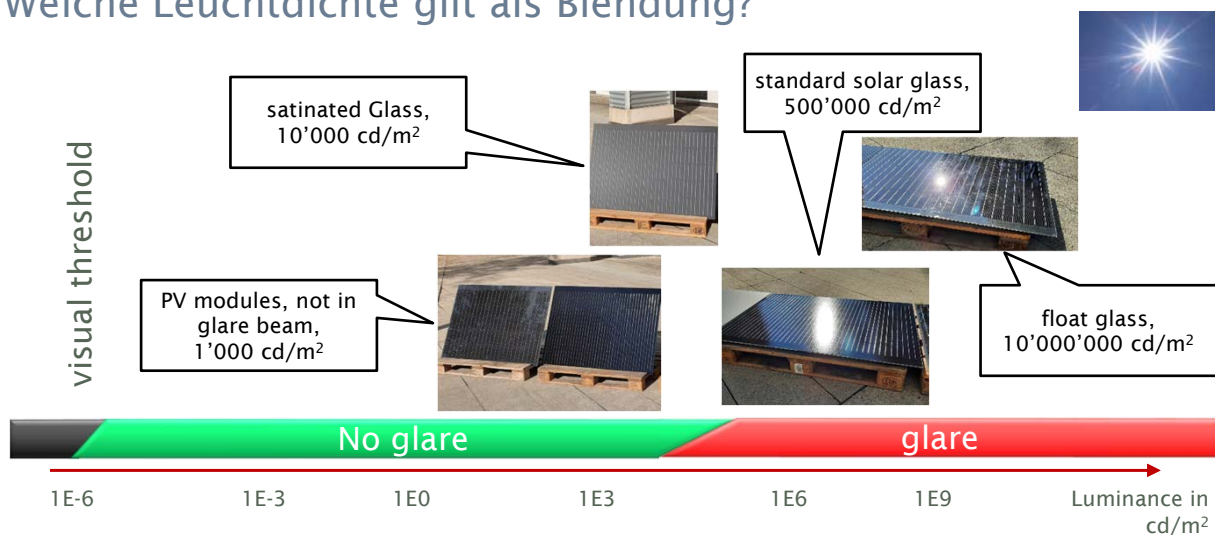
Links: keine Bündelaufweitung Rechts: 10° Aufweitung



Materialien

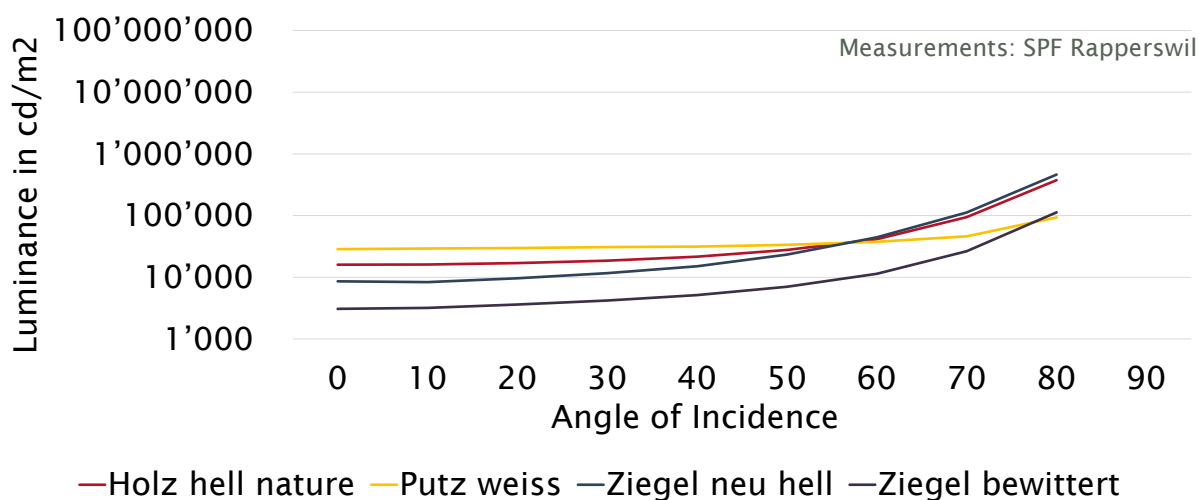
Aktuelles aus der PV-Forschung zum Thema Reduktion der Reflexionswirkungen

Welche Leuchtdichte gilt als Blendung?



Glare: 10'000 – 100'000 cd/m² ?

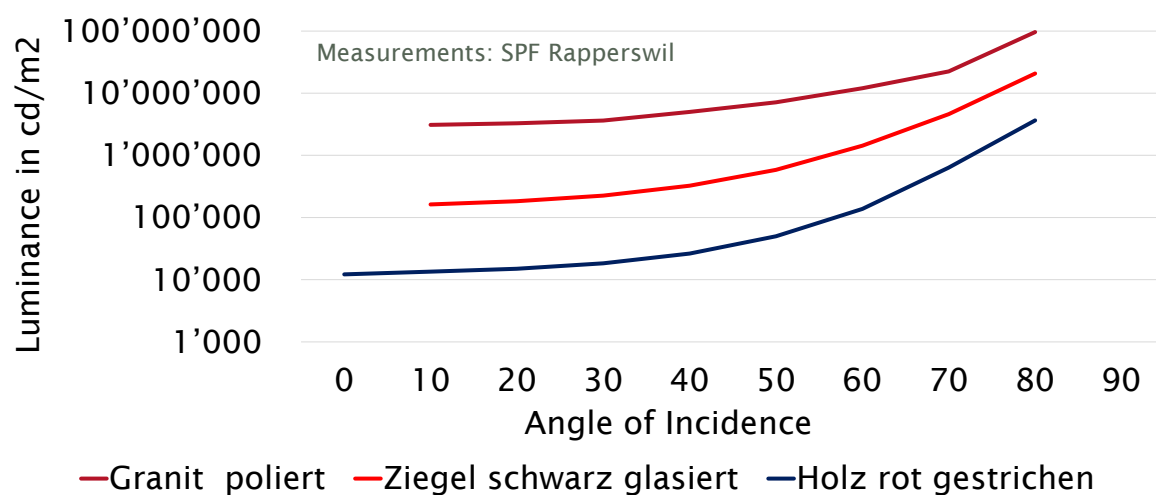
Holz, Wände, Ziegel: keine Blendung



Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

15

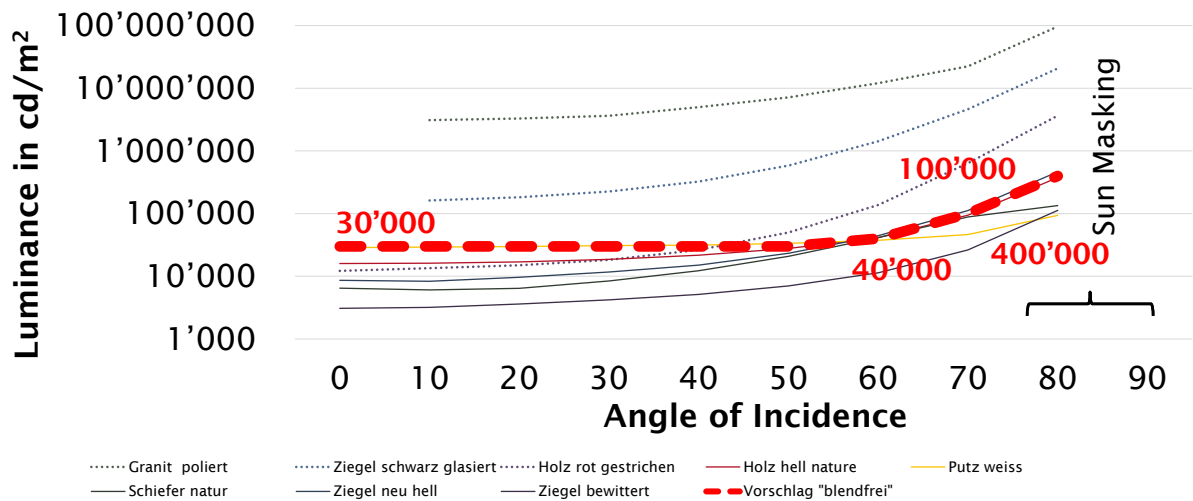
Polierter Stein, Glasfliesen, lackiertes Holz: Blendung möglich



Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

16

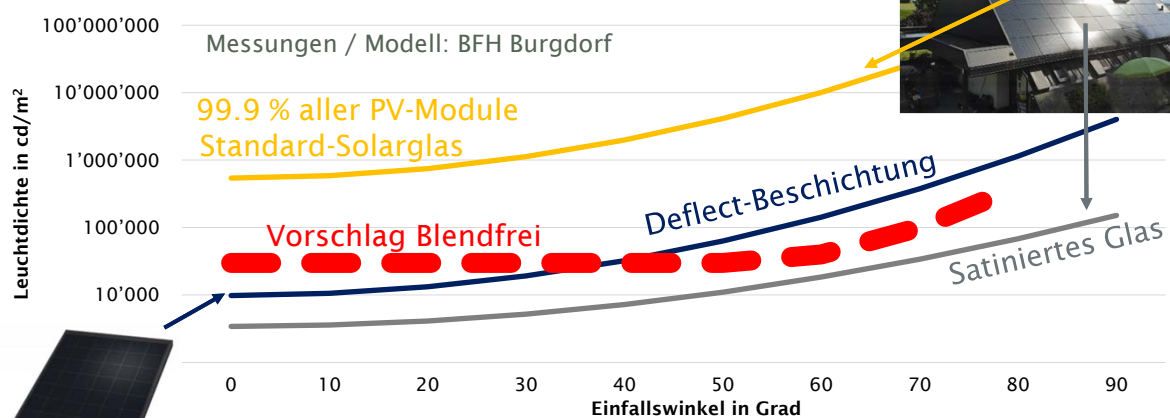
Proposal: Threshold for Glare-Free Surfaces



Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

17

Blenden PV-Module?



Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

18

Bemerkungen

- ▶ Diese Grenzwerte sind noch von keinem Gesetz oder Gericht bestätigt worden.
- ▶ Diese Grenzwerte entsprechen der Wahrnehmung des Menschen: Weiss verputzte Wände blenden nicht

Fazit



- ▶ Standardsolarglass - erhältlich
- ▶ Deflect - erhältlich
- ▶ Folien - (bald) erhältlich
- ▶ Satinato - erhältlich
- ▶ Mögliche neuartige Folienkonzepte

Blendung durch PV-Anlagen ist ein seltenes Problem.
Es gibt Tools zur Einschätzung von möglichen Blendwirkungen.
Es gibt geeignete Materialien zur Reduktion der Blendwirkung für besonders kritische Situationen.



B Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences

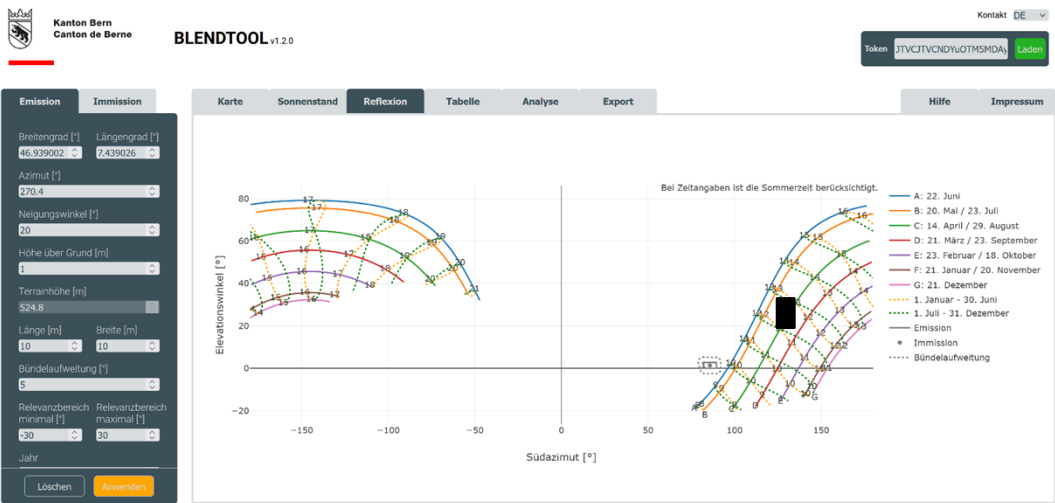
► **Kontakt**
Matthias Burri
+41 32 321 64 32
matthias.burri@bfh.ch
bfh.ch/pvlab



Backup

Vorschlag für Berechnung der Winkelabhängigkeit der Reflexion

3) Überprüfen Sie das Reflexionsdiagramm



Einschränkungen

- Strahlspreizung wird nicht korrekt dargestellt

The screenshot shows the BLENDTOOL v1.2.0 interface. On the left, there are input fields for 'Emission' and 'Immission'. The 'Immission' section includes fields for 'Azimut [°]' (270.4), 'Neigungswinkel [°]' (20), 'Höhe über Grund [m]' (1), 'Terrainhöhe [m]' (524.8), 'Länge [m]' (10), 'Breite [m]' (10), and 'Bündelaufweitung [°]' (10). The main area displays a map with a yellow rectangle and a red dot. A large yellow arrow points from the 'Bündelaufweitung [°]' slider on the right, which is set to 10, towards the map area.

Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

25

Blendung ist elliptisch und winkelabhängig

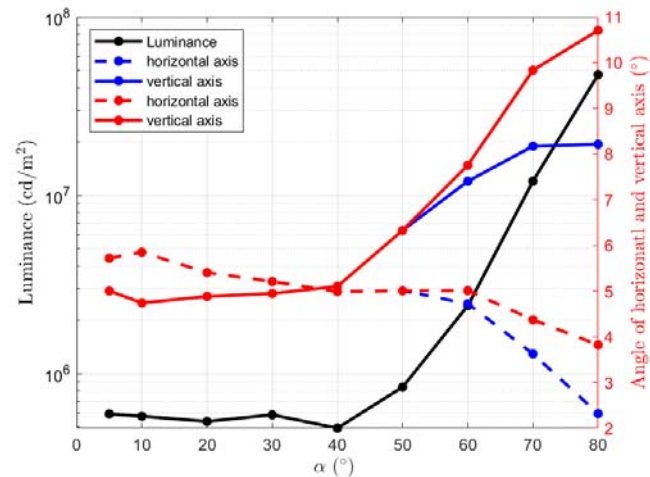


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

26

Description of the Glare Ellipse

- ▶ Max. Luminance
- ▶ Horizontal axis
- ▶ Vertical axis
- ▶ Red: 30'000 cd/m² threshold
- ▶ Blue: angle-dependent threshold



Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

27

Geometrical Functions to Describe the Glare Ellipse

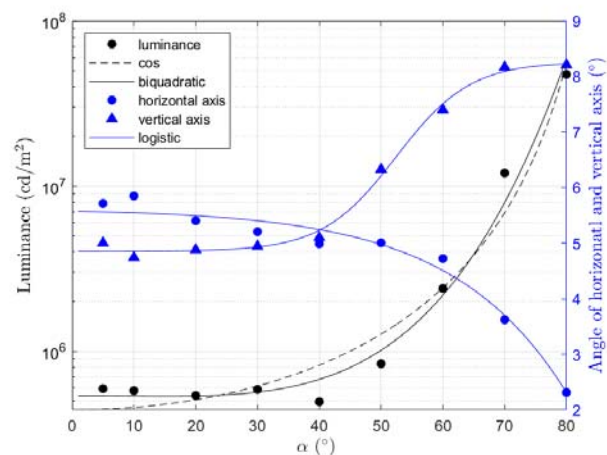
- ▶ Glare luminance (2 proposals):

$$\ln(y) = a + \frac{b}{\cos(\alpha)^c}$$

$$\ln(y) = a \cdot \alpha^4 + b \cdot \alpha^2 + c$$

- ▶ Horizontal and vertical axis of the glare ellipse (sigmoid function, logistic function):

$$y = \frac{a}{1 + e^{-(\alpha-b) \cdot d}} + c$$



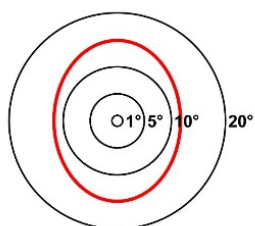
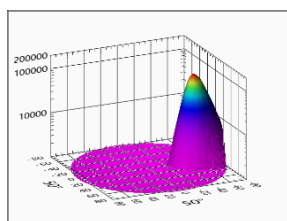
Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

28

Measurement of the Reflection

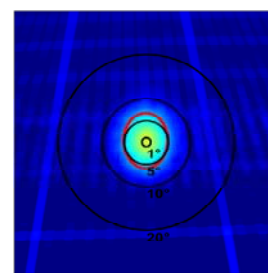
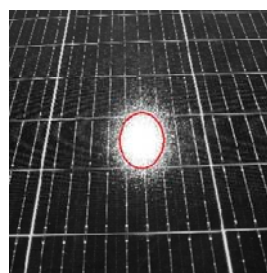
Method 1: Bidirectional Reflection Distribution Function

→ Done at SPF, Rapperswil, Switzerland



Method 2: Outdoor Luminance Measurement

→ Done at BFH, Burgdorf, Switzerland

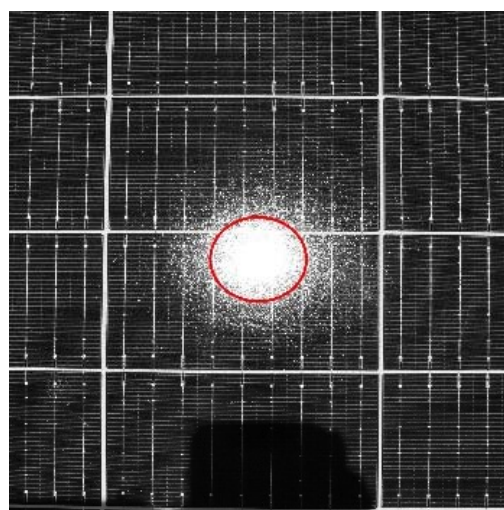


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

29

Angle of Incidence: 5°

► Limit value: 30'000 cd/m²

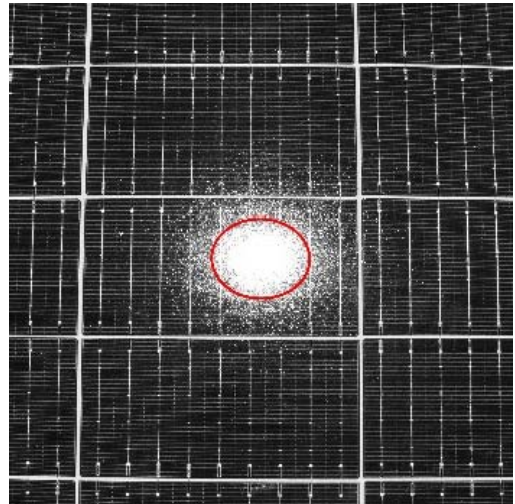


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

30

Angle of Incidence: 10°

- Limit value: $30'000 \text{ cd/m}^2$

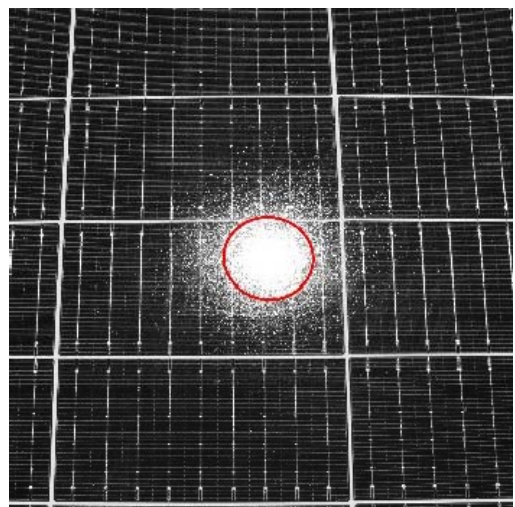


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

31

Angle of Incidence: 20°

- Limit value: $30'000 \text{ cd/m}^2$

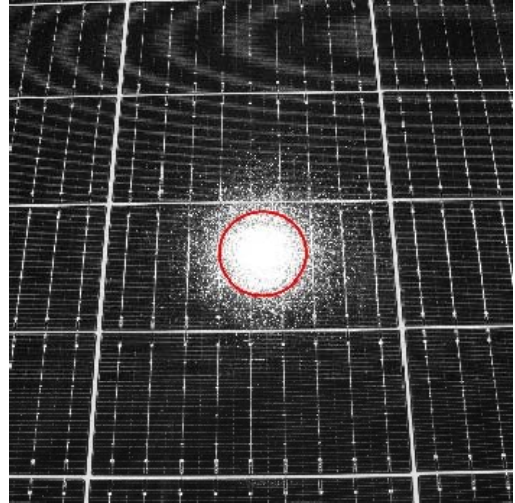


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

32

Angle of Incidence: 30°

- Limit value: 30'000 cd/m²

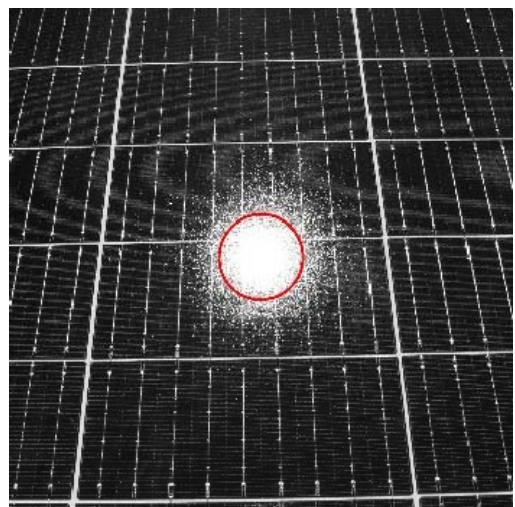


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

33

Angle of Incidence: 40°

- Limit value: 30'000 cd/m²

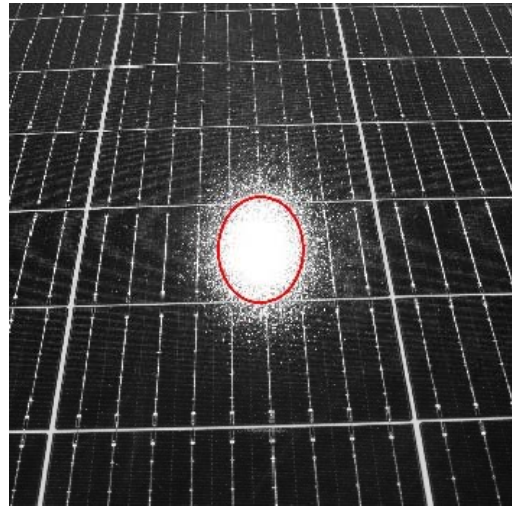


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

34

Angle of Incidence: 50°

- ▶ Limit value: 30'000 cd/m²

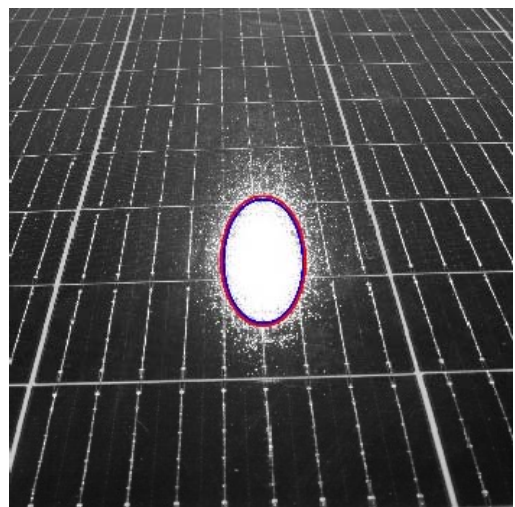


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

35

Angle of Incidence: 60°

- ▶ Limit value: 30'000 cd/m²
- ▶ Limit value: 40'000 cd/m²

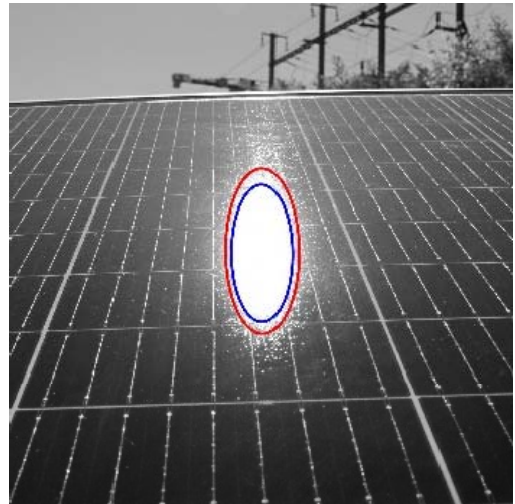


Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

36

Angle of Incidence: 70°

- ▶ Limit value: 30'000 cd/m²
- ▶ Limit value: 100'000 cd/m²



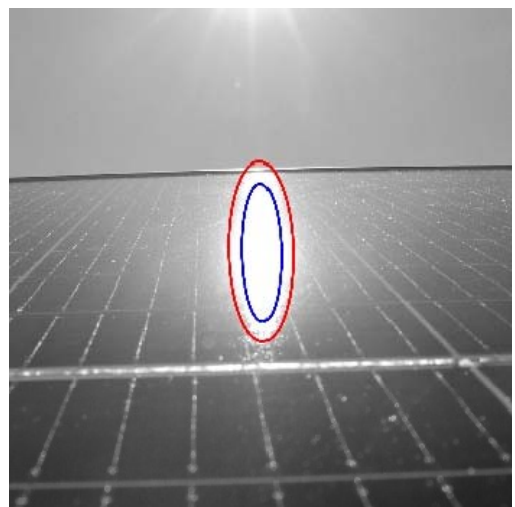
Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

37

Angle of Incidence: 80°

- ▶ Limit value: 30'000 cd/m²
- ▶ Limit value: 400'000 cd/m²

Note: 400'000 cd/m² clearly glare the eye. However, since the viewer is looking almost directly into the sun anyway, this glare does not really change the situation.



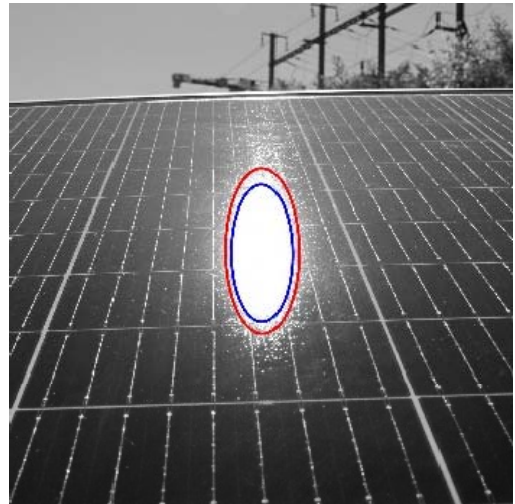
Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

38

“Final proposal”

Add the following coefficients to the data sheet of PV modules

- ▶ Luminance: a, b c
- ▶ Glare ellipse horizontal a, b, c, d
- ▶ Glare ellipse vertical: a, b, c, d



Conclusion and Outlook

Conclusion

- ▶ A method to easily describe elliptic glare on PV modules was introduced and demonstrated.

Outlook

- ▶ Further validate methodology
- ▶ Evaluate different PV modules
- ▶ Reach consensus on glare threshold value
- ▶ Implement the methodology in glare tools



Roman Schwarz / Christof Bucher

Grundlagen: physikalische Einheiten und Definition der Blendung

T081 Blendung | Burgdorf, 05.08.2022 | Christof Bucher

41

Definition der Blendung

Physiologische Blendung

Messbare
Herabsetzung der
Sehleistung oder des
Sehvermögens

Psychologische Blendung

Nicht oder bedingt
messbare, subjektive
Empfindung, die zu
Unwohlsein führen
kann, vor allem in
Innenräumen.

Absolutblendung

Eine Absolutblendung
tritt ein, wenn sich das
Auge nicht mehr an
die Helligkeit
anpassen kann. Die
Grenze dafür variiert
je nach Referenz und
beginnt bei ca.
100'000 cd/m².

Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor
T081 Blendung | Burgdorf, 05.08.2022 | Christof Bucher

42

Was ist eine Blendung?



PV Modul mit Blendung, Basler & Hofmann AG

- ▶ Ein Fotoapparat wird «geblendet», wenn die Licht-Rezeptoren sättigen. Ab diesem Moment gibt es keine «starke» oder «schwache» Blendung mehr: weiss bleibt weiss.
- ▶ Wann wird das menschliche Auge geblendet?
- ▶ In diesem Zusammenhang wird von der «Absolutblendung» gesprochen: Das Auge kann sich durch Verkleinern der Pupille nicht mehr vor dem Licht / der Helligkeit schützen.

Die Leistung der Blendung ist wenig relevant



Gegenlichtblendung im Auto, <http://healthylight.de/wp-content/uploads/2018/02/Gegenlicht-Blendung.png>

Autoscheinwerfer blenden:
 $< 1 \text{ W} / \text{m}^2$



PV auf einem Flachdach mit bewölktem Himmel, Basler & Hofmann AG

Bewölkter Himmel blendet
 nicht:
 Ca. $300 \text{ W} / \text{m}^2$

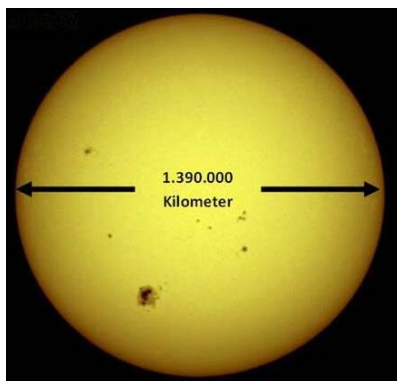
Relevante Faktoren für die Blendung



Blendung auf einem Hausdach, Christof Bucher

- ▶ Folgende Faktoren haben einen Einfluss darauf, ob eine Blendung störend ist:
 - Leuchtdichte (Helligkeit) der reflektierenden Oberfläche (cd/m^2)
 - Helligkeit der Umgebung / Kontrast
 - Richtung, aus der die Reflexion kommt (Azimut / Höhenwinkel).
 - relative Position der Blendung zur Sonne
 - Stabilität / Fluktuation
 - div. psychologische Faktoren (Verhältnis zum Nachbar, ...)
 - weitere Faktoren

Sonnenscheibe



Sonne mit Durchmesserangabe, <https://www.astronomie.de>

- Distanz Erde-Sonne: 149.6 Mio. km
- Durchmesser der Sonne: 1.39 Mio. km
- Grösse der Sonne (Winkel), von der Erde aus gesehen:
 - ▶ $\text{atan}\left(\frac{1.39 \text{ Mio.km}}{149.6 \text{ Mio.km}}\right) = 0.532^\circ$
 - ▶ $0.532^\circ \cdot \frac{\pi}{180} = 0.00923 \text{ rad}$
- Raumwinkel der Sonne, von der Erde aus gesehen:
 - ▶ $\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{(1.39 \text{ Mio.km}/2)^2 \cdot \pi}{(149.6 \text{ Mio.km})^2} = 0.0000678 \text{ sr} = 6.78e-5 \text{ sr}$
- Einstrahlung der Sonne auf der Erdoberfläche: ca. 1000 W/m^2 (extraterrestrisch: 1367 W/m^2)

Lichtstrom (Lumen) und Lichtstärke (Candela)

Lichtstrom Φ in Lumen (lm)

«Der Lichtstrom beschreibt die Strahlung, die Lichtquellen in Form von sichtbarem Licht abgeben» (Wikipedia).

Doppelt so viele Lumen = doppelt so viel Licht → die doppelte Leistung wird benötigt.



LED-Lampe, philips.ch

Lichtstärke I in Candela (cd)

► Gibt an, wie gross der Lichtstrom pro Raumwinkel ist.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad \left[cd = \frac{lm}{sr} \right]$$

► Wobei der Raumwinkel Steradian $sr = 4\pi \approx 12$ den ganzen Raum bezeichnet. Leuchtet eine Spotlampe bei gleichbleibendem Lichtstrom nur den halben Winkel aus, so verdoppelt sich die Lichtstärke.



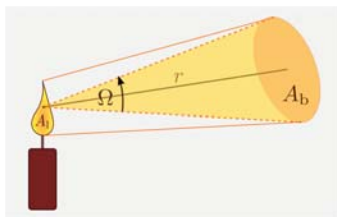
Spot, philips.ch

Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

1081 | Blending | Burgdorf, 05.08.2022 | Christof Bucher

47

Strahldichte



Strahlkegel einer Kerze, <https://www.grundwissen.de/physik/optik/photometrie.html>

► Die Strahldichte gibt an, welche Leistung in W pro Fläche in m^2 in einen bestimmten Raumwinkel in Steradian (sr) abgegeben werden.

► Beispiel Sonne:

– Sichtbarer Sonnenraumwinkel: 0.0000678 sr

– Einstrahlung der Sonne auf der Erde: 1000 W/m^2

– Strahldichte der Sonne auf der Erde:

$$\frac{1368 \text{ W/m}^2}{0.0000678 \text{ sr}} = 20.18 \text{ MW/(m}^2 \cdot \text{sr)} = 2018 \text{ W/(cm}^2 \cdot \text{sr)}$$

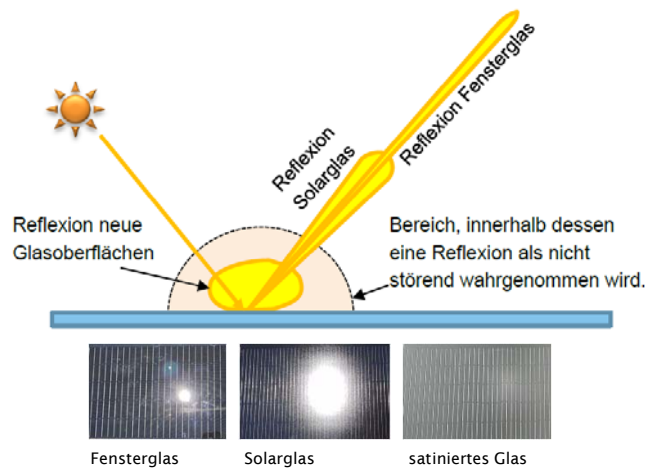
$$\frac{1000 \text{ W/m}^2}{0.0000678 \text{ sr}} = 14.75 \text{ MW/(m}^2 \cdot \text{sr)} = 1475 \text{ W/(cm}^2 \cdot \text{sr)}$$

Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

1081 | Blending | Burgdorf, 05.08.2022 | Christof Bucher

48

Eine weisse Wand reflektiert stärker als ein PV Modul



Die weisse Wand reflektiert etwa 50% des Sonnenlichts homogen in eine Hemisphäre
– Leuchtdichte = 20'000 cd/m²

Das PV-Modul reflektiert etwa 5% des Sonnenlichts in einen Raumwinkel von ca. 5°
– Leuchtdichte = 500'000 cd/m²

(Schätzwerte)

Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor
T081 Blendung | Burgdorf, 05.08.2022 | Christof Bucher

49

Beleuchtungsstärke

► Beleuchtungsstärke E in Lux (lx)

- Die Beleuchtungsstärke gibt an, wie viel Lichtstrom Φ auf eine Fläche fällt:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad \left[lx = \frac{lm}{m^2} \right]$$

- Tageslicht hat eine Beleuchtungsstärke von rund 100'000 lx (entspricht 1'000 W/m²).

Empfehlung SECO

Raum	Beleuchtungsstärke
Arbeitsräume für mittelfeine Arbeiten bzw. einfache Sehaufgaben	300 – 500 lx
Raumzonen mit Bildschirmarbeitsplätzen	500 – 1000 lx
Arbeitsplätze für feine Arbeiten bzw. normale Sehaufgaben	500 – 1000 lx

Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor
T081 Blendung | Burgdorf, 05.08.2022 | Christof Bucher

50

Leuchtdichte

- ▶ **Leuchtdichte in Candela pro Quadratmeter (cd / m^2)**
- ▶ «Die Leuchtdichte einer Fläche bestimmt, mit welcher Flächenhelligkeit das Auge die Fläche wahrnimmt und hat daher von allen photometrischen Größen den unmittelbarsten Bezug zur optischen Sinneswahrnehmung» (Wikipedia).
- ▶ → Die Leuchtdichte gibt an, wie gross der Lichtstrom von einer bestimmten Fläche in eine bestimmte Richtung ausgeht.

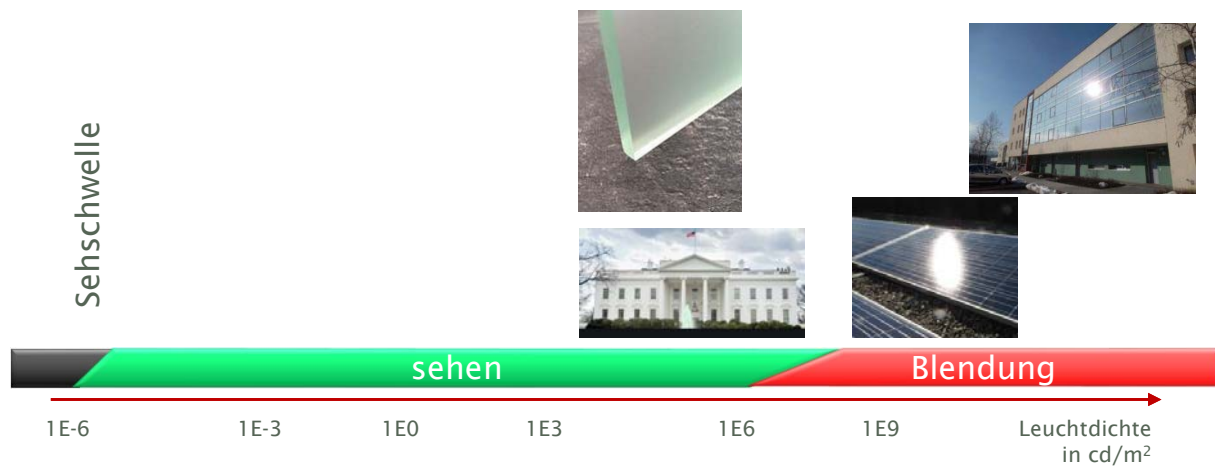
Leuchtdichten

Quelle	Leuchtdichte (cd/m^2)
Sonnenscheibe am Mittag	1'600'000'000
Draht einer Halogenlampe	25'000'000
Sonnenscheibe am Horizont	6'000'000
Leuchtstoffröhre	11'000
Klarer Himmel	8'000
Oberfläche des Mondes	2'500
Bildschirm	300
Sehschwelle	0.000 003

Helligkeit von Lichtquellen



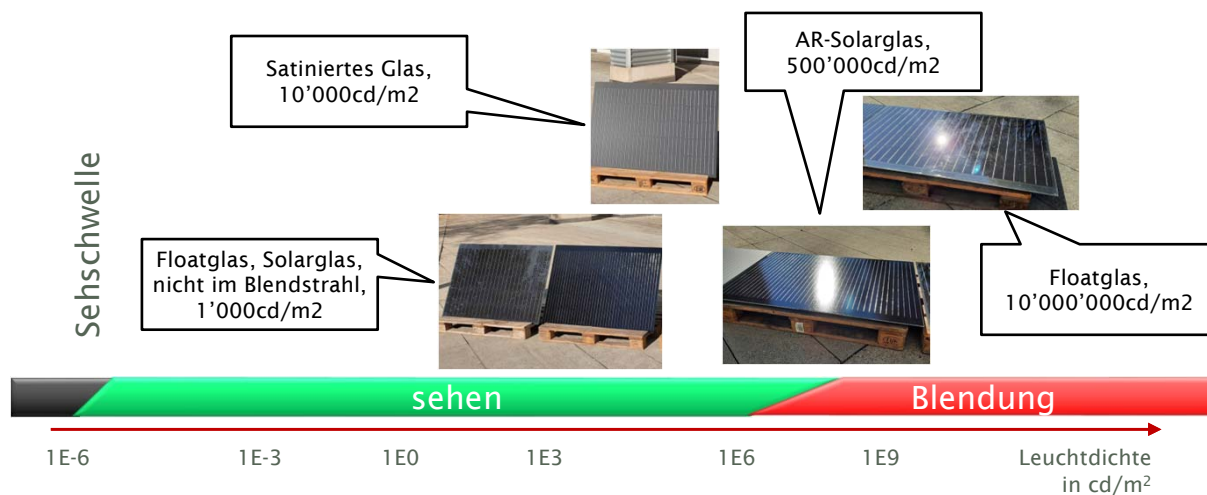
Helligkeit der Gebäudehülle



Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

53

Helligkeit der Gebäudehülle



Berner Fachhochschule | Technik + Informatik | Vorstellung PV-Labor

54

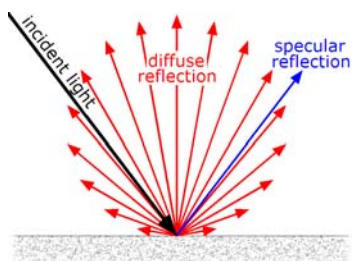
Blendung wird mit Leuchtdichte beurteilt

Die Leuchtdichte in cd/m^2 ist in der Schweiz die relevanteste physikalische Grösse zur Beurteilung von Blendungen. Aber nicht die einzige.

Beschaffenheit der Glasoberfläche: relevant oder nicht?

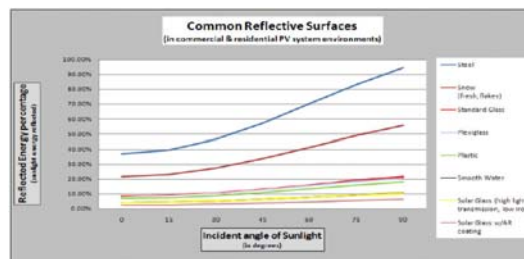
Relevant

Bündelaufweitung
(Streuverhalten) der Reflexion



Weniger relevant

Reflexionskoeffizient (Anteil des reflektierten Lichts)



Welche Gläser blenden?



Fensterglas

AR-Glas

Strukturiertes Glas

Quantification of Glare from Reflected Sunlight of Solar Installations, SPF Institute for solar technology, HSR rapperswil university of applied science, Florian Ruesch, Andreas Bohren, Mattia Battaglia, Stefan Brunold